

Plan Integral de Recursos de Agua de Puerto Rico

2016



Aprobado por la Comisión Estatal de Elecciones
CEE-SA-16-11450



PLAN INTEGRAL DE RECURSOS DE AGUA DE PUERTO RICO, 2016

Políticas, Proyectos, Objetivos

ABSTRACT

Documento que establece las políticas públicas para la administración y planificación de los recursos de agua del Puerto Rico.

DRNA



ORDEN ADMINISTRATIVA 2016 - 06 PARA APROBAR Y ADOPTAR EL PLAN INTEGRAL DE RECURSOS DE AGUA DE PUERTO RICO

POR CUANTO: El Artículo VI, Sección 19, de la Constitución del Estado Libre Asociado de Puerto Rico establece que: *"será política pública del Estado Libre Asociado la más eficaz conservación de sus recursos naturales, así como el mayor desarrollo y aprovechamiento de los mismos para el beneficio general de la comunidad"*.

POR CUANTO: La Ley Núm. 23 de 20 de junio de 1972, según enmendada, conocida como *"Ley Orgánica del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales"*; la Ley Núm. 136 del 3 de junio de 1976, según enmendada, conocida como *"Ley para la Conservación, el Desarrollo y Uso de los Recursos de Agua de Puerto Rico"* (en adelante, *"Ley de Aguas"*); el Reglamento Núm. 6213, titulado *"Reglamento para el Aprovechamiento, Uso, Conservación y Administración de las Aguas de Puerto Rico"*; así como la Ley Núm. 170 de 12 de agosto de 1988, según enmendada, conocida como *"Ley de Procedimiento Administrativo Uniforme"*, asignan al Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (en adelante, *"DRNA"*) el deber ministerial de velar por el buen uso, manejo, conservación y protección de los recursos de agua de Puerto Rico mediante procedimientos administrativos uniformes.

POR CUANTO: La Ley 136-1976, *supra*, en su Artículo 5(a) atribuye y faculta al DRNA a "[p]reparar, adoptar y mantener un plan integral de conservación, desarrollo y uso de los recursos de agua de Puerto Rico en consulta con el Comité de Recursos de Agua que más adelante se establece. Este plan precisará los usos actuales de los cuerpos de agua del país y proyectará los futuros. En su preparación el Secretario tendrá presente el ciclo hidrológico, así como las necesidades de los sistemas naturales, sociales y económicos que dependen del recurso para su subsistencia y desarrollo."

POR CUANTO: El agua es un recurso natural de vital importancia para la vida, crecimiento y desarrollo de los pueblos. A pesar del valioso recurso agua ser considerado como renovable, el manejo inapropiado del mismo puede reducir la cantidad disponible y utilizable de este. Además, la contaminación irreversible de los cuerpos de agua puede convertir al recurso agua en uno agotable.

POR CUANTO: El DRNA elaboró y aprobó su primer Plan Integral de Recursos de Agua en el año 2008, logrando así desarrollar un instrumento de planificación que sirviera de guía para el manejo y conservación del recurso agua en Puerto Rico, mediante la identificación de acciones y actividades a realizarse.

POR CUANTO: El DRNA, a tenor con la Ley de Aguas de Puerto Rico, *supra*, en conjunto con el Comité de Recursos de Agua creado por la referida Ley, propuso y discutió en reuniones públicas y en vista pública celebrada el 29 de marzo de 2016, la actualización del Plan Integral de Recursos de Agua de Puerto Rico.

POR CUANTO: El DRNA, completó la actualización del Plan Integral de Recursos de Agua de Puerto Rico en mayo de 2016.

POR CUANTO: El Plan Integral de Recursos de Agua de Puerto Rico expone la problemática de los recursos de agua que el País enfrenta al presente, recoge las políticas públicas que se han desarrollado para atender a los distintos problemas y presenta los objetivos y estrategias que persigue el Estado Libre Asociado de Puerto Rico con la implantación de políticas.

POR TANTO: Yo, Carmen R. Guerrero Pérez, Secretaria del DRNA, en virtud de la Ley Núm. 23, de 20 de junio de 1972, *supra*, y la Ley de Aguas, *supra*, **APRUEBO Y ADOPTO** el Plan Integral de Recursos de Agua de Puerto Rico, el cuál regirá los procesos de planificación, administración, uso y aprovechamiento de las aguas en el Estado Libre Asociado de Puerto Rico inmediatamente después de mi firma de conformidad con la citada Ley de Aguas.

Esta Orden entrará en vigor de forma inmediata a la fecha de su firma y de la publicación de la misma en avisos públicos en dos (2) periódicos de circulación general e Internet mediante el portal del DRNA.

EN TESTIMONIO DE LO CUAL, firmo la presente y hago estampar en ella el sello del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico, en la ciudad de San Juan, Puerto Rico, hoy 13 de junio de 2016.

Carmen R. Guerrero Pérez
Secretaria



PRÓLOGO

El Plan Integral de Recursos de Agua de Puerto Rico (PIRA) que el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA) aquí presenta es un importante instrumento de planificación y manejo el cual, además de discutir los principales problemas que enfrenta nuestra isla relacionados al recurso agua, también esboza los objetivos que guiarán las acciones y recomendaciones sobre política pública para lograr el desarrollo sostenible del recurso agua del País.

Esta actualización del Plan surge como resultado de un amplio proceso de consulta, el cual integró al Comité de Recursos de Agua establecido mediante la Ley para la Conservación, el Desarrollo y Uso de los Recursos de Agua de Puerto Rico (Ley Núm. 136 de 3 de junio de 1976, según enmendada), representantes del sector privado, de organizaciones no gubernamentales y la ciudadanía en general.

Este proceso de planificación fue pensado como una estrategia cíclica quinquenal de perfeccionamiento continuo: planificar, implantar lo planificado, comprobar los resultados y, por último, revisar la planificación para iniciar un nuevo ciclo. Es por esto que resaltamos que el PIRA es un instrumento dinámico, el cual responde a las necesidades actuales, pero mirando hacia el futuro. Conforme surja nueva información que amerite ser incorporada o que modifique lo planteado en el Plan, éste será revisado para ajustarlo a las exigencias del momento. Este Plan constituye un avance en la dirección correcta hacia la administración racional de nuestros recursos de agua.

Confiamos que este proceso brinde los resultados esperados, de forma concreta y tangible en beneficio de nuestra isla caribeña. Además, es el modo concreto en el que se ejecuta la política pública sobre las aguas del Pueblo de Puerto Rico y sobre la cual debemos dar cuenta anualmente a la Asamblea Legislativa y al Gobernador que interesan examinar el grado de cumplimiento de los objetivos trazados en este Plan.

El PIRA atiende los axiomas básicos para la gestión integral de los recursos de agua del País, entre estos destacamos:

1. Evitar que incremente el nivel de pérdidas de agua en los sistemas de agua potable de forma que se reduzca el volumen de extracción de agua de nuestros cuerpos de agua para detener el deterioro de los mismos y de los vulnerables componentes bióticos asociados a éstos.
2. Integrar el análisis de los impactos asociados al cambio climático y sus implicaciones para el manejo y conservación del agua.
3. Fomentar la investigación sobre el recurso agua para lograr equilibrar la protección del medio ambiente con el aprovechamiento de los recursos hídricos necesarios para el desarrollo sostenible del país.
4. Promover políticas que abonan a actividades dirigidas a la protección y la conservación de las aguas y las cuencas hidrográficas.
5. Proteger las aguas superficiales y subterráneas, que sirven de sustento de ecosistemas acuáticos y terrestres dependientes de ellas.

6. Asegurar la planificación participativa con todos los integrantes de la sociedad, en la conciencia de la necesidad de coordinar los esfuerzos respectivos para el mejor conocimiento y la gestión de las aguas en las cuencas hidrográficas.
7. Proponer la elaboración de un Plan de Acción para Eventos de Sequía en Puerto Rico. Este Plan establecerá un sistema de indicadores que permitan diagnosticar la ocurrencia de los eventos de sequía en los ríos de la Isla, determinar su penetración y gravedad, así como esto afecta los abastos de agua en los embalses. Esto con el propósito de mitigar los efectos indeseados de las sequías, tratando de que se adopten las medidas necesarias para mitigar los efectos de las sequías.

Este Plan también destaca la necesidad del uso racional de los acuíferos y el mejoramiento de las condiciones ambientales en las cuencas, con énfasis en el mantenimiento de caudales ambientales en nuestros ríos y quebradas, para favorecer la sostenibilidad hidrológica de Puerto Rico.

A su vez, el Plan se elaboró con un extenso nivel de participación y no se limitó a solo suministrar información, sino también se trabajó para lograr una respuesta por parte de los interesados en forma de comentarios y recomendaciones que aportaran a tener un documento más robusto. Las consultas se hicieron para los borradores iniciales y para el documento que se llevó a vista pública el 29 de marzo de 2016.

La constante colaboración en forma de trabajo y aportaciones de miembros del Comité de Recursos de Agua, miembros de la academia, expertos y organizaciones de la sociedad civil, hicieron posible que hoy, el Departamento establezca políticas, metas, objetivos y proyectos de acción orientados a lograr un uso más eficiente y sostenible del este único y vital líquido.

En conclusión, la adopción del Plan Integral de Recursos de Agua de Puerto Rico adelanta la gestión para promover el desarrollo socioeconómico reconociendo la necesidad de un balance entre las actividades del ser humano y la protección del ambiente, satisfaciendo las necesidades de la presente generación y salvaguardando el derecho de las futuras generaciones a lo mismo. Ahora nos toca a todos y todas hacer valer la gestión integrada del manejo del recurso agua en Puerto Rico con la implementación de este importante Plan.

Carmen R. Guerrero Pérez
Secretaria
Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA)



PLAN INTEGRAL DE RECURSOS DE AGUA DE PUERTO RICO, 2016

CRÉDITOS

Redacción: Marianela Torres Rodríguez
Gregory L. Morris
Alejandro Silva Huyke
Félix I. Aponte González

Información técnica: Gregory L. Morris
Alejandro Silva Huyke
Félix I. Aponte González

Colaboradores: Félix I. Aponte Ortiz
Comité de Recursos de Agua

Apoyo técnico: Sofía Burgos Caraballo, DMPA
Leonela P. Torrado Gonzalez, DMPA
Francisco A. Catalá Míguez, DMPA
Aurielee Díaz Conde, DMPA
Karleen Wagner Vega, DMPA
Emma M. Quero Torres, DMPA
Yanira Cruz Morales, DMPA

Mapas: Francisco A. Catalá Míguez
Aurielee Díaz Conde

Ilustraciones: Gregory L. Morris
Alejandro Silva Huyke
Sofía Burgos Caraballo

Fotos: Gregory L. Morris
DRNA

Financiamiento:

Este documento fue financiado con el Fondo Especial de Agua, creado por la Ley de Aguas de Puerto Rico, Ley Núm. 136 de 3 de junio de 1976, según enmendada.

Para citar este documento: DRNA. 2016. Plan Integral de Recursos de Agua de Puerto Rico 2016, División de Monitoreo del Plan de Aguas, San Juan, Puerto Rico.

Siglas

AAA: Autoridad de Acueductos y Alcantarillados

AEE: Autoridad de Energía Eléctrica

AEMEAD: Agencia Estatal para el Manejo de Emergencias y Administración de Desastres

AMSJ: Área Metropolitana de San Juan

AWWA: American Water Works Association, por sus siglas en inglés, conocida en español como la Asociación Americana del Agua (

BOD: Biochemical Oxygen Demand, por sus siglas en inglés, conocido en español como la *Demanda Biológica de Oxígeno*.

CE: Comité Ejecutivo

CMNUCC: , por sus siglas en inglés, conocido Convención Macro de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.

CWA: Clean Water Act, por sus siglas en inglés, conocido en español como Ley de Aguas Limpias.

DA: Departamento de Agricultura

DMPA: División de Monitoreo Plan de Aguas

DRNA: Departamento de Recursos Naturales y Ambientales

DS: Departamento de Salud

EE.UU.: Estados Unidos

ELA: Estado Libre Asociado de Puerto Rico

EPA: Environmental Protection Agency, por sus siglas en inglés, conocida en español como la *Agencia de Protección Ambiental*.

FEMA: Federal Emergency Management Agency. Conocido en español como la *Agencia Federal para el Manejo de Emergencias*.

GEI: Gases de Efecto de Invernadero

IPCC: Intergubernamental Panel of Climate Change, por sus siglas en inglés, conocido en español como Panel Intergubernamental de Cambio Climático.

ISO: “International Organization for Standardization” (por sus siglas en inglés), que en español se conoce como la

Organización Internacional de Normalización.

JCA: Junta de Calidad Ambiental

JP: Junta de Planificación

MAVDT: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

MGD (mgd): Millones de galones diarios.

NCDC: *National Climatic Data Center*, por sus siglas en inglés, conocido en español como *Centro Nacional de Datos Climáticos de Estados Unidos*.

NFIP: National Flood Insurance Program, por sus siglas en inglés, conocida en español como *Programa Nacional del Seguro Contra Inundación*.

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration, por sus siglas en inglés, conocida en español como *Administración Nacional Oceanográfica y Atmosférica*.

NPDES: National Pollutant Discharge Elimination System, por sus siglas en inglés, conocido en español como *Sistema Nacional de Eliminación de Descargas de Contaminantes*.

NPL: National Priority List, por sus siglas en inglés, conocido en español como *Lista de Prioridad Nacional*.

NWS: National Weather Service, por sus siglas en inglés, conocido en español como *Servicio Nacional De Meteorología*.

O&M: Operation and Maintenance, por sus siglas en inglés, conocido en español como *Operación y Mantenimiento*

PDF: Portable document format

PNB: Producto Nacional Bruto

POT: Plan de Ordenación Territorial

PVC (n=0.010): material de cloruro de polivinilo (polyvinyl chloride) con rugosidad de 0.010 (coeficiente de Manning).

PUT: Plan de Uso de Terrenos de Puerto Rico.

RCP: Representative Concentration Pathways, por sus siglas en inglés, conocido

en español como Trayectoria de Concentración Representativa.

RECA: Reglamento de Estándares de Calidad de Agua de Puerto Rico

RD/RA: Remedial Design/Remedial Action, por sus siglas en inglés, conocido en español como Diseño de Remediación/ Acción Remedial.

RI/FS: Remedial Investigation/Feasibility Study, por sus siglas en inglés, conocido en español como Investigación

Remediativa/Estudio de Viabilidad

SACN: Superacueducto de la Costa Norte

SOPI: Sociedad Ornitológica Puertorriqueña

UNESCO: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, por sus siglas en inglés, conocido en español como la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

USFW: United States Fish and Wildlife Service, por sus siglas en inglés, conocido en español como *Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos*.

USGS: United States Geological Service, por sus siglas en inglés, conocido en español como *Servicio Geológico Federal*

Abreviaturas

AP/año	acre-pie por año
gpd	galones por día
gpm	galones por minuto
Gva	giga vatios
Km	kilómetros
Kva	kilovatios
mgd	millones de galones diarios
mg/l	miligramos por litro
m	metro
Mm ³	millones de metros cúbicos
mi	millas
mi ²	millas cuadradas
micrón, micrones	micrómetro(s), o 1×10^{-6} metros

Tabla de factores de conversión

Multiplique	por	Para obtener	Multiplique	por	Para obtener
acres	1.03	cuerdas	centímetros cuadrados (cm ²)	0.155000	pulgadas cuadradas (pulg ²)
	0.40469	hectáreas	centímetros cúbicos (cm ³)	0.000264	galones (gal)
	4,046.870	metros cuadrados (m ²)		0.061024	pulgadas cúbicas (pulg ³)
acres pies (acres-pies)	1,233.50	metros cúbicos (m ³)	cuerdas	0.97087	acres
	43,560	pies cúbicos (p ³)	hectáreas	2.471027	acres
	0.32583	millón de galones (Mgal)		0.003861	millas cuadradas (mi ²)
cuerda (cd)	0.971	acre	kilómetro (Km)	0.621388	milla (mi)
	3,930	metros cuadrados (m ²)		3,280.84	pies (p)
galones (gal)	3.7854	litro (L)	kilómetros cuadrados (Km ²)	0.38610	millas cuadradas (mi ²)
	3,785.4	centímetros cúbicos (cm ³)	litro (L)	0.26417	galones (gal)
milla (mi)	1,609	metro (m)		0.03531	pies cúbicos (p ³)
	1,609	kilómetro (Km)	metro (m)	3.28084	pies (p)
millas cuadradas (mi ²)	259	hectáreas		39.37008	pulgada (pulg)
	2.59	kilómetros cuadrados (Km ²)	metro por día (m/d)	3.28084	pie por día (p/d)
millón de galones por día (Mgal/d)	0.02832	millones de litros por día	metros cuadrados (m ²)	0.000247	acres
pie por día (p/d)	0.30480	metro por día (m/d)		0.000254	cuerda (cd)
pies (p)	0.30480	metro (m)		10.76426	pies cuadrados (p ²)
pies cúbicos (p ³)	0.02832	metros cúbicos (m ³)	metros cúbicos (m ³)	0.00081	acres pies (acres-pies)
	28.32	litro (L)		35.31073	pies cúbicos (p ³)
pies cúbicos por segundo (p ³ /s)	0.02832	metros cúbicos por segundo (m ³ /s)	metros cúbicos por segundo (m ³ /s)	35.31073	pies cúbicos por segundo (p ³ /s)
	0.64600	millones de galones por día			
pies cuadrados (p ²)	0.09290	metros cuadrados (m ²)	milímetro (mm)	0.03937	pulgada (pulg)
pulgada (pulg)	25.4	milímetro (mm)	millones de litros por día	35.31073	millón de galones por día (Mgal/d)
	0.02540	metro (m)	millón de galones (Mgal)	3.0691	acres pies (acres-pies)
pulgadas cuadradas (pulg ²)	6.45160	centímetros cuadrados (cm ²)	pies cúbicos (p ³)	0.000023	acres pies (acres-pies)
pulgadas cúbicas (pulg ³)	16.38706	centímetros cúbicos (cm ³)			



PLAN INTEGRAL DE RECURSOS DE AGUA

CAPÍTULO 1

Un plan de aguas para Puerto Rico

RESUMEN

Este capítulo presenta el marco conceptual y legal del Plan Integral de Recursos de Agua. En éste también se presentan los objetivos del Plan y se describe el enfoque integral del PIRA, en el cual se incorpora el asunto del efecto potencial del Cambio Climático sobre el recurso agua.

TABLA DE CONTENIDO

1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.2	BASE LEGAL	2
1.2.1	AGUA COMO BIEN DE DOMINIO PÚBLICO	3
1.3	OBJETIVOS GENERALES DEL PLAN DE AGUAS	4
1.4	ENFOQUE	5
1.4.1	PLAN INTEGRAL	5
1.4.2	PLAN SECTORIAL	7
1.4.3	CAMBIO CLIMÁTICO	8
1.4.4	LA CUENCA HIDROGRÁFICA COMO UNIDAD DE PLANIFICACIÓN	8
1.4.5	LAS ESTRATEGIAS	9
1.5	MARCO CONCEPTUAL	10
1.5.1	DESARROLLO SOSTENIBLE	11
	<i>Lograr un uso y aprovechamiento eficiente del recurso</i>	<i>12</i>
	<i>Asegurar el rendimiento e integridad de las fuentes del recurso</i>	<i>12</i>
	<i>Incorporar criterios sostenibles al evaluar nuevas tomas de abasto</i>	<i>14</i>
1.5.2	EL AGUA COMO RECURSO ECONÓMICO Y RECURSO NATURAL	14
1.5.3	AGUA VIRTUAL	15
1.5.4	HUELLA HÍDRICA	16
1.6	ALCANCE	18
1.7	COORDINACIÓN CON OTROS PLANES Y PROGRAMAS	18
	REFERENCIAS	20

1.1 Introducción

El Plan Integral de Recursos de Agua de Puerto Rico (denominado de aquí en adelante como el Plan Integral de Aguas, el Plan o PIRA) es el instrumento mediante el cual se expone la política pública y los objetivos del Gobierno del Estado Libre Asociado de Puerto Rico para proteger, conservar y utilizar efectivamente el recurso agua. En su diseño y desarrollo es medular la participación de las agencias gubernamentales, los diversos grupos de interés y de la ciudadanía en general, para lograr consensos sobre la forma de utilizar los recursos hídricos y convertir los objetivos particulares de este Plan en responsabilidades compartidas de las agencias públicas, el sector privado, grupo de interés, incluyendo los de comunidades y de la ciudadanía en general.

El agua es un recurso natural indispensable para la vida, los ecosistemas naturales y es fundamental para el crecimiento y desarrollo de los pueblos. Por lo que se reconoce que "*La gestión de nuestros recursos hídricos de una manera sostenible y equitativa es fundamental para el sustento de vida, la salud y la dignidad de los pueblos, y constituye una de las bases esenciales de nuestro desarrollo social y económico*"¹. Su distribución espacial y temporal varía: mientras es abundante en unas regiones o épocas, en otras es muy limitado.

A pesar de ser considerado un recurso renovable, su manejo inapropiado puede reducir la cantidad disponible y utilizable del recurso. De igual forma, la contaminación irreversible del recurso puede convertirlo en uno agotable. Es por ello que la disponibilidad, calidad, cantidad y manejo adecuado del recurso representa un gran desafío para Puerto Rico y la mayor parte del mundo.

Por otra parte, el agua es un recurso escaso donde los diversos usuarios compiten por el mismo. Por tanto, se debe asegurar que los recursos hídricos puedan ser asequibles por todos los sectores sociales, económicos y ecológicos de una forma sostenible.² Por esto, la

¹Ibrahim Thiaw Director, División de Aplicación de Políticas Ambientales del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA 2012), Aguas Saludables para el desarrollo Sostenible: Estrategias operativas para el agua dulce (2012-2016).

² <http://www.greenfacts.org/es/glosario/pqrs/sostenibilidad.htm>

optimización del uso y la satisfacción de los objetivos sociales, económicos y ambientales requiere de un análisis integrado.

1.2 Base legal³

La Ley de Aguas de Puerto Rico (Ley Núm. 136 de 3 de junio de 1976, según enmendada) requiere al Estado Libre Asociado de Puerto Rico (ELA), a través del Secretario del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA), *“...preparar, adoptar y mantener un plan integral de conservación, desarrollo y uso de los recursos de agua de Puerto Rico en consulta con el Comité de Recursos de Agua...”*. En específico señala: *“Este plan precisará los usos actuales de los cuerpos de agua del país y proyectará los futuros. En su preparación el Secretario tendrá presente el ciclo hidrológico, así como las necesidades de los sistemas naturales, sociales y económicos que dependen del recurso para su subsistencia y desarrollo”*.

El Departamento de Recursos Naturales y Ambientales es la agencia asignada por esta legislación para planificar y reglamentar el uso y aprovechamiento, conservación y desarrollo de las aguas de Puerto Rico y para implantar la política pública y normas pertinentes a las aguas de la Isla. La Ley de Aguas ordena al DRNA ejercer un papel rector y coordinador de los esfuerzos de la planificación y administración de los recursos de agua. Exige, además, que el DRNA establezca la política pública, el PIRA y la reglamentación requerida para su implantación.

Para el 2003, el DRNA, con la asistencia de la AAA y la AEE, organizó la Oficina del Plan de Aguas (ahora División de Monitoreo del Plan de Aguas) con el objetivo de actualizar el Plan Integral de Aguas de 1996 y adoptar con urgencia medidas y prácticas a corto y largo plazo que permitan optimizar el manejo, conservación y uso prudente del recurso agua. Este esfuerzo incorporó adelantos en la tecnología de informática, particularmente los desarrollos ocurridos en los sistemas de información geográfica. Además, se adoptó un enfoque holístico, se incorporaron las nuevas tendencias observadas en el campo de la planificación

³ Para una referencia abarcadora de las leyes y normativas relacionadas a los recursos de agua véase Apéndice 1.

integral a nivel internacional y se planteó un modelo de desarrollo sostenible aplicado a la planificación y administración del recurso agua. La División de Monitoreo del Plan de Aguas del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales es la unidad responsable del desarrollo, implantación y actualización continua del Plan.

El PIRA ha sido desarrollado a tono con los requisitos esbozados en la Ley de Aguas y su misión debe guiar las actividades de planificación y administración del recurso, según lo dispone la Ley: *“...proteger al país de la escasez, el mal uso, el desperdicio y la contaminación del agua, para así asegurar el abasto de agua que precisen las generaciones puertorriqueñas presentes y futuras”*.

La Ley establece las siguientes metas:

- Conservar las fuentes de abasto de agua para asegurar el bienestar, la seguridad y el desarrollo del País;
- Lograr la distribución más equitativa y justa de las aguas;
- Aprovechar las aguas con arreglo al interés público y a criterios de uso óptimo, beneficioso y razonable;
- Lograr que su aprovechamiento sea compatible con las realidades físico-naturales en que el mismo se encuentra y con las necesidades sociales y económicas del País.

A fin de atender las metas establecidas bajo la Ley de Aguas, el Plan de Aguas se propone cumplir con la siguiente misión: *“Manejar los recursos de agua de Puerto Rico de manera sostenible con el propósito de apoyar el desarrollo económico, garantizar la productividad agrícola, proteger la salud y el bienestar de la población y de los sistemas naturales y elevar el nivel de calidad de vida de los ciudadanos”*.

1.2.1 Agua como bien de dominio público

El agua en Puerto Rico es considerada un bien de dominio público, según lo establece la Ley de Agua en su artículo 4: *“...todas las aguas y cuerpos de agua de Puerto Rico se declaran por la presente propiedad y riqueza del Pueblo de Puerto Rico...”*. Sin embargo, también en el

mismo artículo se comenta que su uso, aprovechamiento y desarrollo estarán sujetos a las disposiciones de la Ley de Aguas y de los reglamentos que se establezcan al amparo de ella. Es por ello, que a pesar de que el agua es de dominio público, el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales tiene la responsabilidad de planificar y administrar el recurso en forma correspondiente con el desarrollo sostenible del País, con el fin de proteger las aguas y asegurar su uso eficiente.

1.3 Objetivos Generales del Plan de Aguas

A partir de la misión propuesta en el Plan, y de acuerdo a las metas establecidas en la Ley de Aguas, se presentan los siguientes objetivos generales:

1. Proteger los recursos de agua de Puerto Rico frente a las adversidades de la escasez, el mal uso, el desperdicio y la contaminación.
2. Lograr que el aprovechamiento del recurso agua sea compatible con las realidades físico-naturales en que el mismo se encuentra y con las necesidades sociales y económicas del país.
3. Promover la protección de los recursos hídricos.
4. Determinar y garantizar la disponibilidad del agua y proteger su calidad.
5. Precisar los usos actuales de los cuerpos de agua del País y proyectar los futuros, teniendo en cuenta el ciclo hidrológico, así como las necesidades de los sistemas naturales, sociales y económicos que dependen del recurso para su subsistencia y desarrollo.
6. Establecer las prioridades de consumo mediante criterios de uso óptimo, beneficioso y razonable de las aguas.
7. Proveer una base para la toma de decisiones y el establecimiento de prioridades en la ejecución de proyectos que beneficien de manera sostenible al recurso hídrico.
8. Proveer continuidad al proceso de planificación y administración del recurso agua.

1.4 Enfoque

La aprobación en 2008 del PIRA y su presente revisión, responde a la necesidad de manejar y administrar este recurso de manera sostenible. El agua es el elemento fundamental para la vida, tanto para el ser humano como para los ecosistemas, la agricultura y las demás actividades económicas. Esta característica, hace de la planificación de este importante recurso una tarea compleja, que requiere la interrelación de diversos actores y sectores. Por esto se hace necesario el analizar y gestionar de forma sostenible el uso de las aguas, tarea que debe ser compartida con organizaciones no gubernamentales y privadas.

El Plan de Aguas está dirigido al desarrollo de estrategias y guías que permitan hacer un uso más eficiente del recurso agua. El desarrollo de las estrategias conlleva una discusión de los aspectos problemáticos más apremiantes que confrontamos en el uso y manejo del mismo, los cuales pueden resumirse como:

1. Ineficiencia (pérdidas) en los sistemas de distribución y uso de los recursos de agua.
2. Pérdidas de fuentes de abastos, ocasionadas por problemas de erosión, sedimentación, por la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas.
3. La degradación de los sistemas naturales.

Por su condición de recurso vital, indispensable para la vida animal y vegetal además de estar vinculado a las actividades de los diversos sectores socio-económicos, se hace necesario que el estado interfiera en la planificación del agua, de forma que los intereses privados particulares no afecten adversamente los de la sociedad en su totalidad. A tales efectos, toda planificación y distribución que se realice del recurso utilizará los criterios establecidos por la Ley de Agua. Primero, que el agua es propiedad y riqueza del pueblo de Puerto Rico. Segundo, que la adjudicación de un caudal limitado o que esté en conflicto de uso, se hará a aquellos usos que resulten más óptimos, beneficiosos y razonables y que mejor satisfaga el interés público.

1.4.1 Plan Integral

El PIRA es un plan integral que contiene dos perspectivas, ambas claves para el manejo del recurso agua. En primer lugar, se analiza el recurso tomando en cuenta las diferentes fases

del ciclo hidrológico, por lo que se ofrecen estrategias que atienden problemas asociados a la escorrentía, cuerpos de aguas superficiales y subterráneos, al igual que para eventos de sequías y eventos de lluvia extremos. Además, se tiene en consideración la interrelación que guardan el agua, el bosque, el suelo y el aire para el diseño de estrategias con el fin de manejar el recurso de manera integral, en lugar de verse como elementos aislados.

En segundo lugar, el PIRA también es integral al incorporar en su elaboración a los diferentes grupos de interés y a las cerca de 15 agencias cuyas jurisdicciones inciden sobre el recurso agua de alguna manera u otra. Es a su vez un plan sectorial ya que el recurso agua, bien de dominio público, es un recurso de valor económico cuya administración y planificación recae en el DRNA tomando en consideración a todos los usuarios del recurso.

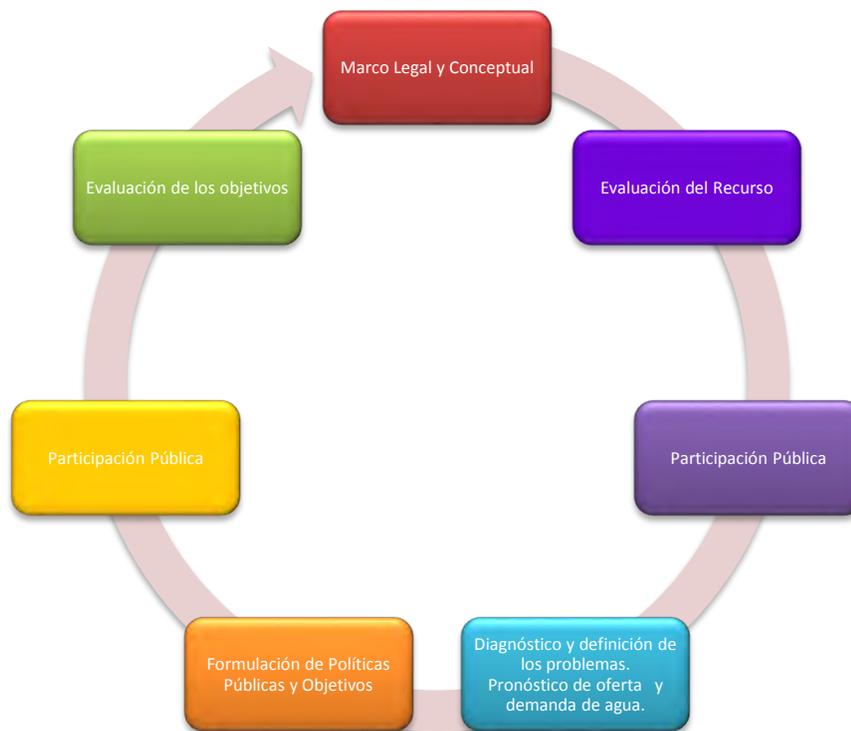


Ilustración 1.1 Diagrama del proceso de planificación integral

La Ilustración 1.1 presenta una visión conceptual de los elementos que configuran el proceso de planificación integral del recurso agua como uno continuo. La evaluación de la condición actual del recurso, es una etapa esencial para la identificación de problemas que luego se llevará a cabo; esto una vez ya se conoce el marco legal vigente. Esto permite conocer la

brecha que se desea corregir, lo que luego lleva a proponer soluciones, políticas públicas y objetivos a base de la información y herramientas de análisis disponibles en un momento dado. Para lograr esta continuidad es necesario elaborar un sistema de evaluación que incluya indicadores cuantificables del logro de los objetivos de planificación. El componente de participación pública es incorporado en instancias claves dentro del proceso de planificación.

El análisis de los elementos que configuran el proceso permite la elaboración de nueve áreas principales de acción sobre las cuales se establecen políticas públicas y objetivos específicos que promueven la solución de los problemas identificados en el Plan. Estos objetivos deben ser cumplidos por las agencias responsables en el periodo de tiempo establecido. Para poder medir los logros alcanzados en cada área principal se establecen indicadores por cada objetivo para medir el desempeño de cada agencia en lograrlos. Para esto, se consideran los siguientes criterios:

1. Racionalidad económica
2. Costo-beneficio social
3. Equilibrio social y territorial
4. Participación social
5. Valores ecológicos
6. Uso eficiente del recurso
7. Cautela y previsión
8. Compatibilidad con marco legal e institucional

El resultado obtenido del proceso de evaluación del recurso hídrico, llevará al replanteamiento de los problemas que enfrenta el mismo. Una vez sean identificados, se elaborarán nuevos objetivos y el proceso cíclico de planificación continuará.

1.4.2 Plan Sectorial

El Artículo 7 de la Ley de Aguas, estipula que el Plan Integral de Recursos de Agua, se considera como un plan sectorial conforme se dispone en la Ley Núm. 75 del 24 de junio de 1975, según enmendada (Ley Orgánica de la Junta de Planificación de Puerto Rico). En esta Ley se contempla que el Plan de Desarrollo Integral de la Junta de Planificación será una guía

para los planes de los organismos gubernamentales, en donde durante el proceso de preparar y adoptar el Plan entre otros, la Junta asesorará, coordinará y asistirá a los distintos organismos gubernamentales y a conjuntos de estos agrupados en sectores en la preparación, adopción e implementación de sus respectivos planes y programas funcionales y sectoriales. Frente a este proceso, actualmente la Junta no tiene adoptado el Plan de Desarrollo Integral, pero recientemente adoptó el Plan de Uso de Terrenos para Puerto Rico.

De lo anterior, el Plan de Uso de Terrenos es la guía para el desarrollo del país. No obstante, se entiende que el agua constituye un elemento central de prioridad para diversos sectores, tales como: salud, educación, agricultura, desarrollo urbano e industrial, entre otros. Por lo tanto, el Plan Integral de Recursos de Agua es un plan sectorial ya que se elaboró tomando en consideración las políticas públicas de desarrollo de los diferentes sectores y establece objetivos para la conservación del recurso agua a mediano y largo plazo, orientando el desarrollo del país.

1.4.3 Cambio climático⁴

Esta nueva versión del PIRA incorpora, de manera más concreta, los efectos que se proyecta tendrá el cambio climático sobre el recurso agua en Puerto Rico. Según el *“U.S. Global Change Research Program, Third National Climate Assessment”* (Melillo, Terese & Yohe, 2014), el cambio climático provocará grandes variaciones en el ciclo hidrológico lo que pudiera reducir, según se pronostica, la disponibilidad del agua, aumentar su demanda y agudizar su escasez.

1.4.4 La cuenca hidrográfica como unidad de planificación

Otra modificación significativa que se hace en esta versión del PIRA, es la de adoptar la cuenca hidrográfica como unidad de planificación del recurso para el desarrollo de proyectos. En las versiones anteriores del PIRA se había utilizado la región, uniendo áreas de servicio de la AAA, como unidad de análisis y planificación en un esfuerzo dirigido a facilitar la coordinación de

⁴ Véase el Capítulo 2 para una discusión a fondo.

planes, programas y proyectos con la AAA, el usuario principal del recurso agua en Puerto Rico. En esta ocasión, reconociendo que el uso de la región no propició la coordinación entre agencias y no responde al comportamiento natural del recurso, por primera vez se hace un esfuerzo formal para establecer la cuenca como la unidad más apropiada para planificar el recurso.

La cuenca hidrográfica permite una interpretación más certera e integrada de las actividades naturales o inducidas por el ser humano que ocurren en ese contexto natural lo que, a su vez, permite conocer sus consecuencias en el sistema hídrico. Igualmente, como marco de análisis, la cuenca provee una mejor base para la planificación, conservación, uso y manejo sostenible del agua.

No obstante, dado que las unidades de planificación socioeconómica y de las agencias de infraestructuras no coinciden con los límites de las cuencas, por lo tanto, el PIRA reconoce el uso de la región de las áreas de servicio de la AAA como parte del análisis de la demanda de agua, de modo que se pueda facilitar la comprensión de las transferencias de agua que realiza la AAA para satisfacer la demanda.

1.4.5 Las estrategias

La complejidad que presenta el manejo del recurso agua, ciertamente dificulta la implantación de alternativas de acción. Es por esto que este Plan, luego de hacer un diagnóstico y análisis de la situación actual, ofrece objetivos de acción específicos, dirigidos a las diferentes agencias con jurisdicción, los cuales sirven como base para el desarrollo de programas o proyectos orientados a solucionar los conflictos, amenazas y deficiencias más apremiantes que afectan el recurso agua.

Estos objetivos y el término brindado para la ejecución de los mismos, se han desarrollado considerando la situación fiscal actual del gobierno de Puerto Rico y de las agencias que intervienen con el uso y manejo del recurso.

Las proyecciones demográficas de la Junta de Planificación (Junta) también se han tomado en cuenta para la preparación de las proyecciones de demanda de uso de agua. Según la Junta de Planificación, las reducciones en población proyectadas para los años 2020 y 2030

representan mermas decenales del 11.4% y 6.1% respectivamente. Esto implica que las inversiones en infraestructura nueva para abasto público deberían ser mucho menores de lo que se pensaba hasta ahora, e incluso elimina la necesidad de construir nuevos embalses. Esta situación ofrecerá la oportunidad de hacer inversiones considerables para el mantenimiento de la infraestructura de abasto ya existente.

En cuanto a las estrategias, el Plan reconoce que su discusión conlleva considerar los aspectos problemáticos más apremiantes en el uso y manejo del agua, los cuales pueden resumirse como sigue:

1. Las pérdidas en los sistemas de distribución de agua potable y de aguas crudas de la AAA que mantienen un valor de Agua No Contabilizada superior al 55%.
2. Manejo de eventos de sequía severa, de mayor intensidad y frecuencia.
3. Degradación de las fuentes de abasto, con énfasis en el deterioro de los acuíferos y manejo de sedimentos en los embalses.
4. Adaptación al cambio climático.
5. Uso y aprovechamiento ineficientes del recurso.
6. Conflictos entre los diferentes usos del recurso.
7. Ausencia de criterios que aseguren el mantenimiento de las funciones ambientales de los sistemas acuáticos.
8. Falta de controles en los usos del terreno.
9. Déficit en la disponibilidad del recurso en zonas particulares.

1.5 Marco Conceptual

En esta sección se abarcarán los diferentes conceptos que proveen dirección a esta versión del Plan. Éstos se utilizan como marco de referencia para que los capítulos del Plan puedan desarrollarse de una manera coherente y que vaya acorde con los asuntos prioritarios

identificados en la Sección 1.6 Alcance de este capítulo. Con éstos se busca que los usos que se le den al recurso agua tengan un enfoque dirigido a la conservación y al uso eficiente, según dicta la Ley de Aguas. De igual manera, estos conceptos nos ayudan a identificar la brecha existente entre la situación actual y la que como pueblo buscamos.

1.5.1 Desarrollo sostenible

El desarrollo sostenible es un concepto que reconoce que una sociedad desarrollada requiere un balance entre los aspectos económicos, sociales y ambientales (véase Ilustración 1.2). Además, este concepto establece un fuerte sentido de justicia intergeneracional⁵. El Plan, por tal razón, se concibe como un instrumento para promover el desarrollo reconociendo la necesidad de un balance entre las actividades del ser humano y la protección del ambiente, satisfaciendo las necesidades de la presente generación y salvaguardando el derecho de las futuras generaciones a lo mismo.



Ilustración 1.2 Valores del desarrollo sostenible

⁵ Desarrollo sostenible: “Es el desarrollo que satisface las necesidades actuales de las personas sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas.” Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (Comisión Brundtland: Nuestro Futuro Común, Oxford University Press, 1987).

La sostenibilidad, en el contexto de la planificación y administración de los recursos de agua, plantea tres ámbitos de acción.

Lograr un uso y aprovechamiento eficiente del recurso

El aprovechamiento eficiente del recurso reduce la necesidad de desarrollar nuevas fuentes de abasto, evitando los costos sociales y ambientales asociados a proyectos de aumento en disponibilidad. Para lograr la sostenibilidad es necesario tener en cuenta, a la hora de desarrollar objetivos que éstos reduzcan las pérdidas en el sistema de distribución de agua potable y de los canales de riego; que incorporen el manejo de la demanda y asignen prioridad al manejo de ésta previo a considerar acciones estructurales para aumentar la oferta.

Asegurar el rendimiento e integridad de las fuentes del recurso

Los usos del agua deben garantizar que la misma, al devolverse al ecosistema, sea de una calidad y características físicas que no interfiera con otros usos aguas abajo del lugar donde ocurre la actividad. Los niveles de concentración de contaminantes y la adecuación del sistema para sostener la vida acuática son elementos claves a considerar en la planificación de estos usos.

En cuanto a los usos de naturaleza extractiva, se debe asegurar que la explotación del recurso no produzca un deterioro que limite su disponibilidad futura. La sobreexplotación de acuíferos costeros, por ejemplo, puede provocar un proceso de intrusión salina que podría inhabilitar los mismos de forma permanente. La alta tasa de generación de sedimentos en las cuencas y la falta de manejo adecuado de los sedimentos atrapados en los embalses, reducen significativamente la capacidad de almacenamiento de éstos, reduciendo así la oferta de agua en eventos de sequía.

Por otra parte, la extracción de agua de fuentes superficiales debe proveer para mantener en el cauce de los ríos y sus estuarios una cantidad y calidad adecuada de agua para sostener la vida acuática existente, así como para los demás usos y aprovechamientos de estas aguas que generan beneficios sociales y ambientales aguas abajo. También es necesario asegurar que las intervenciones en los cuerpos de agua no destruyan los hábitats ni interfieran con

las migraciones entre río y estuario que las especies requieren para completar su ciclo de vida.

Asegurar el rendimiento e integridad de las fuentes de agua superficial y subterránea será un reto aún mayor ante el panorama de cambio climático que tenemos ante nosotros. Se prevé que los eventos de sequía serán más extensos y recurrentes, los eventos de inundación más severos y constantes. Es posible el deterioro de los acuíferos con el aumento del nivel del mar y la destrucción de hábitats críticos para flora y fauna en áreas cercanas a la costa como son los humedales, estuarios, pantanos, lagunas, entre otros; por lo que es necesario estudiar y estar atentos a estos asuntos.

Los embalses constituyen la fuente principal de abasto de agua en Puerto Rico (328.39 MGD para abasto de agua potable y 15.7 MGD para riego agrícola, según Molina (2010)). Muchos de éstos presentan problemas de disminución en su capacidad de almacenaje debido a la sedimentación lo cual limita su rendimiento. Para lograr que estas fuentes estén disponibles para satisfacer las necesidades de las generaciones futuras será necesario realizar acciones que aseguren su mantenimiento y funcionalidad. En esta dirección, el diseño y operación de mecanismos para minimizar la acumulación de sedimentos y reducir la necesidad de dragados, el proveer opciones adecuadas a largo plazo para disponer de los sedimentos dragados y la implantación de mecanismos de manejo de suelos que disminuyan la generación de sedimentos hacia los cuerpos de agua, son acciones que deben evaluarse para mantener el rendimiento seguro de los embalses y aumentar la vida útil de éstos.

Los usos de terrenos pueden impactar tanto la calidad como la disponibilidad de los recursos de agua. Los residuos sólidos y líquidos, cuya disposición y manejo hayan sido inadecuados, eventualmente entrarán en contacto con el agua y producirán contaminación, ya sea en las aguas superficiales o en las subterráneas. El movimiento de terrenos asociado a las actividades de la construcción y la agricultura se convierte en fuente de sedimentos que discurrirán a través de la cuenca hasta llegar a ríos y embalses. El desparrame urbano y su infraestructura asociada aumenta la impermeabilización de terrenos afectando las zonas de recarga de acuíferos y provocando un aumento en la escorrentía pluvial. Esta situación disminuye el rendimiento de los acuíferos y los flujos mínimos de los ríos durante el estiaje, a la vez que acelera la tasa de erosión de los cauces durante las crecidas. El desarrollo de

planes de manejo de cuencas que incorporen medidas no estructurales, tales como la designación de áreas de valor hidrológico para la protección del recurso, y medidas como el diseño de estructuras para minimizar la erosión y promover la recarga, se ubican en el contexto de la sostenibilidad.

Incorporar criterios sostenibles al evaluar nuevas tomas de abasto

En el desarrollo de nuevas tomas de aguas superficiales, resulta crítico asegurar que su diseño permita minimizar los problemas que limitan su sostenibilidad. La explotación de aguas subterráneas debe responder a la política pública de uso y aprovechamiento sostenible de los acuíferos para evitar que éstos se degraden o reduzcan su volumen.

Las tomas de agua superficiales, deben asegurar un caudal ambiental para mantener las funciones ecológicas de los cuerpos de agua. Su diseño debe minimizar el impacto sobre los hábitats y patrones migratorios de especies aguas abajo, así como reducir el efecto sobre el transporte de sedimentos gruesos, las arenas y gravas necesarios para mantener el lecho del río, y el equilibrio dinámico de los llanos y el litoral costero.

1.5.2 El agua como recurso económico y recurso natural

De acuerdo a uno de los principios de Dublín, dentro del marco de la Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente celebrada en dicha ciudad en 1992, *“El agua tiene un valor económico en todos sus diversos usos en competencia a los que se destina y debería reconocérsele como un bien económico”*. Esta declaración ha incidido para ser considerada como fundamental por los que formulan política pública y para la toma de decisiones de algunos países que argumentan su validez en el manejo del agua como bien económico. Sin embargo, también se entiende que el agua es indispensable para la vida, la salud, la educación, el medio ambiente sano, entre otras, siendo esto reconocido en otro principio de Dublín: *“El agua dulce es un recurso finito y vulnerable, esencial para sostener la vida, el desarrollo y el medio ambiente”*. Esta dualidad en las funciones del agua se ha encargado de aumentar la brecha sobre el manejo de la misma, con la balanza inclinada hacia la consideración de que el agua es un bien económico por encima de un derecho fundamental como recurso natural para la vida (Guerrero et al, 2012). En la Encuesta Anual sobre Riesgos Globales del Fórum Económico Mundial (WEF, 2014) el agua aparece como la tercera mayor

preocupación que tienen los grupos de poder económico en el globo. Otro dato interesante es las declaraciones del presidente de la compañía Nestlé al *Financial Times* en julio de 2014 en las que éste afirmaba que "Más urgente que el cambio climático es la escasez de agua".

Es claro que el paradigma del agua como bien económico es el que domina algunas regiones del mundo y que históricamente se ha tratado así, pues durante los últimos años *"las actividades del sector público vinculadas a hidroeléctricas y en parte a servicios de agua potable y saneamiento fueron transferidas en varios países a la actividad privada"* (Guerrero et al., 2012). Sin embargo, Puerto Rico tiene una ventaja ante este paradigma: el estado es el que tiene la responsabilidad de la gobernabilidad y el control sobre los actores que inciden en el manejo y uso del agua. Una muestra evidente es el Plan adoptado en el 2008 por el DRNA como mecanismo para dirigir el uso del agua en forma que promueva el desarrollo sostenible de los recursos hídricos, siguiendo los objetivos y metas de la Ley de Aguas para tal fin.

Por lo tanto, es importante la adopción e implantación del PIRA como herramienta que persigue brindar dirección sobre el manejo coherente del recurso agua mediante el desarrollo e implementación de objetivos de acción medibles a ser realizados por los diferentes sectores. Se debe tener presente que el agua no solo es un elemento vital, sino que es también un recurso natural y bien de dominio público (por lo que no es inalienable), antes que un bien o recurso económico.

1.5.3 Agua Virtual

El Agua Virtual se define como la cantidad de agua utilizada durante el proceso de producción de un bien o servicio (Chapagain & Hoekstra, 2004). A partir de este concepto se entiende que la globalización de los mercados está redistribuyendo los recursos hídricos por medio del comercio. Esto significa, que cuando dos regiones geográficas intercambian productos, también intercambian agua virtual (Ojeda, 2014).

En Puerto Rico se importa sobre el 80% de los productos y bienes de consumo, tan básicos como los alimentos y la ropa. Dado este hecho, se puede plantear que el consumo de agua virtual en Puerto Rico está sobre externalizado a los países donde se producen los productos y bienes importados. Por lo tanto, se puede inferir que la medida de los usos directos del

agua en Puerto Rico no representa la cantidad real de agua necesaria para cubrir las necesidades básicas (Ojeda, 2014).

1.5.4 Huella Hídrica

El concepto de huella hídrica no es nuevo (Hoekstra, 2002). Sin embargo, pocos gobiernos y organizaciones lo han implementado en la práctica. *“El interés por la huella hídrica se origina en el reconocimiento de que los impactos humanos en los sistemas hídricos pueden estar relacionados, en última instancia, al consumo humano y que temas como la escasez o contaminación del agua pueden ser mejor entendidos y gestionados considerando la producción y cadenas de distribución en su totalidad”* señala el Dr. Arjen Y. Hoekstra, profesor y creador del concepto de la huella hídrica. Señala también que *“Los problemas hídricos están a menudo íntimamente relacionados con la estructura de la economía mundial. Muchos países han externalizado significativamente su huella hídrica al importar bienes de otros lugares donde requieren un alto contenido de agua para su producción. Este hecho genera una importante presión en los recursos hídricos en las regiones exportadoras, donde muy a menudo existe una carencia de mecanismos para una buena gobernanza y conservación de los recursos hídricos. No solo los gobiernos, sino que también los consumidores, comercios y la sociedad en general pueden jugar un papel importante para alcanzar una mejor gestión de los recursos hídricos.*

La huella hídrica de un país se definió inicialmente como el volumen total de agua que se utiliza para producir los bienes y servicios consumidos por sus habitantes. (Hoekstra y Hung, 2002). En el 2014, la Organización Internacional de Normalización (ISO⁶ por sus siglas en inglés) la define como una *“métrica que cuantifica los impactos ambientales potenciales relacionados con el agua o también como el volumen total de agua dulce usado para producir los bienes y servicios producidos por una empresa, o consumidos por un individuo o*

⁶ ISO, las siglas de “International Organization for Standardization”, que significa la Organización Internacional de Normalización. Es una organización para la creación de estándares internacionales compuesto por la federación mundial de las organizaciones nacionales de estandarización de empresas. En el 2014 Crea una Norma Internacional para el uso de la Huella Hídrica como indicador del buen uso del agua (14046:2014 - Gestión Ambiental - Huella Hídrica - Principios, requisitos y directrices).

comunidad.” De acuerdo a ISO, la huella hídrica se puede calcular para cualquier grupo definido de consumidores (por ejemplo, individuos, familias, pueblos, ciudades, estados o naciones) o productores (por ejemplo, organismos públicos, empresas privadas o el sector económico). La huella de agua es un indicador geográfico explícito, que no solo muestra volúmenes de uso y contaminación de agua, sino también las ubicaciones. (Hoekstra, AY y Chapagain, A.K., 2008). Sin embargo, señala ISO que la huella hídrica no proporciona información sobre cómo el agua consumida afecta positiva o negativamente a los recursos locales de agua, los ecosistemas y los medios de subsistencia.

El concepto de huella hídrica puede ayudar a cuantificar las necesidades socioeconómicas y ambientales del agua de bienes y servicios producidos localmente y de los bienes y servicios importados. También permite cuantificar el efecto, en términos de recursos de agua, que tendrían políticas de reducción de importaciones y de aumento en exportaciones. Un aspecto relevante para Puerto Rico, es que la huella hídrica no incluye el agua que consume la producción de productos y servicios que se exportan, que puede ser un volumen de agua significativo.

A partir de la metodología desarrollada por Hoekstra en 2002 se han desarrollado otros métodos que evalúan la disponibilidad hídrica y/o la degradación hídrica mediante diversos índices (Pfister et al, 2009; Boulay et al., 2011; Hoekstra et al., 2011). Mediante la huella hídrica es posible evaluar los impactos ambientales, sociales y económicos que implica el consumo de esta agua (Hoekstra et al., 2011). No obstante, el creador del método reconoce que éste tiene limitaciones, por ejemplo, no considera las inundaciones o la falta de infraestructura hídrica (Hoekstra et al., 2011). Por lo tanto, aunque es una buena herramienta, esta necesita ser complementada por otros indicadores para contar con todas las variables necesarias y estar bien informado al momento de toma de decisiones. La fortaleza principal de esta herramienta es que hace posible mostrar la importancia de los patrones de consumo y dimensiones globales de la gobernabilidad del agua ⁷.

⁷ <http://www.aquaknow.net/en/system/files/Indicator%20Water%20Footprint%20for%20the%20EU28.pdf#ECOIND1359>

1.6 Alcance

Los esfuerzos de este Plan van dirigidos a proteger al País de la escasez y el mal uso del agua. Para ello es necesario desarrollar proyectos diversos conformes a lo que dicta la Ley de Aguas. Pretende asegurar el más eficiente uso del recurso agua por todos los usuarios de éste. Con dicho propósito se les dará prioridad a los siguientes asuntos:

1. tomar medidas para adaptación al cambio climático.
2. resolver los conflictos por el uso y aprovechamiento del recurso,
3. asegurar el abasto necesario para las reservas agrícolas,
4. ayudar a la conservación de los recursos naturales y de los cuerpos de agua en particular,
5. garantizar la disponibilidad de fuentes de agua para las generaciones futuras

Es necesario señalar que el Plan orienta y establece la política pública para la toma de decisiones sobre la solución de los problemas que afectan el recurso. El Plan no es un documento estático, es un documento sujeto a evaluación periódica (cada 5 años) con el propósito de ajustarlo a los nuevos cambios sociales y económicos y a la información recopilada mediante nuevas herramientas de análisis y adelantos en la tecnología. Además, se evaluarán anualmente los objetivos y el progreso de los proyectos plasmados en el Capítulo 6, según se establece en la Ley 6 de 8 de febrero de 2016.

1.7 Coordinación con otros planes y programas⁸

La elaboración del Plan Integral de Aguas ocurre en el contexto de otros esfuerzos de planificación gubernamental en áreas relacionadas y con incidencia en los recursos de agua.

⁸ Para obtener mayor información sobre la base legal de estos planes y cómo los mismos inciden y se relacionan con el PIRA favor de referirse al Apéndice 1.

En cada una de estas instancias se ha establecido comunicación y se compartieron datos, metodologías y resultados de análisis técnicos. Entre estos esfuerzos se encuentran los siguientes:

1. Plan de Uso de Terrenos 2015, Junta de Planificación de Puerto Rico
2. Plan Estratégico 2014-2018 de AAA
3. Plan Estratégico de la AEE
4. Plan de Seguridad Alimentaria para Puerto Rico, Departamento de Agricultura

REFERENCIAS

Boulay, A.-M.; Bulle, C.; Deschênes, L. y Margni, M. (2011). LCA Characterization of freshwater use on human health and through compensation. En: Finkbeiner, M.[Ed] *Towards life cycle sustainability*. Springer Science.

Chapagain, A.K. & Hoekstra, A.Y. (2004). *Water footprints of nations*. Value of Water Report Series No. 16, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands. Obtenida el 01 de junio del 2014 (On-line) <http://www.waterfootprint.org/>

Comité Técnico del Global Water Partnership con la colaboración del Ministerio de Asuntos Exteriores de Noruega. (2005). *Estimulando el cambio: Un manual para el desarrollo de estrategias de gestión integrada de recursos hídricos y de optimización del agua*. Elanders. p.6

Dourojeanni, A. (2002). *¿Quién gobierna a quien en la gestión del agua?* Santiago de Chile: División de Recursos Naturales e Infraestructura/ Cepal.

Clark, Pilita. "Nestlé warns water scarcity "more urgent" than climate change". Financial Times digital. 14 de julio de 2014 (Obtenido el 9 de enero de 2016) (<http://www.ft.com/intl/cms/s/0/c8d19bc6-0b49-11e4-ae6b-00144feabdc0.html>)

Guerrero, N.S., Gil, G.J., Ruiz, D.N.,& Bernardo C.L (2012). *Los colores del agua, agua virtual y la huella hídrica conceptos para el desarrollo sostenible del recurso hídrico*. Slideshare. Obtenida el 01 de junio del 2014 (On-line) <http://www.slideshare.net/yuli27g/los-colores-del-agua-el-agua-virtual-y-la-huella-hdrica-conceptos-para-el-desarrollo-sostenible-del-recurso-hdrico>

Harlem Brundtland. Gro. (1987). *Our Common Future: From One Earth to One World*. New York, Oxford University Press.

Hoekstra, A.Y. y Hung, P.Q. (2002). Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. UNESCO-IHE, *Value of Water, Research Report Series, 11*.

Hoekstra, AY y Chapagain, A.K. (2008) *La globalización de agua: Compartir los recursos de agua dulce del planeta*, Blackwell Publishing, Oxford, Reino Unido *Water Research Report Series, 11*.

Hoekstra, A.Y.; Chapagain, A.K.; Aldaya, M.M. y Mekonnen, M.M. (2011). *The Water Footprint assessment manual*. Ed. Earthscan, Obtenido en enero 2016.

<http://waterfootprint.org/en/resources/publications/water-footprint-assessment-manual-global-standard/>.

Melillo, Jerry M., Terese, Richmond, & Yohe, Gary. (Eds.). (2014). *Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment*. U.S. Global Change Research Program, 841 pp. doi:10.7930/J0Z31WJ2

Molina-Rivera, W.L. (2010). *Estimated water use in Puerto Rico*. U.S. Geological Survey Open-File Report, __ p.

Naciones Unidas – Agua. (2015). *Informe de las Naciones Unidas sobre los Recursos Hídricos en el Mundo 2015: Agua para un Mundo Sostenible*. UNESCO. p. 2 y 6

Pfister, S.; Koehler, A. y Hellweg, S. (2009). Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA. *Environmental Science Technology*, 43 (11): 4098-4104. DOI: 10.1021/es802423e

Ojeda, M (2014). *Agua Virtual en Puerto Rico*. Pensar Urbano. Obtenida el 19 de mayo del 2014. (On-line) <http://pensarurbano.com/2014/03/20/agua-virtual-en-puerto-rico/>



PLAN INTEGRAL DE RECURSOS DE AGUA

CAPÍTULO 2

El Cambio Climático: desafío y riesgos

RESUMEN

Ante los posibles escenarios que plantea el cambio climático, resulta imperativo recopilar la información científica acumulada hasta el presente, para evaluar sus efectos sobre el recurso agua e incorporarlos en las estrategias de este Plan Integral. La adaptación al cambio climático es urgente y necesaria para Puerto Rico.

TABLA DE CONTENIDO

2.1	Introducción	1
2.2	Aumento en las temperaturas	7
2.3	Cambio en los patrones de precipitación.....	12
2.4	Aumento del nivel del mar.....	20
2.5	Eventos climatológicos extremos.....	24
2.5	Consecuencias.....	28

2.1 Introducción

El cambio climático representa uno de los retos más apremiantes que la generación presente debe enfrentar. Existe un consenso entre la comunidad científica internacional y el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) apuntando a las actividades humanas como las principales causantes de estos cambios en el clima global (Cook et al., 2013). El aumento drástico en las concentraciones de gases de efecto de invernadero (GEI) en las capas de la atmósfera ha propiciado un aumento exacerbado de la temperatura promedio del Planeta, alterando los ciclos y patrones climáticos registrados y observados en diversas zonas del mundo. Las evidencias del calentamiento de la Tierra proceden de múltiples indicadores climáticos independientes, desde lo más alto de la atmósfera hasta las mayores profundidades del océano. Cabe mencionar, entre otros, los incrementos de las temperaturas: en la superficie terráquea, en la atmósfera y las de los océanos, así como los cambios en los glaciares (deshielo), la cubierta de nieve (derretimiento), el hielo marino (deshielo), el nivel del mar (aumento) y el vapor de agua atmosférico (incremento). Dichas alteraciones y cambios ya están generando transformaciones y efectos en las actividades humanas, así como en nuestro entorno físico natural, incluyendo las condiciones de nuestros recursos naturales biológicos (IPCC, 2014).

Esta versión revisada del Plan Integral de Recursos de Agua incorpora, de manera más amplia, los efectos que tendrá el cambio climático sobre el recurso agua. Este capítulo integra la mejor información científica y técnica disponible asociada al cambio climático y sus impactos para con el agua en Puerto Rico, en aras de enriquecer el proceso de planificación enmarcado en un enfoque integral para el manejo del recurso. Se reconoce que las manifestaciones de los cambios en los patrones climatológicos abarcarán la totalidad de los sistemas naturales y, por tanto, sus impactos sociales y económicos serán de distintos niveles. Frente a esta realidad se vuelve imperativo estudiar, investigar y analizar información que permitan tomar las acciones necesarias para aumentar la resiliencia de la población y sistemas naturales del País. Para efectos de este Plan, el enfoque principal de este capítulo se centra en comprender las manifestaciones del cambio climático y atender los efectos y las circunstancias asociadas al manejo y conservación del recurso agua en Puerto Rico, para su integración en la generación de estrategias, proyectos y acciones de manejo que provean respuestas a los retos presentes y futuros asociados recurso agua.

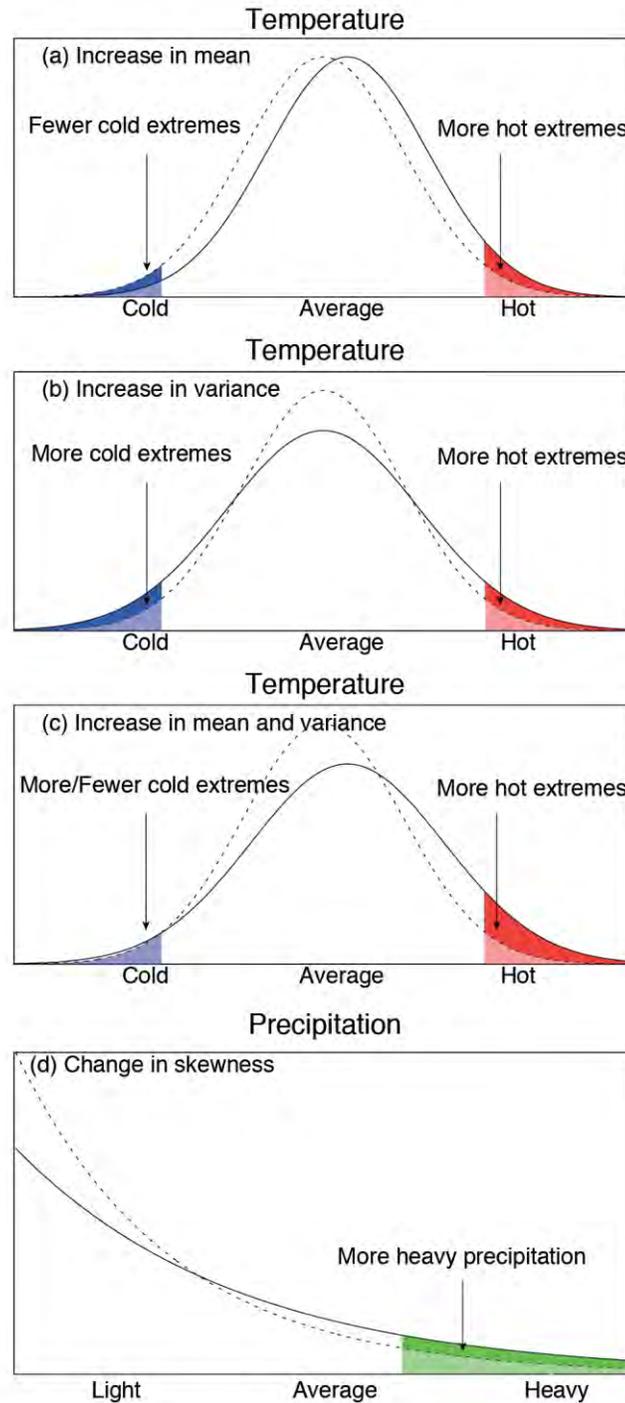
Para entrar a discutir el tema, es importante establecer las relaciones existentes entre lo que conocemos como cambio climático, variabilidad climática y los eventos extremos. De igual forma, se precisa discutir brevemente los diversos escenarios climáticos que permiten analizar las proyecciones de los cambios climáticos hacia el futuro, con el fin de entender de una manera más amplia el origen de las alteraciones del recurso agua en un territorio insular caribeño como Puerto Rico.

La descripción más general y amplia del concepto de cambio climático se refiere a las transformaciones en los patrones climatológicos observados en el planeta. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su Artículo 1, define el Cambio Climático como *“cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”* (CMNUCC, 1992). La CMNUCC diferencia, pues, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y los cambios atribuibles a causas naturales (IPCC, 2014). El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropogénicos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo.

El cambio climático puede tener variaciones en múltiples escalas espaciales y temporales, representando amenazas naturales, como inundaciones, alza sostenida en el nivel del mar, olas de frío o calor, tormentas más intensas, sequías, entre otras. También, puede implicar la alteración del equilibrio ecológico.

El concepto de variabilidad climática denota las variaciones del estado medio y otras características estadísticas (desviación típica, sucesos extremos, etc.) del clima, en todas las escalas espaciales y temporales más amplias que las de los fenómenos meteorológicos (véase Gráfica 2.1). La variabilidad puede deberse a procesos internos naturales del sistema climático (variabilidad interna) o a variaciones del forzamiento externo natural o antropogénico (variabilidad externa) (IPCC, 2012). La variabilidad climática suele darse cíclicamente y depende, también, de factores relacionados con la estacionalidad, ondas que se presentan varias veces al año y fenómenos que suceden aproximadamente cada cierto número de años. Resulta importante destacar, como, a medida que se altera o cambian los

patrones del clima, ocurren transformaciones en la variabilidad climática, alterando la recurrencia e intensidad de eventos extremos de temperatura y precipitación.



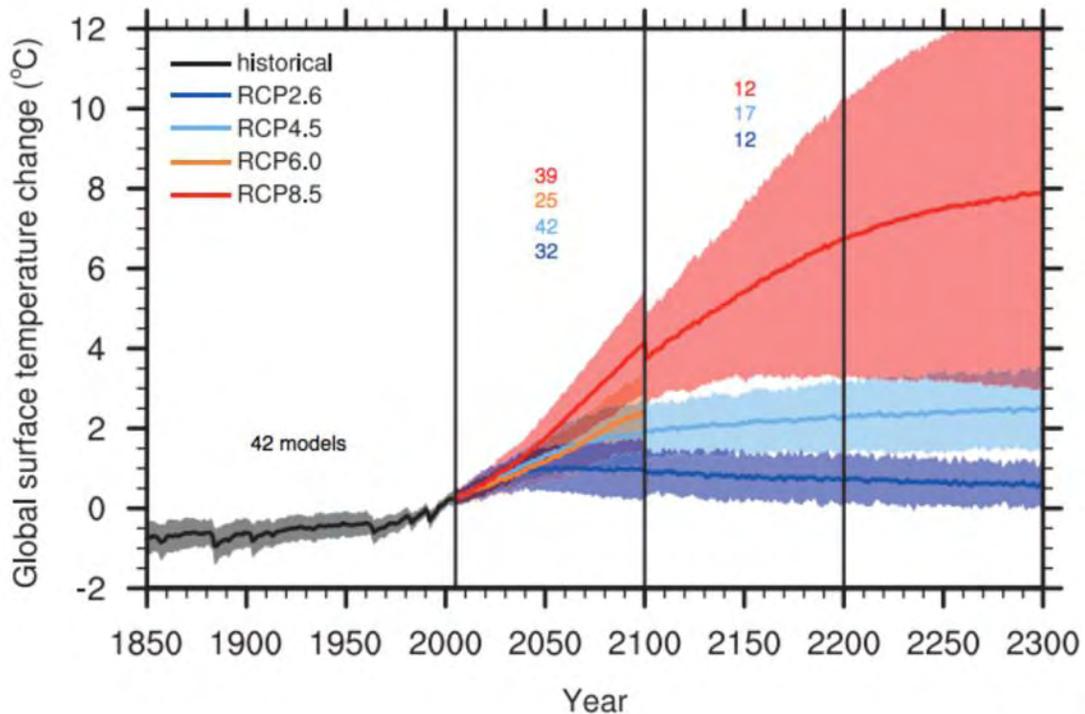
Gráfica 2.1 Variabilidad climática en temperatura y precipitación (IPCC, 2012).

Según diversos estudios (Melillo, Terese y Yohe, 2014; Henareh Khalyani, et. al. 2016; Van Beusekom, et. al., 2015), el cambio climático provocará variaciones en el ciclo hidrológico en Puerto Rico, lo que pudiera reducir y hasta agudizar, en algunas regiones, la disponibilidad del agua y en algunos casos aumentar su demanda. Es decir, los recursos de agua en la Isla serían afectados a consecuencia del cambio climático. Los efectos que tendrá sobre el ciclo hidrológico dependerá en gran medida de la razón de cambio que se observe en las próximas décadas como consecuencia de las acciones o inacciones que se tomen para reducir las emisiones globales de GEI a la atmósfera. Una de las herramientas que permite comprender mejor las posibles manifestaciones de estos eventos es la generación de escenarios futuros de cambio climático.

A nivel mundial, hay diversos esfuerzos dirigidos a estudiar los posibles cambios en el clima, especialmente futuros escenarios en las precipitaciones y temperaturas, con el fin de estimar posibles impactos a nivel social, económico y ambiental. Al presente, la comunidad internacional ha generado cuatro escenarios que permiten establecer posibles futuros asociados al clima del planeta, conocidos como los *Representative Concentration Pathways o RCP* (van Vuuren et al. 2011). Estos escenarios formulan sus resultados en complejos modelajes matemáticos estableciendo diferencias en el forzamiento radiativo (radiative forcing), la cual mide el cambio en el balance de radiación (energía) en el clima ya sea causado por radiación solar, así como por la absorción de energía de GEI. A su vez, estos escenarios contemplan diferencias en las actividades humanas y sus implicaciones para la liberación de GEI a la atmósfera durante las próximas décadas, tomando en consideración variaciones en el crecimiento poblacional, uso de recursos naturales, patrones de usos de terrenos y acceso a tecnología (van Vuuren et al., 2011). Los cuatro escenarios se clasifican según la razón de irradiación neta vertical estimada hacia el año 2100, medido en Vatios (“Watts”) por metro cuadrado (Wm^{-2}): 8.5, 6.0, 4.5 y 2.6. Según los escenarios climáticos basados en los RCP’s, a mayor forzamiento radiativo (RCP 6.0 o RCP 8.5) se observará un mayor calentamiento global, así como un aumento en el nivel del mar y a su vez, serán mayores los efectos esperados del cambio climático sobre el planeta (ver Gráfica 2.2).

Los escenarios climáticos presentados en los RCP’s denotan una tendencia hacia el aumento en la temperatura superficial y de los océanos, igualmente en el aumento en el nivel promedio del mar, así quedan recogidas en los informes más recientes del IPCC (van Vuuren et al. 2011; Collins et al., 2013). Las diferencias estriban en la magnitud de dichos

incrementos, para los cuales la concentración global de GEI tendrá un rol decisivo en el mismo. El escenario RCP 2.6, el cual contempla un forzamiento radiativo medio de 2.6 Wm^{-2} al 2100, contempla un aumento en las temperaturas promedio de alrededor de 1°C , donde las concentraciones de dióxido de carbono (CO_2) atmosféricas se encuentren en 490 partes por millón (ppm) para dicho año. A su vez, el escenario RCP 4.5 (4.5 Wm^{-2}) proyecta un aumento de 1.8°C en las temperaturas promedio, asumiendo unas concentraciones de CO_2 en 690 ppm hacia el 2100. Otro escenario intermedio, el RCP 6.0, proyecta un aumento en las temperaturas cercano a los 2.5°C , con concentraciones de CO_2 de 850 ppm. El escenario que asume un nivel alto de emisiones, RCP 8.5 (8.5 Wm^{-2}), proyecta un aumento de 4°C en las temperaturas superficiales del planeta, bajo unas concentraciones de CO_2 de 1,370 ppm. Vale la pena destacar que al final del año 2015 las emisiones globales del GEI elevaron las concentraciones de CO_2 a 400.38 ppm (Dlugokencky y Tans, 2015), con un aumento en las temperaturas promedio de sobre 0.87°C al 2100. (GISSTEMP Team, 2015).



Gráfica 2.2 Proyecciones de aumento en temperatura según los escenarios de RCP's (Collins et al., 2013).

El uso de diversos escenarios al momento de analizar y evaluar los impactos del cambio climático fortalece el desarrollo de alternativas y estrategias de acción, reconociendo las incertidumbres inherentes a los modelajes climatológicos, así como a los procesos de

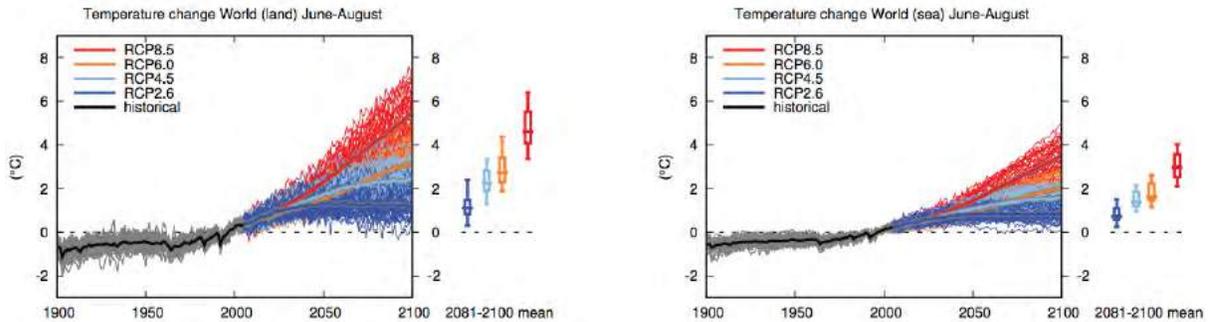
planificación proyectados hacia el futuro. Mediante estos escenarios, es posible comprender mejor las implicaciones que las acciones -o inacciones- de las naciones tendrán en el comportamiento de los futuros patrones climáticos del planeta. Los datos e información que brindan los diversos escenarios climáticos son los que permiten proyectar mejor cuáles serán los cambios en los comportamientos climatológicos que podemos esperar en las próximas décadas, integrando nuestras emisiones globales de GEI y patrones de uso de terrenos, para así identificar mejor las consecuencias de los mismos, tanto a nivel global como en Puerto Rico.

En abril de 2016, sobre 185 naciones del mundo firmaron el Acuerdo de París (United Nations, 2015), donde cada nación se compromete a realizar acciones dirigidas a reducir las emisiones de GEI para evitar un aumento en las temperaturas promedio de entre 1.5° y 2°C, de forma que se pueda reducir los impactos adversos del cambio climático sobre las naciones y sus ecosistemas. Sin embargo, es la opinión de algunos expertos que los compromisos expuestos en el acuerdo de París para la reducción de emisiones de GEI tendrán como resultado un aumento en las temperaturas cercano a los 3°C (Boyd et al., 2015), lo cual dista mucho de las intenciones propuestas y con severas implicaciones para territorios vulnerables y en riesgo como Puerto Rico. Dicho de otra forma, aspiramos a un mundo cercano al representado en el escenario climático RCP 4.5, cuando el conjunto de acciones presentes para enfrentar el cambio climático nos acerca al escenario climático del RCP 8.5. Esto nos lleva a considerar el uso de los escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5 como base para comprender mejor los impactos potenciales asociados al cambio climático en las próximas décadas.

Ante los retos que plantean las consecuencias del Cambio Climático, particularmente en cuanto al aumento en las temperaturas, los cambios en los patrones de precipitación, el aumento en el nivel promedio del mar y los eventos climatológicos extremos, resulta imperativo incorporar la información científica acumulada hasta el presente, evaluar sus posibles efectos globales y locales e incorporarlos a las estrategias del presente Plan Integral de Recursos de Aguas.

2.2 Aumento en las temperaturas

Las tendencias observadas y las proyecciones basadas en los diferentes escenarios climáticos apuntan a un aumento general en las temperaturas medias tanto en la superficie terrestre como en los océanos (Collins et. al., 2013) (ver Gráfica 2.3). Aun cuando los cambios más significativos se proyectan para las regiones de latitudes medianas y altas, la región del Caribe se espera que continúe registrando un aumento progresivo en sus temperaturas medias en la superficie terrestre así como en el mar.



Gráfica 2.3 Proyecciones de cambios en temperatura globales, 1900-2100 (van Oldenberg et al., 2013).

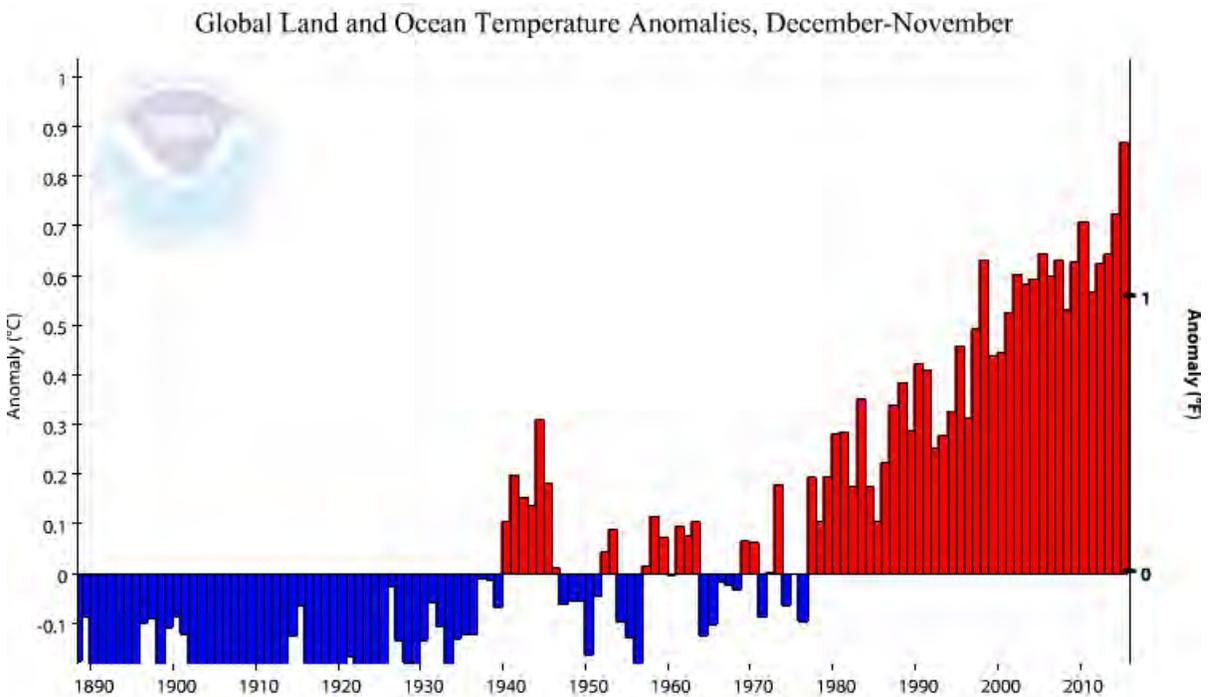
Referente a los extremos de temperatura, los modelos proyectan un calentamiento sustancial hacia finales del siglo 21. Según el IPCC, es prácticamente seguro que se produzcan aumentos en la frecuencia y magnitud de valores extremos de temperaturas cálidas y una disminución de extremos fríos a nivel mundial durante el siglo 21.

Por su parte, la Sociedad Americana de Meteorología indica en su último informe que desde 1997 se han sucedido 17 de los 18 años más cálidos en el planeta (Blunden y Arndt, 2015). Cabe destacar que el año 2015 se ha perfilado como el año con las temperaturas medias registradas más altas a nivel mundial dentro de los registros observados, con 0.87°C por encima del promedio global (ver Gráficas 2.4 y 2.5). Es importante destacar además que Puerto Rico registró durante el 2015 un aumento de 0.77°C en la temperatura promedio comparada con el promedio entre 1981 y 2010 (Martínez, 2015).

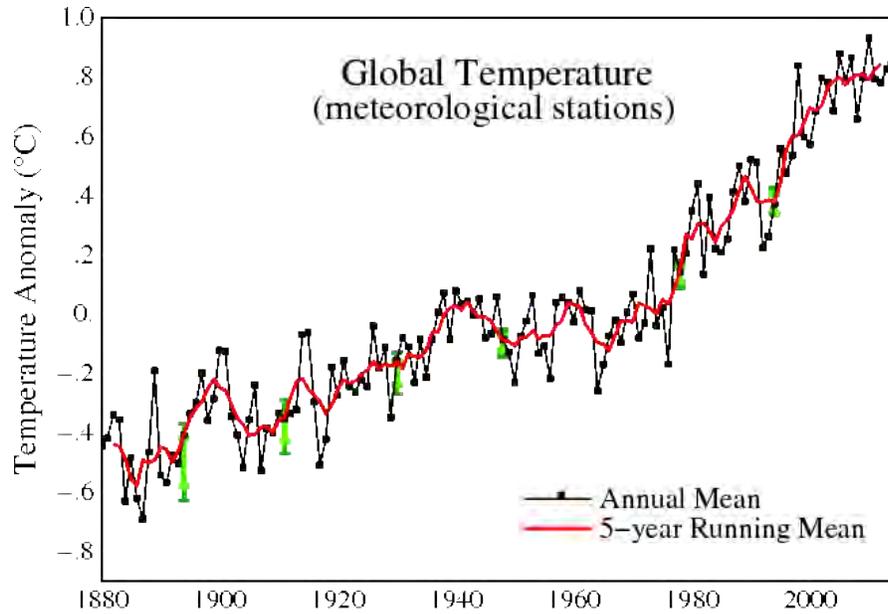
Las estaciones meteorológicas en Puerto Rico demuestran aumentos significativos en promedios anuales y mensuales de la temperatura, con un incremento de 0.012°C/año a 0.014°C/año (0.022 a 0.025°F/año) entre 1900 y el 2013. Algunas áreas se están calentando más rápido, como es el caso de San Juan con un incremento de 0.022°C/año (0.04°F/año)

desde 1900. De continuar esta tendencia, las temperaturas promedio para San Juan al 2050 habrán incrementado a 27°C/año (80.6°F) de 25.5 °C (77.9 °F) en 1950 (PRCCC, 2013).

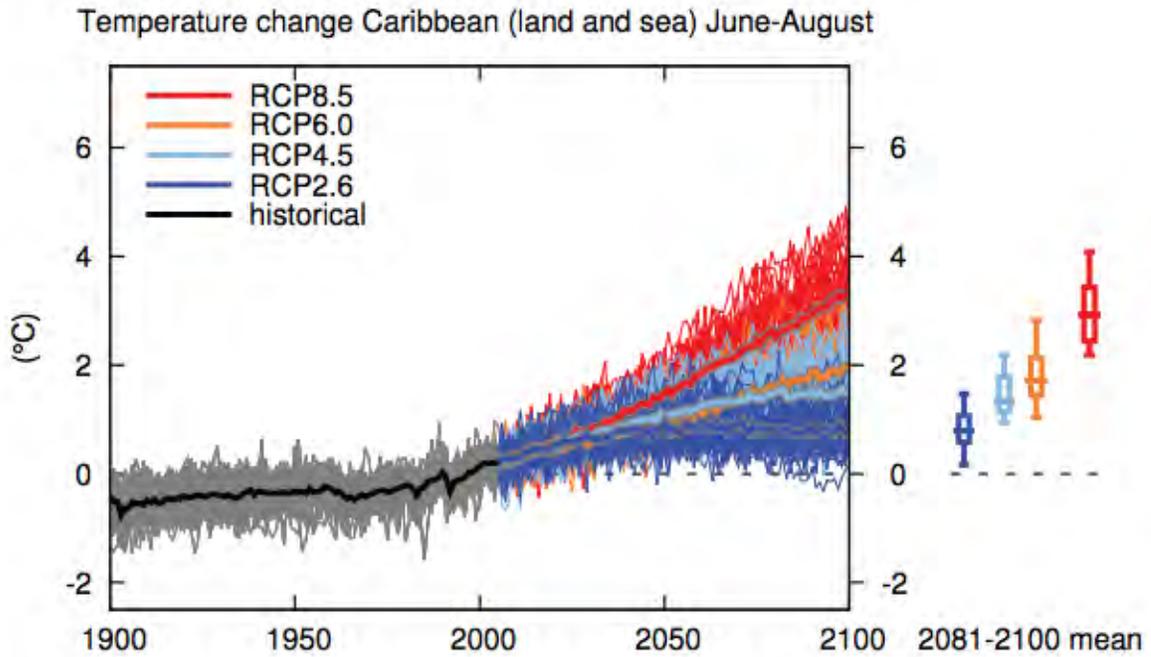
Los escenarios climáticos proyectan que las temperaturas del Caribe incrementarán entre 1°C a más de 3°C (1.8°F a 5.4°F) al 2100 dependiendo del escenario climático, pero por encima del promedio para áreas tropicales (van Oldenborg et al., 2013; véase Gráfica 2.6). Las proyecciones para Puerto Rico presentan aumentos de al menos 0.02°C/año hacia el 2050, esto significa un incremento por lo menos de 0.8°C (1.4°F) para mediados de siglo (Melillo, Terese y Yohe, 2014), hasta máximos de 4.6°C a 9 °C (8.3°F a 16.2°F) para el 2100 (ver Ilustración 2.1) (Henareh Khalyani, et. al., 2016).



Gráfica 2.4 Anomalía observada en la temperatura media global en superficie 1860-2015 (NOAA, 2015).



Gráfica 2.5 Anomalía observada en la temperatura media global en superficie 1860-2015 (GISSTEMP Team, 2015).



Gráfica 2.6 Cambios proyectados en temperatura para la región del Caribe 1900-2100 (van Oldenborg et al., 2013).

Los modelos pronostican aumentos significativos en días calurosos para Puerto Rico; estos cambios serán dependientes de los aumentos en las temperaturas a nivel global. Según análisis realizados para Puerto Rico y la región del Caribe (Hayhoe, 2013), un aumento en las temperaturas promedio globales de 1°C puede significar un aumento de sobre 150 días adicionales con temperaturas sobre 32°C (90°F) y 35 días adicionales con temperaturas sobre 35°C (95°F). Un aumento de 2°C provocaría un aumento de sobre 300 días con temperaturas sobre los 32°C y de éstos sobre 150 días con temperaturas sobre los 35°C para el país. Si las temperaturas promedio aumentan a 3°C por encima del promedio histórico global, Puerto Rico estaría registrando temperaturas sobre los 32°C en 340 días al año, con más de 100 días con temperaturas alcanzando los 37.8°C (100°F) (Gráfica 2.7).

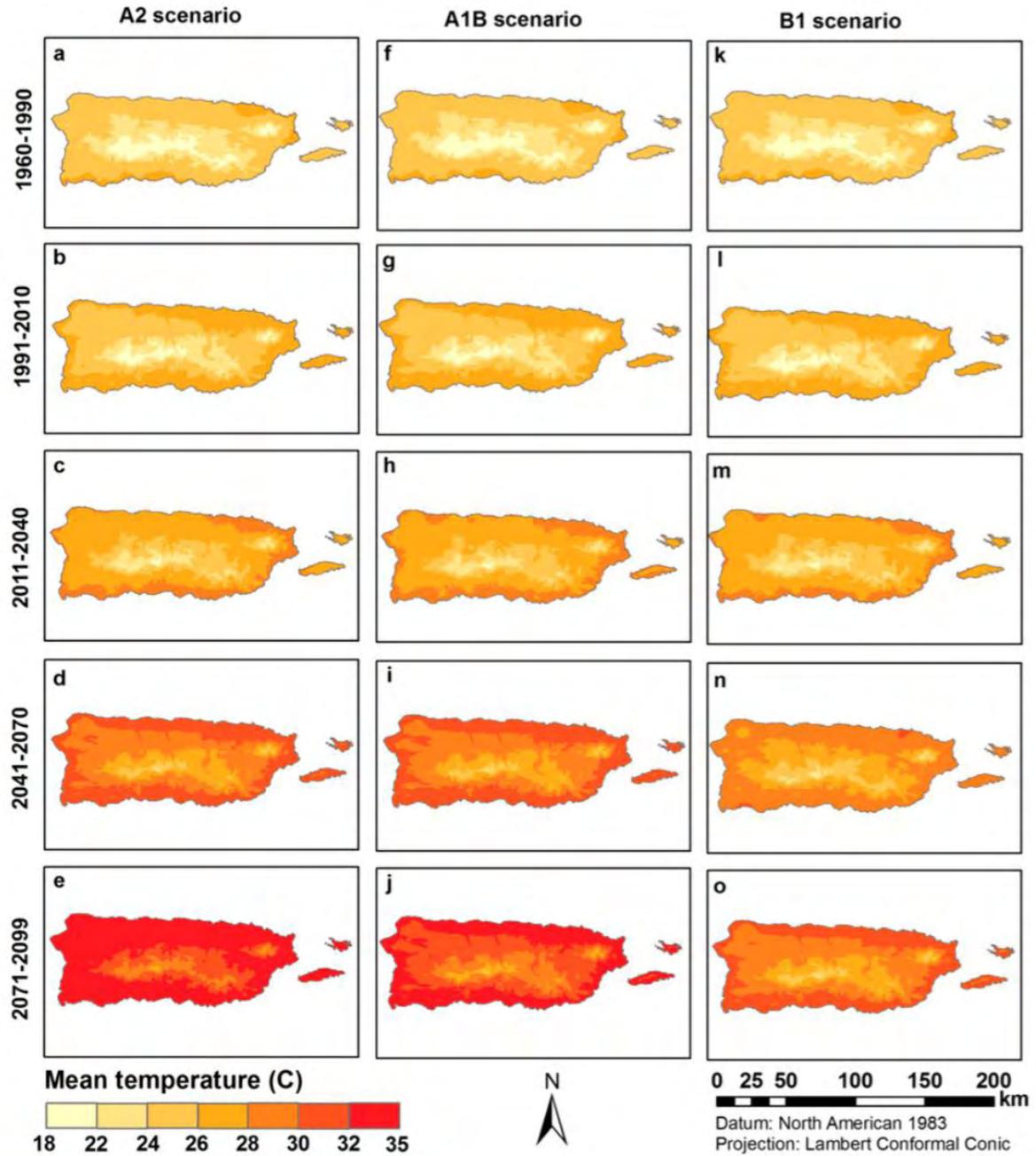
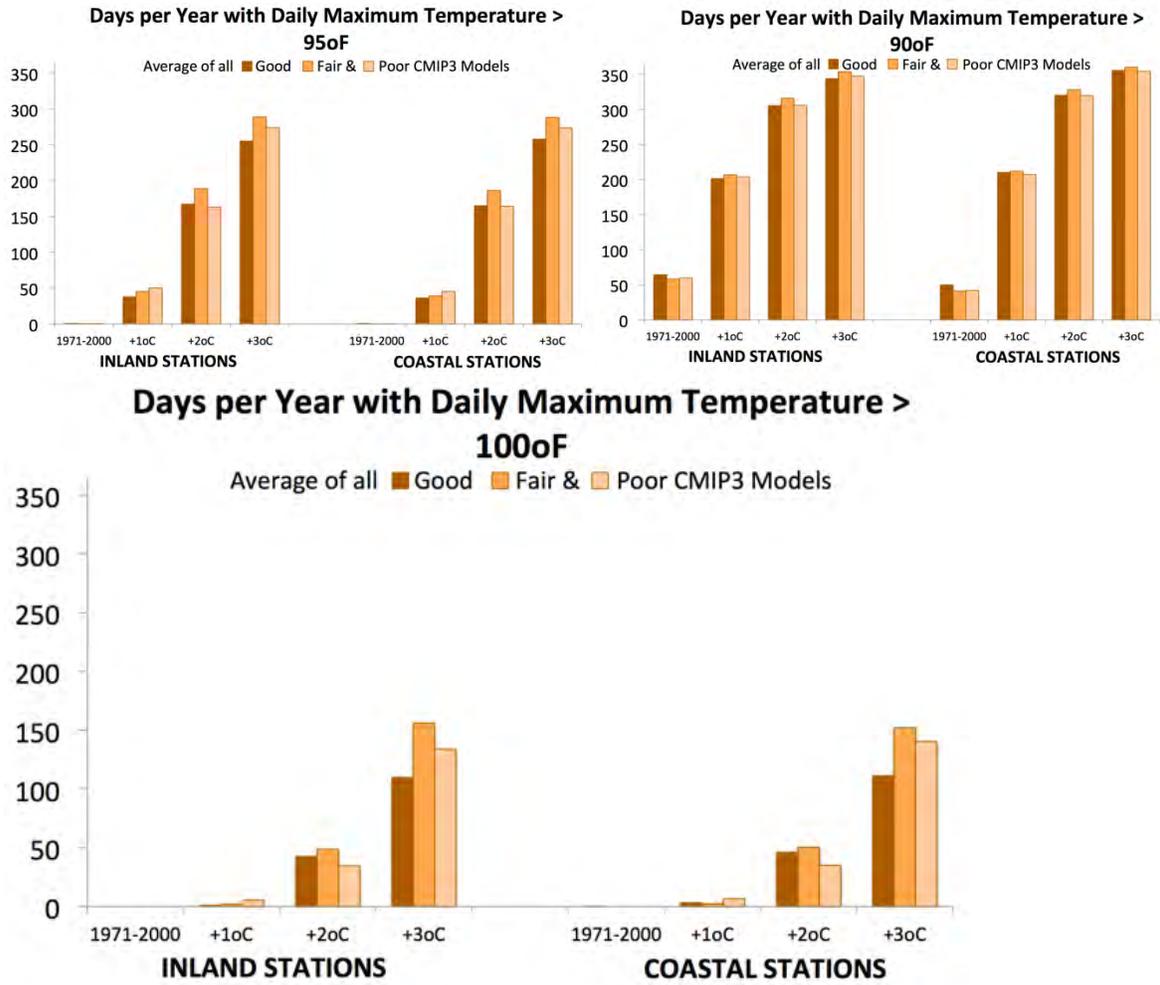


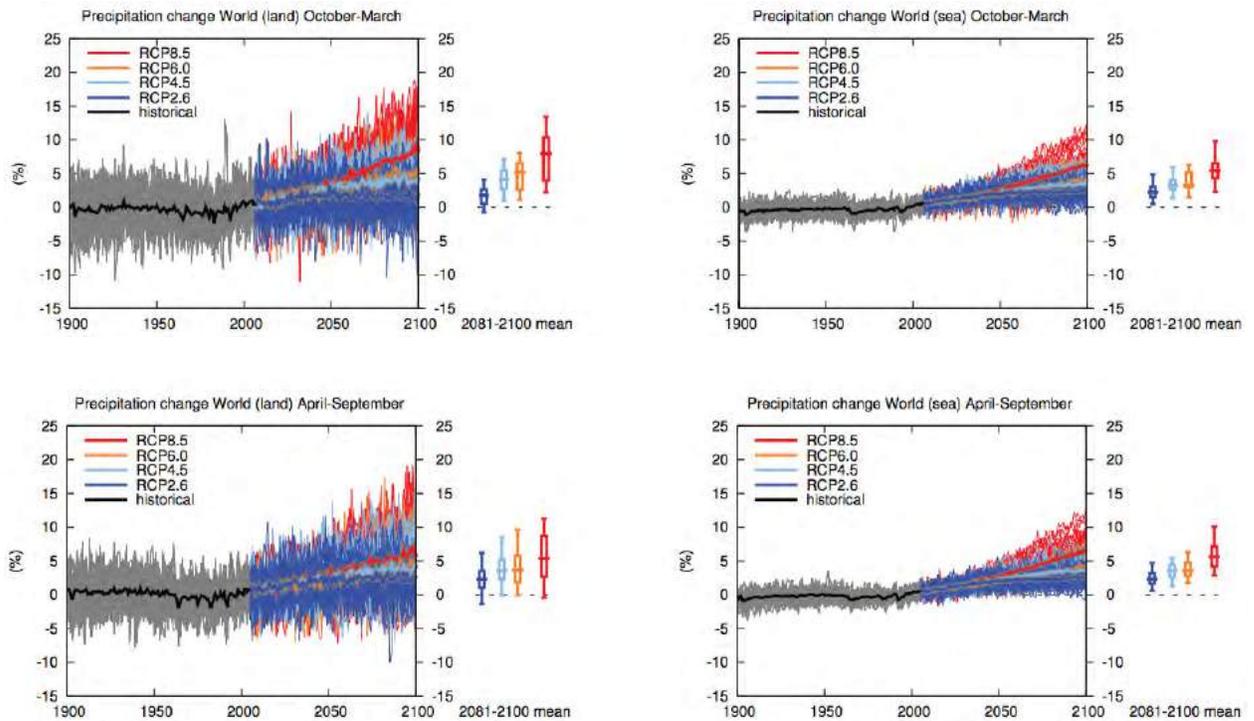
Ilustración 2.1 Cambios proyectados de temperaturas promedio para Puerto Rico bajo diferentes escenarios climáticos (Henareh Khalyani, et. al., 2016).



Gráfica 2.7 Proyecciones de número de días al año con temperaturas máximas de 90°F, 95°F y 100°F (Hayhoe, 2013).

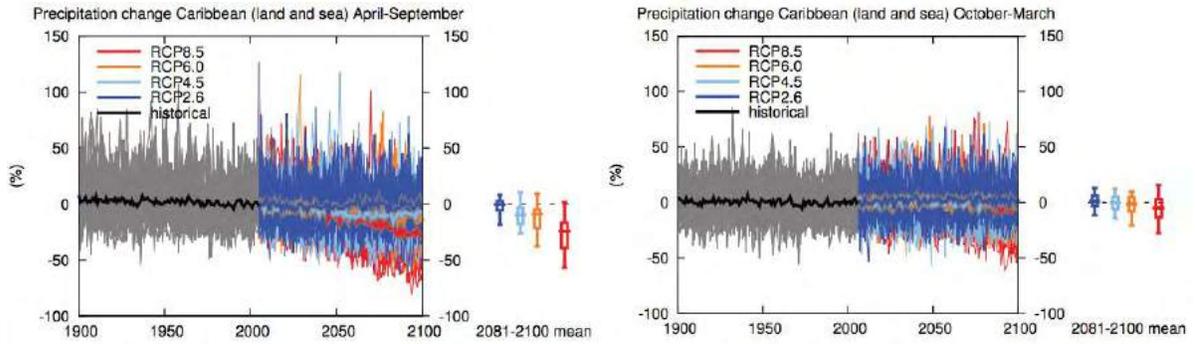
2.3 Cambio en los patrones de precipitación

Según el IPCC, a nivel global se prevé que ocurran cambios en el ciclo del agua en un clima más cálido. Se estima que la precipitación a escala global aumente gradualmente en el siglo XXI y que este aumento sea muy inferior a la tasa de menor incremento de vapor de agua en la tropósfera, debido a las limitaciones energéticas globales. Los cambios en la precipitación media en un mundo mucho más cálido no serán uniformes, ya que en algunas regiones se experimentarán aumentos y en otras disminuciones o no se experimentará ningún cambio (Collins, et. al., 2013; IPCC, 2014) (véase Gráfica 2.8).



Gráfica 2.8 Proyecciones de cambios en precipitación global, 1900-2100 (Collins, et al., 2013).

El Caribe mostrará una reducción en los promedios de precipitación anual registrados hacia el 2100, particularmente durante el periodo de abril a septiembre, según sugieren tanto los modelos globales (van Oldenburg, et al., 2013) como los modelos refinados a escala (*“downscaled models”*) preparados para la región (Hayhoe, 2013). Los modelos de tendencia de precipitación bajo los escenarios climáticos de RCP's pronostican una disminución de la precipitación entre 0.01 y 0.1mm/día/año (0.1437 y 1.437pulg/año) (PRCCC, 2013) (ver Gráficas 2.9 e Ilustración 2.2).



Gráfica 2.9 Cambios en precipitación para la región del Caribe bajo diferentes escenarios climáticos 1900-2100 (van Oldenburg, et al., 2013).

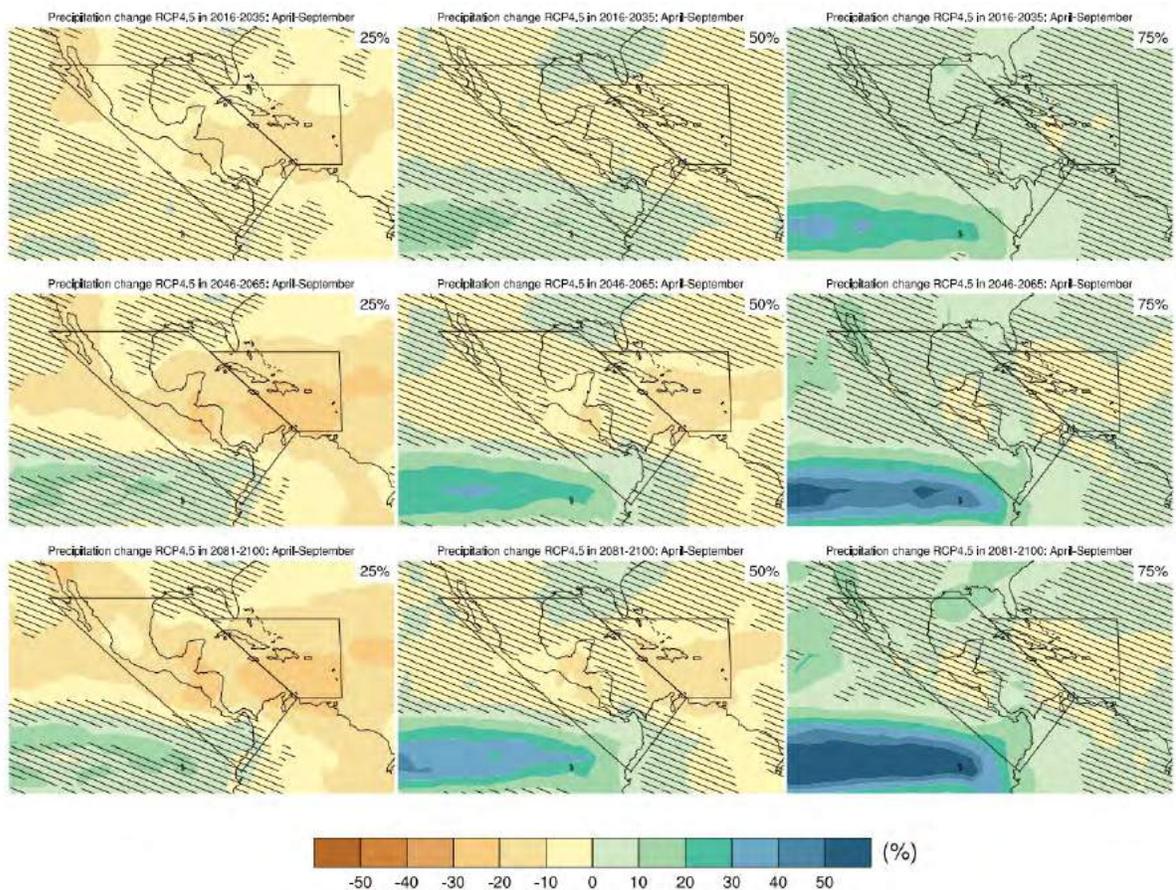


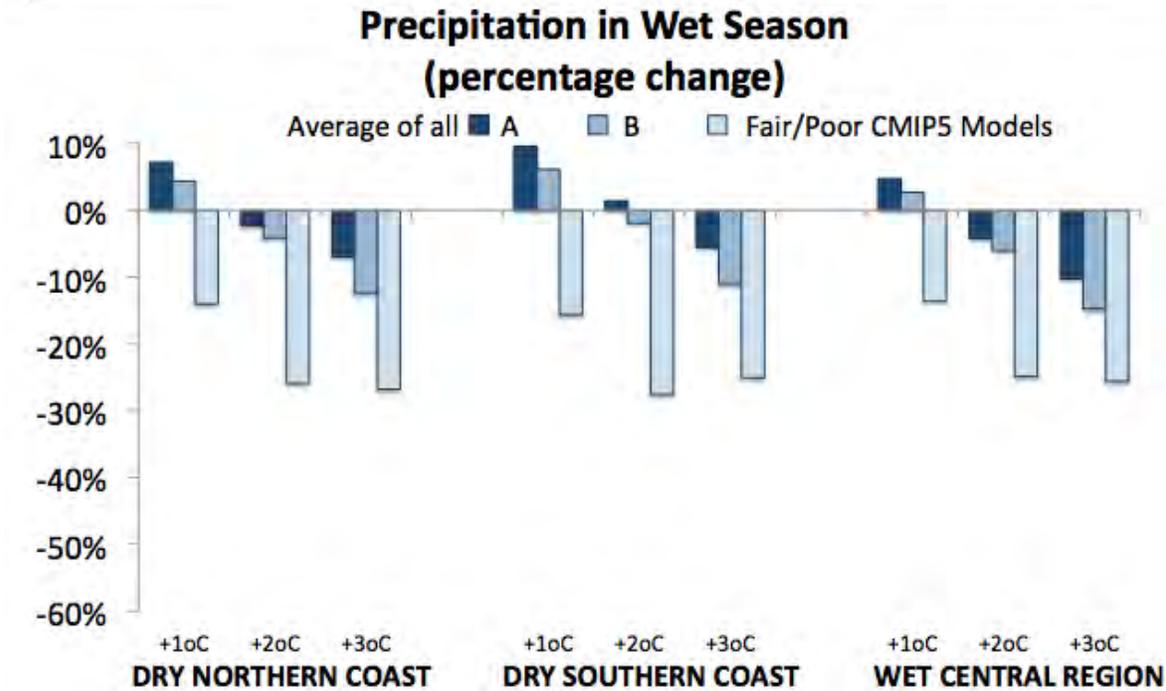
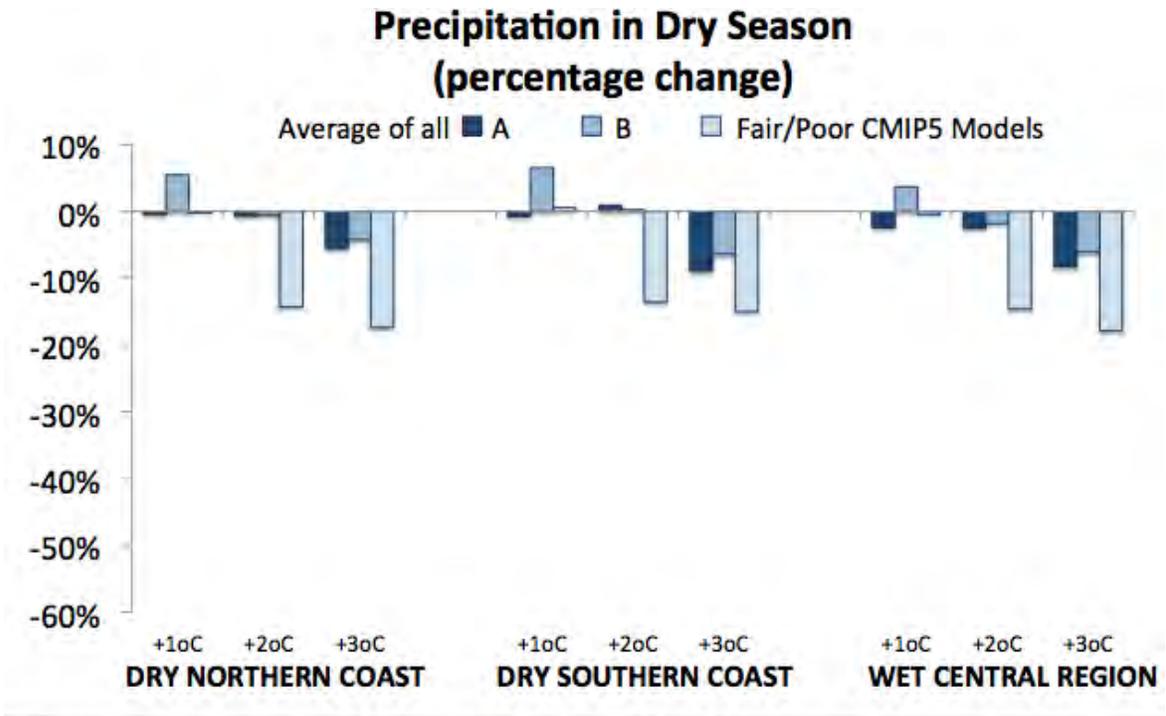
Ilustración 2.2 Cambios en precipitación para la región del Caribe bajo RCP 4.5 comparados con promedio 1986-2005 (van Oldenburg, et al., 2013).

Es importante reconocer cómo los modelajes climáticos desarrollados para proyectar los cambios en precipitación en Puerto Rico –al igual que otras islas oceánicas y territorios

pequeños- todavía mantienen ciertas limitaciones para reducir las incertidumbres asociadas a la reducción a escala de estos modelos globales (Hayhoe, 2013; Hayhoe y Stoner, 2015; Zhang, et. al. 2016). Los procesos matemáticos y estadísticos para refinar modelos climatológicos e hidrológicos que nos permitan proyectar los cambios en precipitación para Puerto Rico y otros territorios insulares bajo diferentes escenarios climáticos continúan logrando adelantos significativos (Van Beukesom, et. al., 2015; Pourmokhtarian, et. al. 2016; Zhang, et. al. 2016). A tales fines, se presentan los resultados, fruto de la mejor información disponible al presente, ajustados para Puerto Rico.

Las proyecciones de los modelos climáticos para Puerto Rico según estudios trabajados por la Dra. Katharine Hayhoe (Hayhoe, 2013) presentan leves aumentos en precipitación anual bajo un escenario de aumento en las temperaturas globales de 1°C; sin embargo, en los modelos bajo aumentos en temperaturas de 2°C y 3°C se presentan reducciones en las precipitaciones promedio de sobre 15% para las regiones Norte, Sur y Oeste. Dichas tendencias se proyectan tanto durante la temporada húmeda (mayo-noviembre) como en la temporada seca (diciembre-abril). Se espera se mantenga una reducción en la precipitación registrada durante la temporada húmeda, y una reducción menos marcada durante la temporada seca. Se debe resaltar la reducción más marcada en las precipitaciones durante la temporada húmeda, las cuales permiten restaurar el balance hidrológico de las fuentes de agua para las actividades socioeconómicas, así como para los ecosistemas (ver Gráfica 2.10). La evidencia sugiere que condiciones más secas son más probables que condiciones húmedas para Puerto Rico (PRCCC, 2013).

Estudios más recientes desarrollados por un equipo de investigadores del *Caribbean Landscape Conservation Cooperative* presentan un panorama similar para Puerto Rico en lo relacionado con los cambios en los patrones de precipitación y de flujo de agua (Van Beusekom, et. al., 2015; Henareh Khalyani, et. al., 2016). En términos de flujo de las aguas en Puerto Rico, las proyecciones aducen a reducciones de entre un 39% a un 88% para la década de los 2090s comparados con los flujos promedio en 1960s, dependiendo del escenario (ver Gráfica 2.11 y Ilustración 2.3) (Van Beusekom, et. al. 2015). En términos de precipitación, se proyectan reducciones anuales de precipitación de entre 130mm a 1397mm (5.12 pulgadas a 55 pulgadas) al periodo de 2071- 2099 comparado con el periodo de 1960-1990, dependiendo del escenario (ver Ilustración 2.4) (Henareh Khalyani, et. al., 2016).



Gráfica 2.10 Cambios porcentuales en precipitación promedio en Puerto Rico (Hayhoe, 2013).

Los patrones de precipitación en Puerto Rico ya han mostrado cambios graduales en la distribución promedio de lluvia recibida anualmente. Según datos del Servicio Nacional de Meteorología (NWS por sus siglas en inglés), se pueden observar cambios en los mapas de

precipitación anual promedio de Puerto Rico para los periodos de 1971-2000 y 1981-2010 (Ilustraciones 2.5 y 2.6) (NWS, 2015).

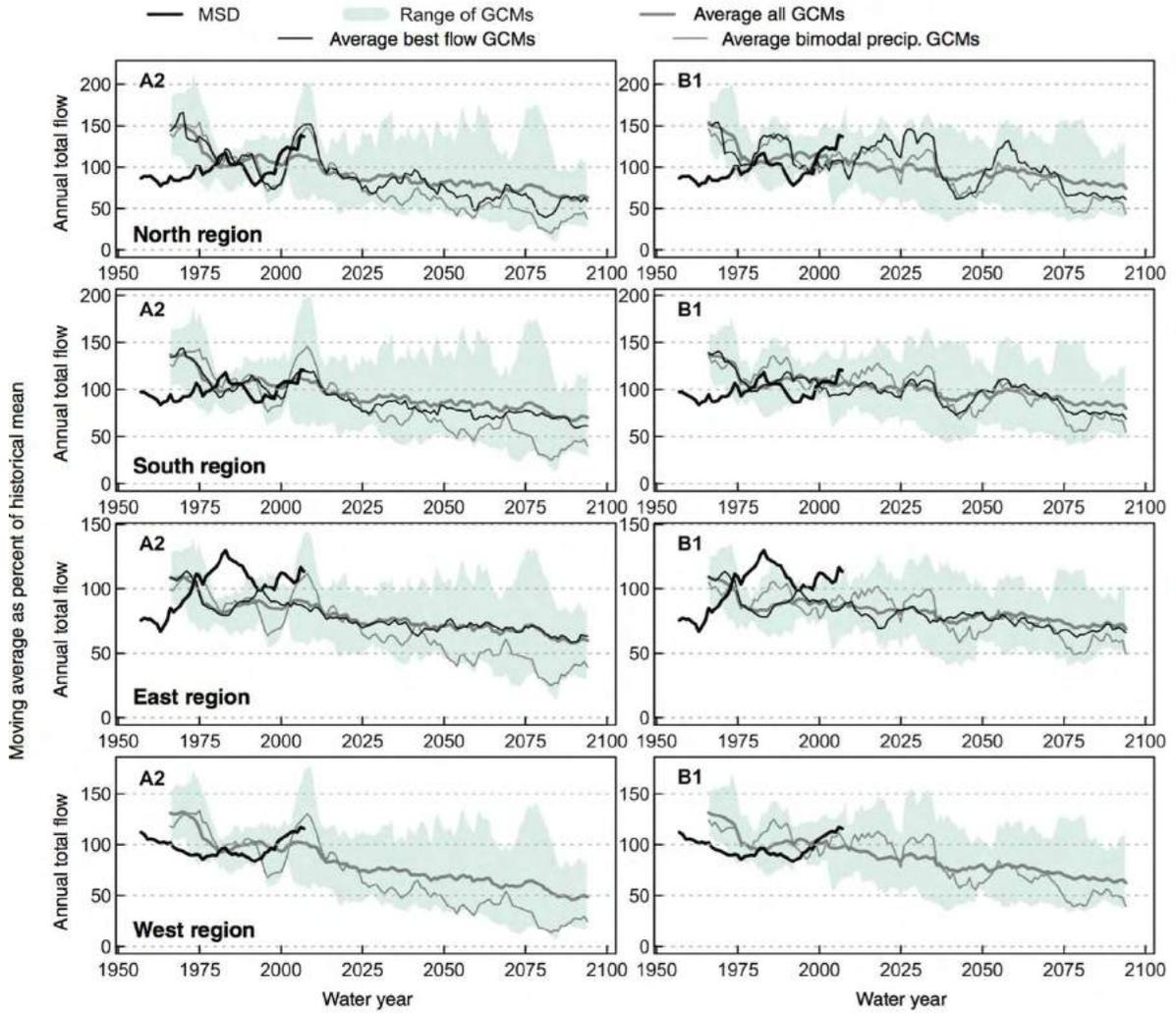
Las proyecciones apuntan a una continuidad en los cambios de los patrones de precipitación de Puerto Rico para las próximas décadas (Van Beusekom, et. al., 2015; Henareh Khalyani, et. al., 2016). Las variaciones en los promedios de precipitación proyectados muestran cambios en la distribución de las lluvias anuales registradas, así como en la cantidad de agua que se recibe en la isla. A su vez, los cambios esperados en los eventos de lluvia durante el periodo húmedo y el periodo seco aducen a que se observarán menos eventos de precipitación, pero la intensidad de dichos eventos será mayor. Ciertamente, los cambios en los patrones de precipitación incluyendo la recurrencia, intensidad y distribución de los eventos de lluvia registrados generarán un impacto en el ciclo hidrológico observado en Puerto Rico, con efectos de importancia para el desarrollo agrícola y pecuario, la resiliencia de las diferentes regiones ecosistémicas del país, así como en la producción y distribución de agua potable ya sea por fuentes superficiales o subterráneas. Estas reducciones de precipitación y flujo de aguas representan grandes retos para los manejadores del recurso agua en las próximas décadas; y resaltan la responsabilidad de los manejadores del recurso al presente para garantizar el mejor aprovechamiento y conservación de las aguas.

Region	Change in percent of historical mean at from 1960s to end of 21st century*							
	Total flow		Surface flow		Subsurface flow		Groundwater flow	
	A2	B1	A2	B1	A2	B1	A2	B1
North	-88%	-79%	-72%	-67%	-61%	-52%	-173%	-155%
	Fraction of total flow†		0.48-0.50	0.48-0.49	0.25-0.35	0.25-0.33	0.27-0.15	0.27-0.18
South	-67%	-59%	-63%	-54%	-42%	-44%	-167%	-160%
	Fraction of total flow†		0.78-0.78	0.78-0.80	0.11-0.15	0.11-0.13	0.11-0.07	0.11-0.07
East	-49%	-39%	-45%	-35%	-35%	-42%	-96%	-83%
	Fraction of total flow†		0.77-0.78	0.77-0.80	0.10-0.14	0.11-0.11	0.13-0.08	0.12-0.09
West	-82%	-69%	-69%	-59%	-110%	-99%	-96%	-71%
	Fraction of total flow†		0.34-0.43	0.34-0.39	0.13-0.17	0.13-0.15	0.53-0.40	0.53-0.46

*Difference between first and last calculated 10-year moving average.

†Component's fraction of total flow from year of first calculated 10-year moving average to last.

Ilustración 2.3 Cambios proyectados en el flujo de las aguas en Puerto Rico según escenarios climáticos 1960-2100 (Van Beusekom, et. al., 2015).



Gráfica 2.11 Cambios proyectados en el flujo de las aguas en Puerto Rico por región, según escenarios climáticos 1960-2100 (Van Beusekom, et. al., 2015).

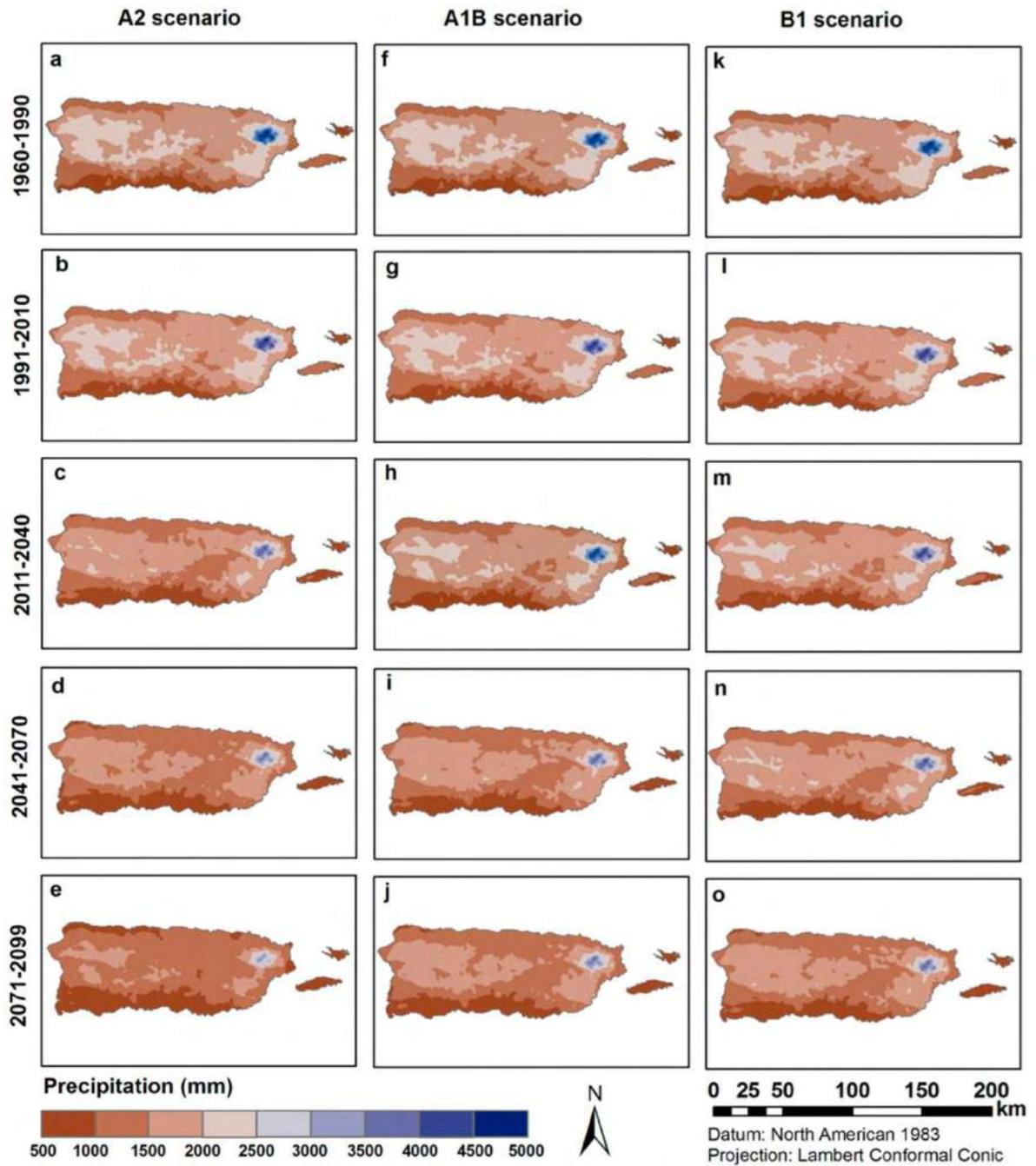


Ilustración 2.4 Cambios proyectados en precipitación anual en Puerto Rico según escenarios climáticos, 1960-1990 al 2071-2099 (Henareh Khalyani, et. al., 2016).

2.4 Aumento del nivel del mar

La dilatación térmica de los océanos se considera uno de los principales factores que más han contribuido al aumento del nivel medio global del mar durante las pasadas décadas. Existe una gran confianza entre la comunidad científica de que el calentamiento de los océanos ha contribuido 0.8 [0.5 a 1.1] mm/año de cambio en el nivel del mar para el período de 1971-2010 y que la mayor parte de la contribución proviene de los 700m superiores de los océanos. No obstante, la tasa media de los modelos de dilatación térmica de los océanos para el período 1993-2010 ha ocurrido a un ritmo superior, con un cambio en el nivel del mar de 1.1 [0.8 a 1.4] mm/año (Church, et. al., 2013). El aumento en las temperaturas de los océanos junto con el derretimiento de los glaciares y las capas de hielo en Groenlandia y la Antártica, está habilitando y potenciando el aumento en el nivel del mar. La razón de aumento continúa incrementando, inclusive en la región del Caribe y del Atlántico (IPCC, 2014).

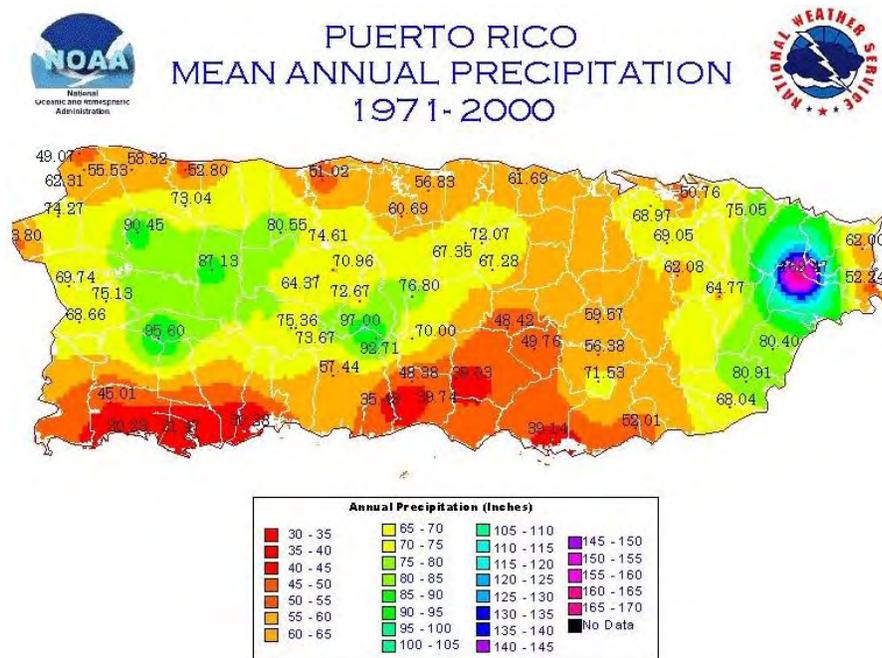


Ilustración 2.5 Precipitación anual promedio para Puerto Rico 1971-2000 (NWS, 2015).

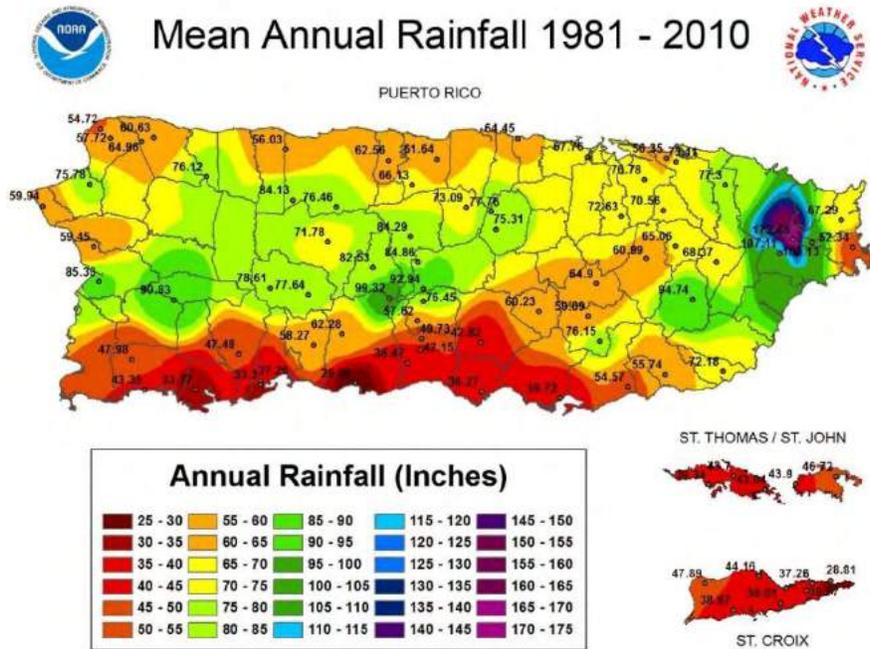
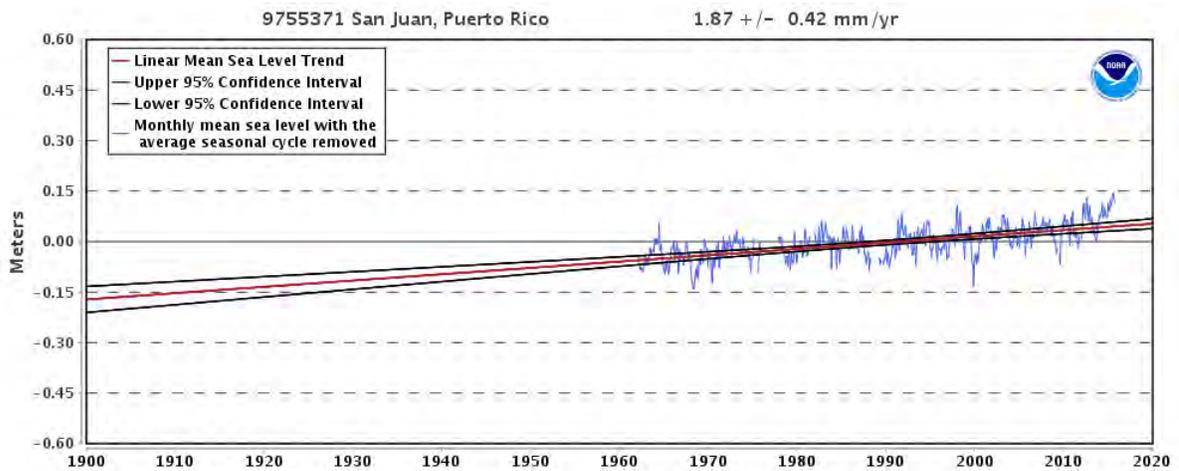


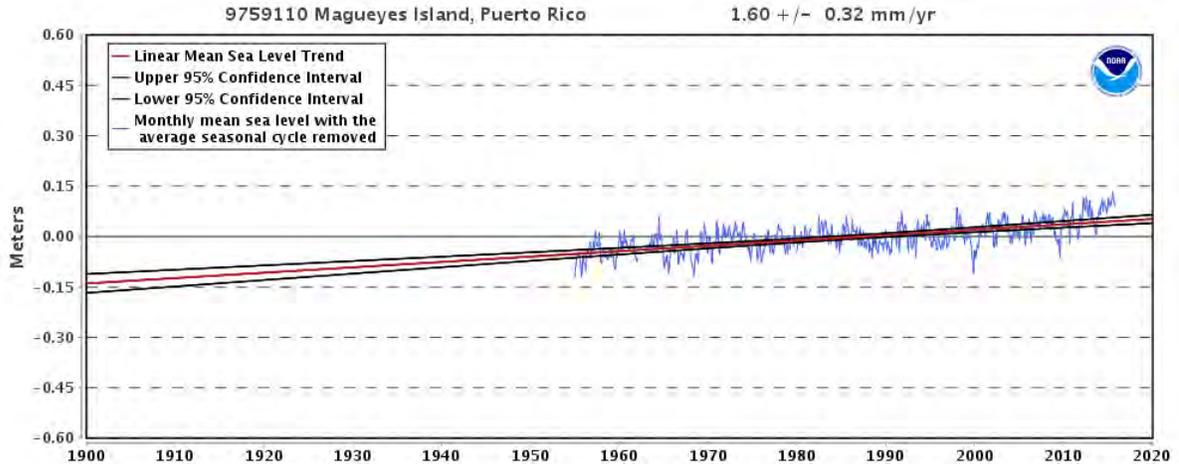
Ilustración 2.6 Precipitación anual promedio para Puerto Rico 1981-2010 (NWS, 2015b).

En cuanto a cambios observados en el nivel del mar, tres estudios realizados para el PRCCC confirman las tendencias de incremento del nivel del mar para Puerto Rico de al menos 1.4 mm/año, lo cual se espera que continúe y se acelere (PRCCC, 2013). Los mareógrafos que miden los aumentos en el nivel promedio del mar en las costas del Atlántico (San Juan) y del Caribe (Isla Magueyes) en Puerto Rico, muestran un aumento promedio de 1.87 mm/año y 1.60 mm/año respectivamente (NOAA, 2015; NOAA, 2015b) (ver Gráficas 2.12 y 2.13).



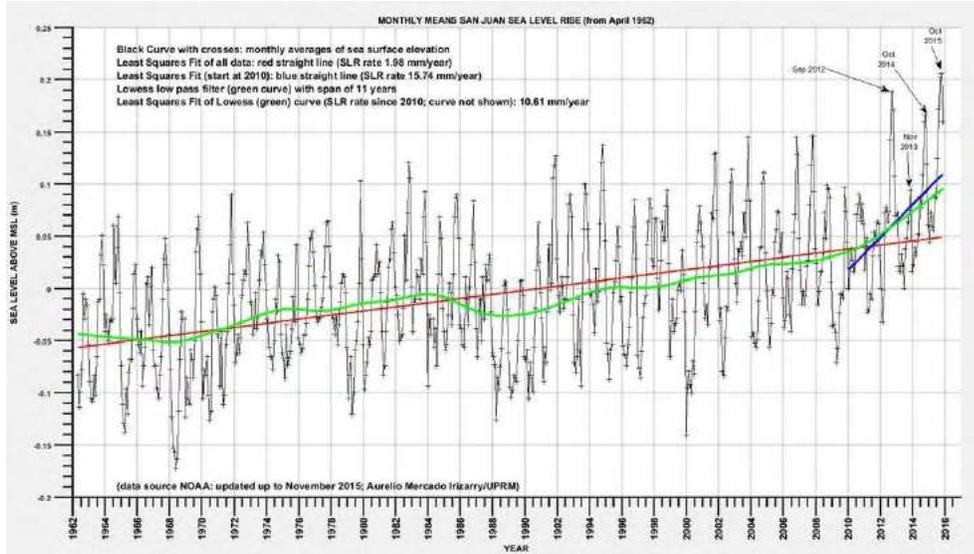
Gráfica 2.12 Medidas del mareógrafo ubicado en San Juan, Puerto Rico (NOAA, 2015b).

PLAN INTEGRAL DE RECURSOS DE AGUA
JUNIO, 2016

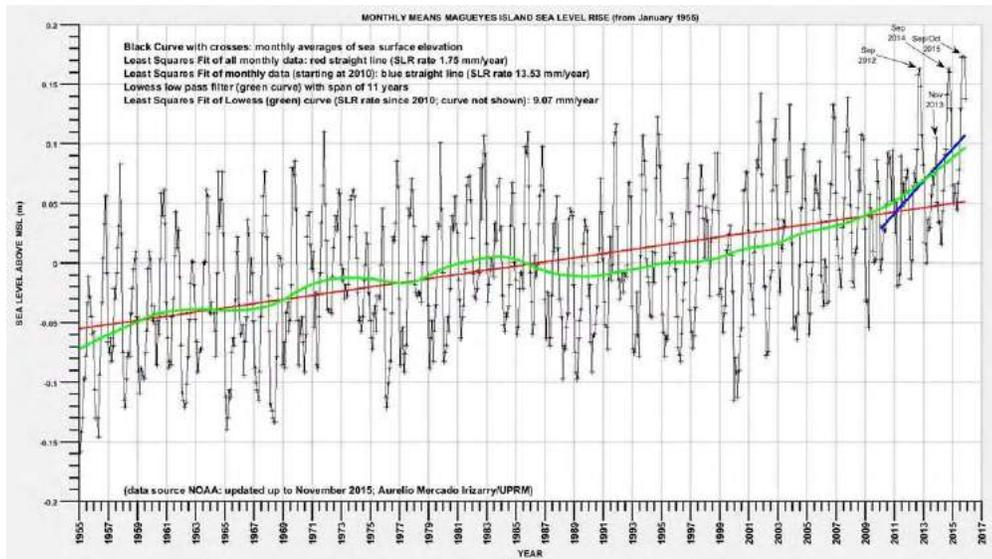


Gráfica 2.13 Medidas del mareógrafo ubicado en Isla Magueyes, Puerto Rico (NOAA, 2015c).

No obstante, las tendencias observadas desde el 2010 al presente apuntan a un incremento en la razón de aumento del nivel del mar significativamente superior a las tendencias históricas. Según datos provistos por el Dr. Aurelio Mercado, en San Juan se ha registrado un aumento de 10.61 mm al año (Mercado, 2015) y un aumento de 9.07 mm anual en Isla Magueyes (Mercado, 2015b), desde el año 2010 a noviembre de 2015. De mantenerse este ritmo marcado de aumento en el nivel promedio del mar, las recomendaciones propuestas por el PRCCC para planificar ante un aumento del nivel del mar de entre 0.5m a 1m podrían ser valores que subestimen los eventos a ocurrir. Las implicaciones que este aumento tendría en nuestros ecosistemas costeros y en la disponibilidad de agua subterránea en los acuíferos de la costa norte y sur en Puerto Rico (ver Gráficas 2.14 y 2.15) serían mayores.



Gráfica 2.14 Aumento en el nivel del mar en San Juan, Puerto Rico (Mercado, 2015).



Gráfica 2.15 Aumento en el nivel del mar en Isla Maguëyes, Puerto Rico (Mercado, 2015b).

Según los modelos y los pronósticos científicos, la elevación del nivel del mar puede hacer a las ciudades costeras más vulnerables a eventos de clima extremos (como, por ejemplo, los huracanes), así como la destrucción de ecosistemas importantes como humedales palustrinos y manglares. La elevación del nivel del mar inundaría tierras bajas, erosionaría las costas, agravaría las inundaciones y aumentaría el contenido de sal en estuarios, así como en manantiales de agua. Distinto a los vastos terrenos continentales, las islas, en general, se encuentran en peligro particularmente porque muchas están gradualmente perdiendo todos

sus depósitos de agua dulce como resultado de la intrusión del agua salada (Climate Institute, 2007; Taylor, et. al., 2013).

En Puerto Rico no serían distintas las consecuencias del aumento del nivel del mar, por lo que, debe esperarse se afecten las fuentes de agua dulce localizadas en las costas. Particularmente, los acuíferos costeros podrían recibir una mayor intrusión salina en la medida en que se eleva el mar y la cuña de agua salada se desplaza tierra adentro. Esta manifestación resulta de extrema importancia para la planificación y manejo sostenible del agua subterránea, dado el hecho de que en años recientes decenas de pozos de la AAA han sido cerrados debido a la intrusión salina.

El aumento progresivo en el nivel del mar continuará representando un riesgo de contaminación por intrusión salina para los acuíferos costeros de Puerto Rico y otros territorios, así como para los habitantes y ecosistemas que dependen de dichas fuentes para el abastecimiento de agua dulce (Werner y Simmons, 2009; Taylor, et. al., 2013). Es importante reconocer que el 56% de la población del país vive en los municipios del litoral (Melillo, Terese y Yohe, 2014). Según el Censo 2010, en Puerto Rico hay un total de 2,086,441 habitantes en las costas y un número considerable de esta población se abastece de acuíferos costeros, como es el caso de los habitantes del municipio de Salinas quienes dependen en su totalidad exclusivamente de agua subterránea para su consumo.

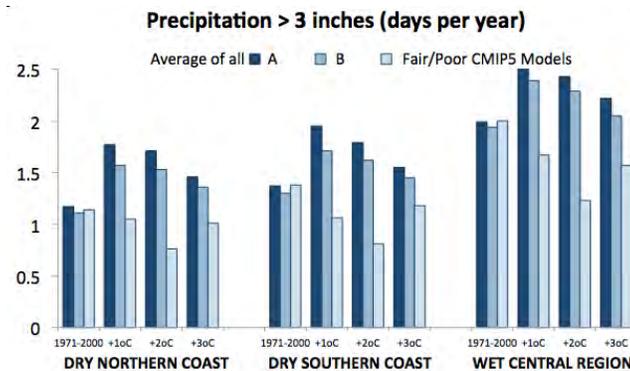
2.5 Eventos climatológicos extremos

Puerto Rico y la región del Caribe lleva experimentando eventos climatológicos extremos, los cuales no tan solo han afectado los ecosistemas y cuerpos de agua, sino que además han generado grandes pérdidas económicas y de vidas humanas (UNEP, 2008). Las proyecciones de la incidencia, intensidad y recurrencia de estos eventos extremos, bajo escenarios de cambio climático a nivel global, muestran grados de confiabilidad variables, dada la complejidad de establecer con certeza eventos que se identifican en los márgenes de las curvas probabilísticas (Flato, et. al., 2013). Los modelos climatológicos asociados a la formación de ciclones tropicales para la región del Atlántico norte han logrado reducir las incertidumbres para proyectar los patrones hacia las próximas décadas (Flato, et. al., 2013). De igual forma, los avances para modelar los cambios en eventos de precipitación extrema han permitido brindar mayor confiabilidad a las proyecciones presentadas bajo diferentes escenarios (Hayhoe, 2013). Los modelajes asociados a eventos de sequía, desarrollados tanto

a nivel regional como global, también han sido confiables. No obstante, las diferencias en cómo se define y cuantifica la sequía a diferentes escalas ha presentado retos en el desarrollo de las simulaciones para proyectar este evento (Flato, et. al., 2013). Esto implica que todavía existe espacio para reducir la incertidumbre asociada a la incidencia, intensidad y recurrencia de eventos extremos a nivel global y regional.

Se prevé que la región del Atlántico norte tendrá cambios mínimos o nulos en lo concerniente a la formación de huracanes que afecten la región caribeña, con una tendencia hacia una reducción en la cantidad de ciclones tropicales formándose en esta agua oceánica (PRCCC, 2013). No obstante, se prevé un aumento en la frecuencia de formación de huracanes fuertes, de categoría 4 o 5 en la escala Saffir-Simpson (Melillo, Terese y Yohe, 2014).

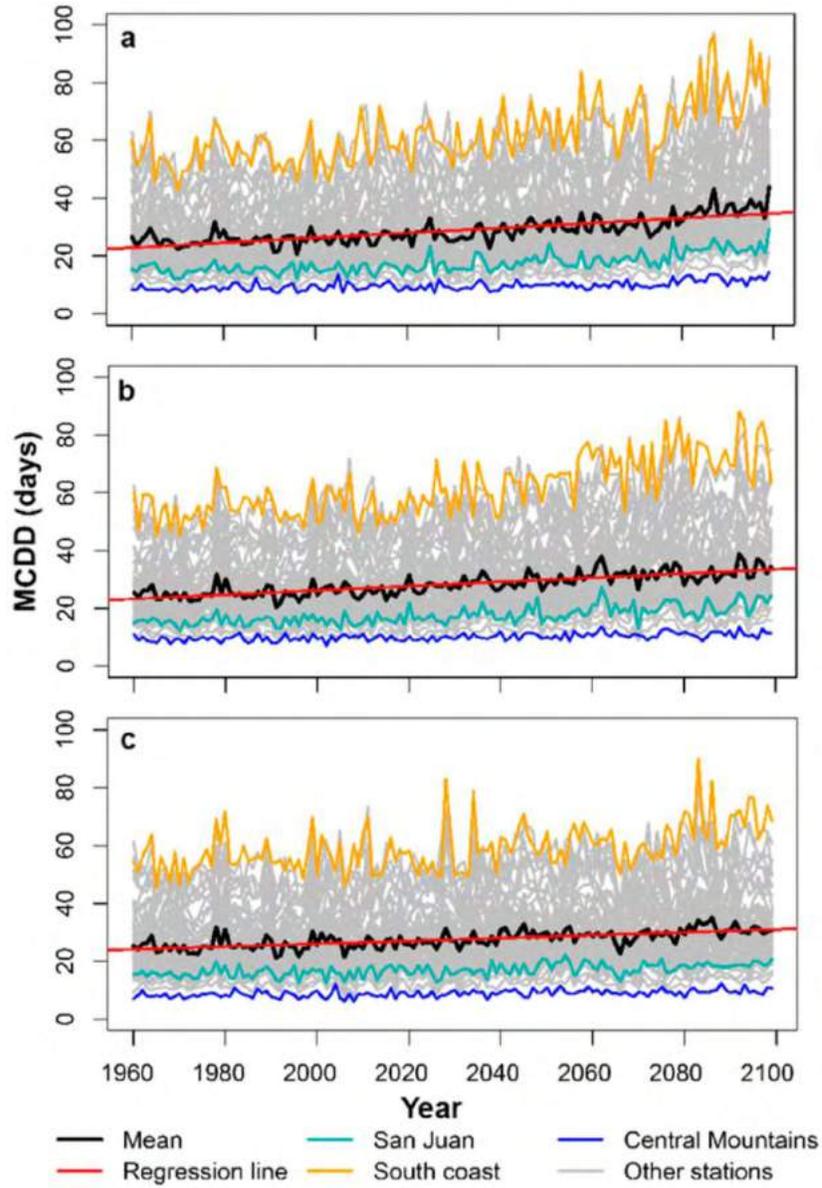
Se proyecta un leve aumento en los días con eventos de lluvias extremas con lluvias mayores de 76.2 mm (3 pulgadas) en períodos de 24 horas, bajo proyecciones de aumentos en las temperaturas promedio globales de 1°C, 2°C y 3°C (Hayhoe, 2013) (ver Gráfica 2.16). Este aumento se prevé que ocurra de forma más marcada en el interior montañoso central, aunque se observará en la costa norte y sur del País. Dichas proyecciones pueden representar retos tanto para el manejo de las aguas urbanas como para los abastos de agua que se sirven de nuestro sistema hidrológico. Por otro lado, estos eventos podrán ser claves para la recarga y recuperación de los acuíferos de Puerto Rico, a medida que las precipitaciones asociadas a eventos extremos puedan percolar y llegar a las zonas acuíferas.



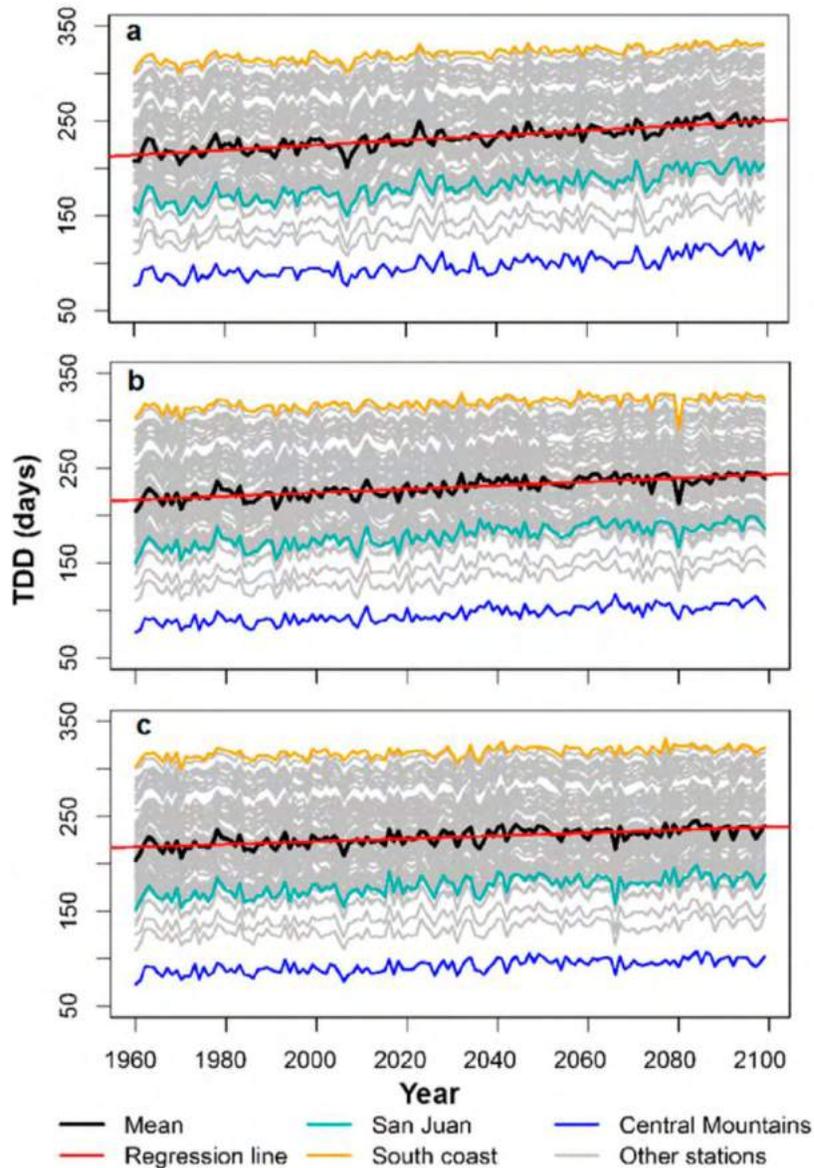
Gráfica 2.16 Cambios en número de días con lluvias intensas en Puerto Rico (Hayhoe, 2013).

En lo concerniente a los eventos de sequía, al presente no se ha encontrado literatura científica que analice o proyecte el comportamiento futuro de eventos de sequía para Puerto

Rico bajo diferentes escenarios climáticos. Los aumentos proyectados en las temperaturas promedio, el aumento en la cantidad de días al año con temperaturas máximas sobre 32°C, las reducciones en las precipitaciones promedio tanto en los periodos húmedos como en los periodos secos aducen a un potencial aumento en los eventos de sequía meteorológica e hidrológica que se registren en Puerto Rico. Proyecciones sobre el máximo días secos consecutivos (MCDD por sus siglas en inglés) así como el total de días secos (TDD por sus siglas en inglés) reflejan leves aumentos hacia el 2100 bajo diferentes escenarios climáticos, lo cual también aduce a un mayor potencial de eventos de sequía meteorológica e hidrológica (ver Gráficas 2.17 y 2.18) (Henareh Khalyani, et. al., 2016). Sin embargo, hace falta análisis más detallados que permita identificar cómo estos eventos extremos estarán manifestándose a partir de diferentes escenarios climáticos, particularmente para eventos de sequía.



Gráfica 2.17 Cambios proyectados en MCDD al 2100 en Puerto Rico, según escenarios climáticos (Henareh Khalyani, et. al., 2016).



Gráfica 2.18 Cambios proyectados en TDD al 2100 en Puerto Rico, según escenarios climáticos (Henareh Khalyani, et. al., 2016).

2.5 Consecuencias

Los datos e información presentada en este capítulo resaltan las principales manifestaciones que el cambio climático tendrá sobre el recurso agua en Puerto Rico. Las transformaciones en los patrones globales del clima ejercerán cambios en las temperaturas atmosféricas regionales y de la Isla; a su vez, se observarán cambios en los patrones de precipitación tanto en el Caribe como en las diferentes zonas del País. El nivel promedio del mar, tanto en el área

del mar Caribe como del océano Atlántico, continúa un patrón ascendente progresivo. Las diferencias existentes entre las metas globales para contener el cambio climático en el planeta, los patrones de emisiones de GEI y los compromisos internacionales para reducir las causas de este problema hacen necesario utilizar modelos para simular diferentes escenarios climáticos futuros para facilitar una mejor adaptación a sus efectos y promover la resiliencia a los cambios venideros.

La información disponible permite anticipar que las consecuencias del cambio climático sobre el recurso agua en Puerto Rico se manifestarán en, por lo menos, los siguientes eventos:

1. *Reducción en la lluvia* – La precipitación es la principal fuente de agua dulce para nuestros sistemas hidrográficos e hidrogeológicos. Por lo tanto, alteraciones a los patrones de lluvia redundarán en cambios al ciclo hidrológico de la Isla y aportarán a cambios en las zonas de vida en nuestro territorio, así como a la disponibilidad de agua en nuestros cuerpos de agua superficiales y subterráneos. De acuerdo a los resultados presentados en la Sección 2.3, las proyecciones de reducción en la precipitación para Puerto Rico apunta a cambios negativos en los eventos de lluvia para las diversas regiones del país de entre 5 a 55 pulgadas anuales para el 2100 (Henareh Khalyani, et. al., 2016). Si bien se precisa continuar reduciendo las incertidumbres asociadas a los modelajes climáticos trabajados a escala de Puerto Rico, la información existente al presente aduce a una reducción progresiva de lluvia en las próximas décadas, aunque diferenciada entre diferentes regiones del país.
2. *Reducción en la disponibilidad de aguas superficiales* – Los cambios observados y proyectados en los patrones de precipitación para Puerto Rico incidirán directamente en una reducción en los flujos de las aguas superficiales (Van Beusekom, et. al., 2015). En la medida que aumenten los días con flujos menores a los ya registrados se reducirá el rendimiento seguro de las tomas en los ríos. De igual forma según aumente la intensidad de los eventos de sequía y su duración, se afectará el rendimiento seguro de los embalses. Los cambios en términos de flujo en nuestra red hidrográfica requerirán estudios adicionales para revisar estrategias de manejo de las aguas existentes e identificar recomendaciones de manejo y conservación apropiadas para las nuevas realidades hidrográficas en las décadas subsiguientes.

3. *Impactos a la biodiversidad ribereña, estuarina y de humedales* – Debido al aumento en las temperaturas y los cambios en los patrones de precipitación, junto con el incremento en el nivel promedio del mar, se prevén cambios en los patrones de evapotranspiración, humedad relativa del suelo, temperatura y salinidad de las aguas dulces en los acuíferos costeros, entre otros. Dichas alteraciones incidirán en cambios de los ecosistemas ribereños, estuarinos y costeros, particularmente a los ecosistemas de bosques de mangles (Snedaker, 1995; Gilman, 2008). Resulta necesario y urgente que el Consejo de Cambio Climático de Puerto Rico realice estudios más precisos para conocer el grado de impacto que los cambios climáticos tendrán sobre los mismos.

4. *Mayor presión de uso sobre el recurso* – Los aumentos en las temperaturas promedio, así como el aumento en los días con temperaturas máximas, redundarán en un aumento en la demanda de agua, tanto para consumo doméstico como en las actividades agrícolas. Un mayor uso de los cuerpos de agua superficiales para actividades recreativas y de ocio redundará en mayores presiones sobre los ecosistemas acuáticos. Los aumentos en demandas de agua para actividades humanas pondrán presiones para satisfacer las necesidades ecológicas de la biota asociada a ecosistemas ribereños, estuarinos y costero, afectando sus ciclos de vida. Las reducciones proyectadas en precipitación y flujo de agua requieren una mirada más exhaustiva y holística para comprender mejor las implicaciones de estos cambios para el manejo de las aguas en Puerto Rico en las próximas décadas (Henareh Khalyani, et. al., 2016).

5. *Intrusión salina en acuíferos* - El aumento en el nivel promedio del mar generará impactos en los acuíferos de la costa norte y costa sur mediante la intrusión de la cuña de agua salada, la cual ocupa el espacio del agua dulce en los acuíferos, afectando directamente a aquellos pozos que se encuentren cercanos a la zona de transición de agua dulce y salada. En términos generales, reconociendo el impacto negativo que tendrá el aumento en el nivel del mar sobre los acuíferos habilitando procesos de intrusión salina, la sobreexplotación del recurso repercute como elementos que inciden aún más en la vulnerabilidad de los recursos acuíferos (Ferguson y Gleeson, 2012). Se requiere más investigación sobre el impacto del cambio climático sobre los

- acuíferos de Puerto Rico, incluyendo los impactos de intrusión salina por aumento en el nivel del mar.
6. *Aumento en demanda de uso de aguas subterráneas* – Los cambios en los patrones de precipitación incidirán en la disponibilidad de agua de fuentes superficiales, y potenciaría una reducción en la recarga de los acuíferos en todo el planeta (Taylor, et. al., 2013). Para Puerto Rico, se prevé un aumento en la extracción de aguas subterráneas como alternativa para satisfacer la demanda de agua ante las inconsistencias de abasto de las fuentes de los embalses y tomas de ríos. Esto particularmente en la región sur, cuyos acuíferos ya presentan problemas de contaminación y reducción de abasto disponible (Torres-González y Rodríguez, 2016). Considerando además el impacto que generará el aumento del nivel promedio del mar en los acuíferos por intrusión salina, resulta imprescindible fortalecer estrategias de conservación y manejo de los acuíferos para garantizar su uso sostenible.
 7. *Cambios en evapotranspiración* – Aumentos en las temperaturas promedio sumado a los cambios en los patrones de precipitación, generarán variaciones en la evapotranspiración en las diferentes zonas climáticas de Puerto Rico bajo diferentes escenarios climáticos (Harmsen, et. al., 2009). Se esperan aumentos en los niveles de evapotranspiración en aquellas regiones que registren mayores temperaturas y cambios nulos o negativos en los patrones de precipitación (Henareh Khalyani, et. al., 2016). A medida que se refuercen los modelajes climáticos a escala para Puerto Rico y tengamos datos más precisos sobre las proyecciones de cambios en precipitación, contaremos con información más precisa en cuanto a los cambios esperados en la evapotranspiración en las diferentes zonas de vida del país.
 8. *Cambios en la humedad relativa del suelo* – Al igual que los cambios en evapotranspiración, la humedad relativa del suelo en Puerto Rico se verá afectada por las transformaciones de los patrones de precipitación en conjunto a los aumentos en las temperaturas promedio y en la incidencia de días con temperaturas altas (Harmsen, et.al., 2009; Henareh Khalyani, et. al., 2016). Estos cambios tendrán implicaciones en las actividades agrícolas y en consecuencia en el consumo de agua que requerirán los cultivos afectados por estos cambios. De igual forma, se pueden generar alteraciones en la flora de ciertos ecosistemas.

9. *Mayores probabilidades de eventos de inundaciones costeras y urbanas* – El aumento progresivo del nivel promedio del mar, sumado al aumento en los eventos de precipitación extrema, incrementará las probabilidades de observar eventos de inundaciones costeras y urbanas con mayor recurrencia e intensidad, aumentando nuestra exposición y vulnerabilidad a dichos (Reguero, et. al, 2015). Este elemento requiere una revisión de los modelos de inundaciones utilizados al presente para guiar la toma de decisiones de usos de terrenos a nivel estatal y municipal, adoptando modelos como HAZUS-MH que permitan brindar mayor y mejor información para la toma de decisiones en torno al manejo integral de las aguas, así como la planificación de nuestro territorio y el manejo de emergencias. De igual forma, esta información resulta imprescindible para adecuar la infraestructura de control de inundaciones y las acciones de manejo que se realizan en los ríos y quebradas de Puerto Rico, en aras de proteger el bienestar, salud, seguridad, vida y propiedad de nuestros habitantes.
10. *Potencial aumento en sedimentación de embalses, ríos y quebradas* – Como se discutirá en los capítulos subsiguientes, los eventos de precipitación extrema son los principales potenciadores de las grandes descargas de sedimentos que discurren por los ríos y quebradas, sedimentando nuestros embalses y afectando los ecosistemas marinos y costeros. Aun cuando los patrones de usos de terrenos y la cobertura de terrenos en las cuencas hidrográficas son parte importante en el comportamiento de los flujos de agua en Puerto Rico (Van Beusekom, et. al., 2014), un aumento en los eventos de precipitación extrema en terrenos con poca cobertura vegetal agravará los impactos que las grandes descargas de sedimentos suspendidos tienen sobre los cuerpos de agua superficiales, así como en los arrecifes de coral, estuarios y demás ecosistemas marinos y costeros.

Estos eventos tendrán su efecto en el recurso agua y su disponibilidad, lo cual planteará retos muy serios en su uso, manejo y conservación. En ese sentido, es medular como parte del ejercicio de planificación del Plan de Aguas reconocer las consecuencias posibles que puede tener el cambio climático sobre el recurso agua en Puerto Rico e incorporar la información disponible en las estrategias recomendadas. Igualmente, las consecuencias del Cambio Climático que ya se manifiestan (i.e. aumentos en la temperatura, más días de calor, nuevos récords de temperatura alta, cambios en patrones de precipitación) refuerzan el carácter ineludible de las acciones dirigidas al uso y aprovechamiento eficiente y sostenible del

recurso, la protección y conservación de las cuencas hidrográficas, las áreas de recarga de los acuíferos y de los sistemas naturales asociados al agua.

Referencias

- Blunden, J. y Arndt, D.S. (Eds.) 2015. *State of the Climate in 2014*. Bulletin of the American Meteorological Society. 96 (7), 1–267.
- Boyd, et al. (2015). *Intended nationally determined contributions: what are the implications for greenhouse gas emissions in 2030?* ESRC Centre for Climate Change Economics and Policy, Grantham Research Institute on Climate Change and Environment. www.lse.ac.uk/GranthamInstitute/wp-content/uploads/2015/10/Boyd_Turner_and_Ward_policy_paper_October_2015.pdf Página accedida en diciembre 2015.
- Church, J.A., et al. (Eds.). (2013). Sea Level Change. En Stocker, T.F., et al. (Eds.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Climate Institute. (2007) *Aumento del Nivel del Mar*. <http://www.climate.org/topics/sea-level/index-espanol.html>. Página accedida en diciembre 2015
- Collins, et al. (Eds.). (2013). *Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility*. In Stocker, T.F., et al. (Eds.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Cook, et al. (2013). *Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature*. Environmental Research Letters. 8, 1-7.
- Dlugokencky, E. and Tans, P. (2015). *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*. NOAA Earth System Research Laboratory, Global Greenhouse Gas Reference Network. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>. Página accedida en enero 2016.
- Ferguson, G. y Gleeson, T. (2012). *Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change*. Nature Climate Change. 2, 343-345.
- Flato, G., et. al. (Eds.). (2013). *Evaluation of climate models*. En Stocker, T.F., et. al. (Eds.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Gilman, E., et. al. (2008). *Threats to mangroves from climate change and adaptation options: a review*. Aquatic Botany. 89(2), 237-250.

GISSTEMP Team. (2015). *GISS Surface Temperature Analysis (GISSTEMP)*. NASA Goddard Institute for Space Studies. <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>. Página accedida en enero 2016.

Harmsen, E., et.al. (2009). *Seasonal climate change impacts on evapotranspiration, precipitation deficit and crop yield in Puerto Rico*. *Agricultural Water Management*. 96 (7), 1085-1095.

Hayhoe, K. (2013). *Quantifying key drivers of climate variability and change for Puerto Rico and the Caribbean*. https://s3.amazonaws.com/IndividualGISdata/PDFs/KatherineHayhoe_CaribbeanFinalReport.pdf. Página accedida en diciembre 2015.

Hayhoe, K. y Stoner, A. (2015). *Attachment A: Climate change projections for the District of Columbia*. In Department of Energy and Environment. *Climate Projections and Scenario Development: Climate Change Adaptation Plan for the District of Columbia*. http://doee.dc.gov/sites/default/files/dc/sites/ddoe/publication/attachments/Attachment%201%20ARC_Report_07-10-2015.pdf Página accedida en mayo 2016.

Henareh Khalyani, A., et. al. (2016). *Climate change implications for tropical islands: interpolating and interpreting statistically downscaled GCM projections for management and planning*. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 55 (2), 265-282.

IPCC. (2012). *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*. Cambridge University Press. Cambridge.

IPCC. (2014). *Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf. Página accedida en diciembre 2015.

Martínez, O. (2015). *2015 Review for Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands*. NOAA National Weather Service Weather Forecast Office San Juan, Puerto Rico. www.srh.noaa.gov/images/sju/climo/monthly_reports/2015/2015Summary.pdf. Página accedida en enero 2016.

Melillo, J. M., Terese, R., y Yohe, G. (Eds.). (2014). *Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment*. U.S. Global Change Research Program, 841 pp. doi:10.7930/J0Z31WJ2

Mercado, A. (2015). *Monthly means San Juan sea level rise (from April 1962)*. Datos Provistos por el Dr. Aurelio Mercado y tomados del mareógrafo de NOAA 9755371.

Mercado A. (2015b). *Monthly means Magueyes Island sea level rise (from January 1955)*. Datos provistos por el Dr. Aurelio Mercado y tomados del mareógrafo de NOAA 9759110.

NOAA. (2015). *Climate at a glance*. NOAA National Centers for Environmental Information. https://www.ncdc.noaa.gov/cag/time-series/global/globe/land_ocean/ytd/11/1880-2015. Página accedida en enero 2016.

NOAA. (2015b). *Mean sea level trend 9755371 San Juan, Puerto Rico*. NOAA tides and currents. http://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?stnid=9755371. Página accedida en diciembre 2015.

NOAA. (2015c). *Mean sea level trend 9759110 Magueyes Island, Puerto Rico*. NOAA tides and currents. http://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?stnid=9759110 Página accedida en diciembre 2015.

NWS. (2015). *Map of Puerto Rico and USVI Mean Annual Rainfall (1971-2000)*. NOAA National Weather Service Weather Forecast Office San Juan, Puerto Rico. http://www.srh.noaa.gov/sju/?n=climo_annual01. Página accedida en enero 2016.

NWS. (2015b). *Map of Puerto Rico and USVI Mean Annual Rainfall (1981-2010)*. NOAA National Weather Service Weather Forecast Office San Juan, Puerto Rico. http://www.srh.noaa.gov/sju/?n=mean_annual_precipitation2. Página accedida en enero 2016.

Pourmokhtarian, A., et. al. (2016). *The effects of climate downscaling technique and observational dataset on modeled ecological responses*. Ecological Applications. doi:10.1890/15-0745

PRCCC. (2013). *Estado del Clima de Puerto Rico 2010-2013: Evaluación de vulnerabilidades socio-ecológicas en un clima cambiante*. San Juan. Consejo de Cambio Climático de Puerto Rico, Programa de Manejo de la Zona Costanera, Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, Oficina de Océanos y Recursos Costeros (NOAA-OCRM).

Reguero, B., et. al. (2015). *Effects of climate change on exposure to coastal flooding in Latin America and the Caribbean*. PLoS One. doi:10.1371/journal.pone.0133409

Snedaker S. (1995). *Mangroves and climate change in the Florida and Caribbean region: scenarios and hypotheses*. Hydrobiologia. 295, 43-49.

Taylor, R. G., et. al. (2013). *Ground water and climate change*. Nature Climate Change. 3, 322-329.

Torres-González, S. y Rodríguez, J. (2016). *Hydrologic conditions in the south coast aquifer, Puerto Rico, 2010-15*. United States Geological Survey Open-File Report 2015-1215, 32. DOI: 10.3133/ofr20151215

UNEP. (2008). *Climate Change in the Caribbean and the challenge of Adaptation*. www.pnuma.org/deat1/pdf/Climate_Change_in_the_Caribbean_Final_LOW20oct.pdf. Página accedida en enero 2016.

United Nations. (2015). *Adoption of the Paris Agreement*. United Nations Framework Convention on Climate Change Conference of the Parties, Twenty-first session. <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>. Página accedida en diciembre 2015.

Van Beusekom, A. E., et. al. (2014). *The effects of changing land cover on streamflow simulation in Puerto Rico*. Journal of the American Water Resources Association. 50 (6), 1575-1593.

Van Beusekom, A. E., et. al. (2015). *Climate change and water resources in a tropical island system: propagation of uncertainty from statistically downscaled climate models to hydrologic models*. International Journal of Climatology. DOI: 10.1002/joc.4560

van Oldenborg, G.J., et al. (Eds.). (2013). *Annex I: Atlas of global and regional climate projections*. In In Stocker, T.F., et al. (Eds.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

van Vuuren, D. P., et al. (2011). *The representative concentration pathways: An overview*. Climatic Change. 109 (1-2), 5-31.

Werner, A. D. y Simmons, C. T. (2009). *Impact of sea-level rise on sea water intrusion in coastal aquifers*. Ground Water. 47, 197–204.

Zhang, C., et. al. (2016). *Dynamical downscaling of the climate for the Hawaiian Islands. Part I: Present day*. Journal of Climate. 29(8), 3027-3048.



PLAN INTEGRAL DE RECURSOS DE AGUA

CAPÍTULO 3

El recurso agua en Puerto Rico

RESUMEN

Este capítulo presenta una descripción general de las características climatológicas e hídricas de Puerto Rico; así como una descripción de los hábitats y organismos presentes en los cuerpos de agua de Puerto Rico. También se describen los patrones de aprovechamiento de los puertorriqueños y se explica el concepto de rendimiento seguro de las fuentes de abasto.

TABLA DE CONTENIDO

3.1	Introducción	1
3.2	El Clima.....	1
3.2.1	Fenómeno ENSO: El Niño y La Niña.....	1
3.2.2	Ondas y Ciclones Tropicales	4
3.2.3	Frentes fríos.....	5
3.2.4	La precipitación	5
3.2.4.1	Sequía.....	8
3.2.4.2	Inundaciones.....	13
3.3	Ciclo hidrológico.....	14
3.3.1	Escorrentía superficial	15
3.4	Los cuerpos de agua.....	17
3.4.1	Ríos	17
3.4.2	Embalses y lagunas.....	21
3.4.2.1	Red de Monitoreo Superficial	25
3.4.3	Agua subterránea	27
3.4.3.1	Acuíferos de la Costa Norte.....	28
3.4.3.2	Acuíferos aluviales.....	31
3.4.3.2.1	Acuíferos de la Costa Sur	33
3.4.3.4	Acuíferos de los valles interiores.....	35
3.4.3.5	Red de Monitoreo de Agua Subterránea.....	36
3.4.4	Estuarios	37
3.5	Ecosistemas de agua dulce	39
3.5.1	Ecosistemas estuarinos	39
3.5.2	Zona ribereña	40
3.5.3	Los Humedales	47
3.5.4	La fauna	48
3.5.5	Ciclos de vida	52
3.5.5.1	Conectividad de los ecosistemas.....	56
3.5.6	Embalses o lagos artificiales	58
3.6	Uso de agua en Puerto Rico	60
3.6.1	El concepto de rendimiento seguro	62

3.6.2	Requerimiento de caudales ambientales	63
3.6.3	Rendimiento seguro de tomas superficiales	66
3.6.4	Rendimiento seguro de embalses	67
3.6.5	Rendimiento seguro de los principales acuíferos.....	69
3.7	Enfoque para mejorar la disponibilidad del recurso	70
3.7.1	Huella hídrica - indicador de uso	72
	Referencias.....	75

3.1 Introducción

En Puerto Rico el recurso agua varía significativamente en su distribución temporal y espacial. La combinación de la variabilidad en su disponibilidad, junto con la demanda creciente por su uso y las ineficiencias en su aprovechamiento, han hecho del agua un recurso que experimenta escasez. El flujo máximo en los ríos de Puerto Rico es aproximadamente 1,000 veces mayor que el flujo mínimo. Una parte sustancial del agua fluye hacia el mar a consecuencia de las crecidas grandes, mientras que durante el estiaje los caudales disminuyen drásticamente. Este capítulo presenta una descripción general de las características climatológicas e hídricas de Puerto Rico; así como una descripción de los hábitats y organismos presentes en los cuerpos de agua de Puerto Rico. También se describen los patrones de aprovechamiento de los puertorriqueños y se explica el concepto de rendimiento seguro de las fuentes de abasto.

3.2 El Clima

Existen varios fenómenos naturales que regulan el clima de Puerto Rico tales como: El Niño y La Niña (ENSO¹), la oscilación del Atlántico Norte, los vientos alisios, las ondas, depresiones tropicales y los huracanes. A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de ellos.

3.2.1 Fenómeno ENSO: El Niño y La Niña

El ENSO consta de dos fases, El Niño (aguas cálidas) y La Niña (aguas frías). Estos son fenómenos naturales que resultan de las interacciones entre la superficie del océano y la atmósfera sobre el Océano Pacífico tropical. El Niño se vincula al calentamiento periódico de las temperaturas superficiales del océano en el Pacífico ecuatorial central y este-central, con una recurrencia de 2 a 7 años. En cambio, el fenómeno de La Niña hace referencia al enfriamiento periódico de las temperaturas superficiales del océano en la parte central y este-central ecuatorial del Pacífico que ocurre aproximadamente cada 3 a 5 años (NOAA,

¹ ENSO – El Niño Southern Oscillation.

2012). Un evento de Niño o Niña se declara luego de 5 meses consecutivos de una anomalía superior de 0.5°C en la temperatura superficial del océano y suele durar de 9 a 12 meses (Niño), y de 1 a 3 años (Niña) (NOAA, 2010).

Estos cambios en las temperaturas superficiales del océano afectan los patrones de precipitaciones tropicales, vientos atmosféricos y las corrientes oceánicas. El ENSO tiende a desarrollarse durante los meses de marzo-junio, alcanzando su intensidad máxima entre los meses de diciembre-abril. Grandes inundaciones y sequías han sido asociadas con este evento.

Se conocen como ENSO-neutral los períodos en que ni El Niño ni La Niña están presentes. Estos periodos suelen coincidir con la transición entre los fenómenos de El Niño y La Niña. Durante los períodos de ENSO-neutral las temperaturas del océano, los patrones de precipitaciones tropicales y vientos atmosféricos sobre el Océano Pacífico ecuatorial están cerca del promedio a largo plazo (NOAA, 2012). En la región del Caribe, los periodos con lluvia menor de lo normal coinciden con variaciones en el fenómeno El Niño durante el invierno y una reducción en el número e intensidad de los huracanes.

Un estudio publicado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) Oficina de Pronóstico del Servicio Nacional de Meteorología en *San Juan*

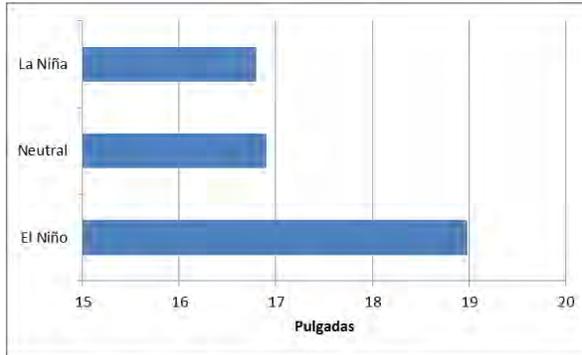


Desborde del río Cibuco en el cruce entre la PR 2 y la PR 52, 2006. Fuente: DRNA.

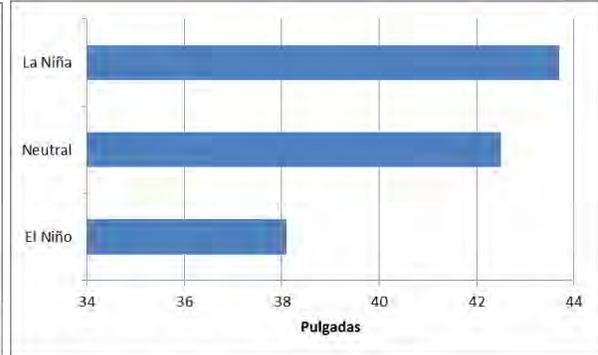
titulado *“The Local Impacts of ENSO across the Northeastern Caribbean”* evaluó los impactos locales de ENSO asociados a la precipitación y temperatura en Puerto Rico y las Islas Vírgenes de EE.UU. Se seleccionaron 16 lugares de observación con un periodo de 55 años de datos. Los resultados indican que durante la época seca ² hay una

² La estación seca se define como los meses de diciembre a abril.

precipitación acumulada significativamente mayor (13%) durante años de El Niño frente a años de La Niña (véase Gráfica 3.1). En cambio, durante la época de lluvia³, se registró un alza de un 14% en la precipitación acumulada durante eventos de La Niña (véase Gráfica 3.2). Sin embargo, los valores promedios de lluvia son característicos durante periodos de ENSO neutral⁴ (NOAA, 2010).

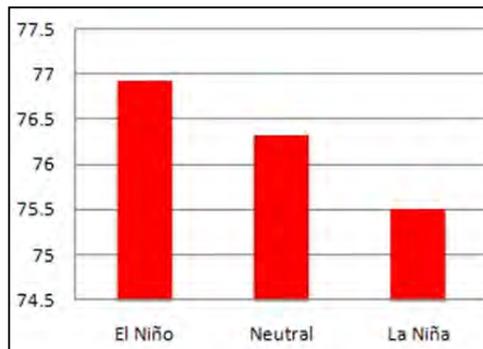


Gráfica 3.1 Precipitación en estación seca. Fuente: Adaptado de NOAA, 2010.

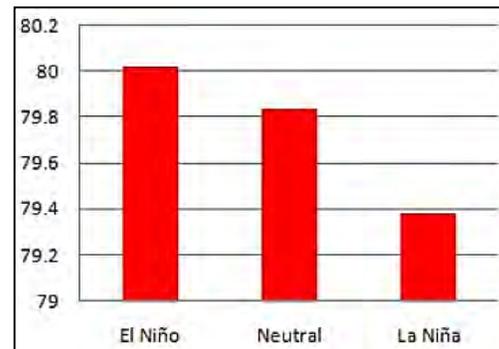


Gráfica 3.2 Precipitación en temporada de lluvia. Fuente: Adaptado de NOAA, 2010.

En el caso de las temperaturas, también se encontraron diferencias. Independientemente de la temporada, las temperaturas eran aproximadamente 0.5°F por encima de lo normal durante los eventos de El Niño y 0.5°F por debajo de lo normal durante los eventos de La Niña, según se observa en las Gráficas 3.3 y 3.4 (NOAA, 2010).



Gráfica 3.3 Temperatura °F promedio en estación seca. Fuente: NOAA, 2010.



Gráfica 3.4 Temperatura °F promedio en temporada de lluvia. Fuente: NOAA, 2010.

³ Temporada de lluvia se define como los meses de mayo a noviembre.

⁴ Año en el que al menos el 70% de los meses de la temporada no se define ya sea como El Niño o La Niña.

Este estudio confirma que, a nivel climático, el ENSO juega un papel importante sobre la temperatura del aire y los patrones de precipitación, lo que a su vez influye sobre otras variables, como la cantidad de nubosidad, la radiación y el brillo solar. Esto tendrá un efecto sobre los cuerpos de agua, la humedad del suelo, la flora y fauna de Puerto Rico.

3.2.2 Ondas y Ciclones Tropicales

Los ciclones tropicales son sistemas que se forman como consecuencia del fortalecimiento de las ondas del este, que también se conocen como ondas tropicales. Éstos se clasifican de acuerdo a la intensidad de sus vientos sostenidos en: depresión tropical⁵, tormenta tropical⁶ y huracán.

La onda tropical (Onda del Este) es un área de baja presión asociada con grandes extensiones de nubes y lluvias que se desplazan hacia el oeste a través de los vientos alisios por todo el cinturón tropical del hemisferio Norte, de los 0° hasta los 25° Norte (DEDM, 2015). Las ondas tropicales se forman por las perturbaciones en los vientos de la tropósfera baja al noroeste de África. Este tipo de sistema es el principal productor de lluvia durante los meses de junio a octubre. Un promedio de 60 ondas tropicales son generadas anualmente (NOAA, 2014).

El huracán es un sistema ciclónico que desarrolla vientos sostenidos desde las 74 mph los cuales están organizados en un anillo alrededor de un centro de relativa calma, que se llama el “*centro u ojo*” del huracán (AEMEAD). Los huracanes traen consigo una serie de efectos tales como: fuertes vientos, marejada ciclónica⁷, trombas marinas, tornados, lluvias torrenciales, tronadas severas, inundaciones y deslizamientos de terreno. En Puerto Rico, la temporada de huracanes comienza el 1^{ro} de junio y culmina el 30 de noviembre, siendo septiembre el mes más activo. La trayectoria de los huracanes principales que han afectado a Puerto Rico durante el periodo de 1893 al 2011, se representa en la Ilustración 3.1.

⁵ Es un sistema organizado, considerado como un ciclón en su fase formativa de mínima intensidad con vientos máximos de 38 mph (33 nudos) o menos, (Colón, 2009; AEMEAD).

⁶ Es un ciclón tropical bien definido y organizado; los vientos máximos son de 74 mph (64 nudos) o más (Colón, 2009).

⁷ Es el aumento total en el nivel del mar generado por un huracán, (AEMEAD).

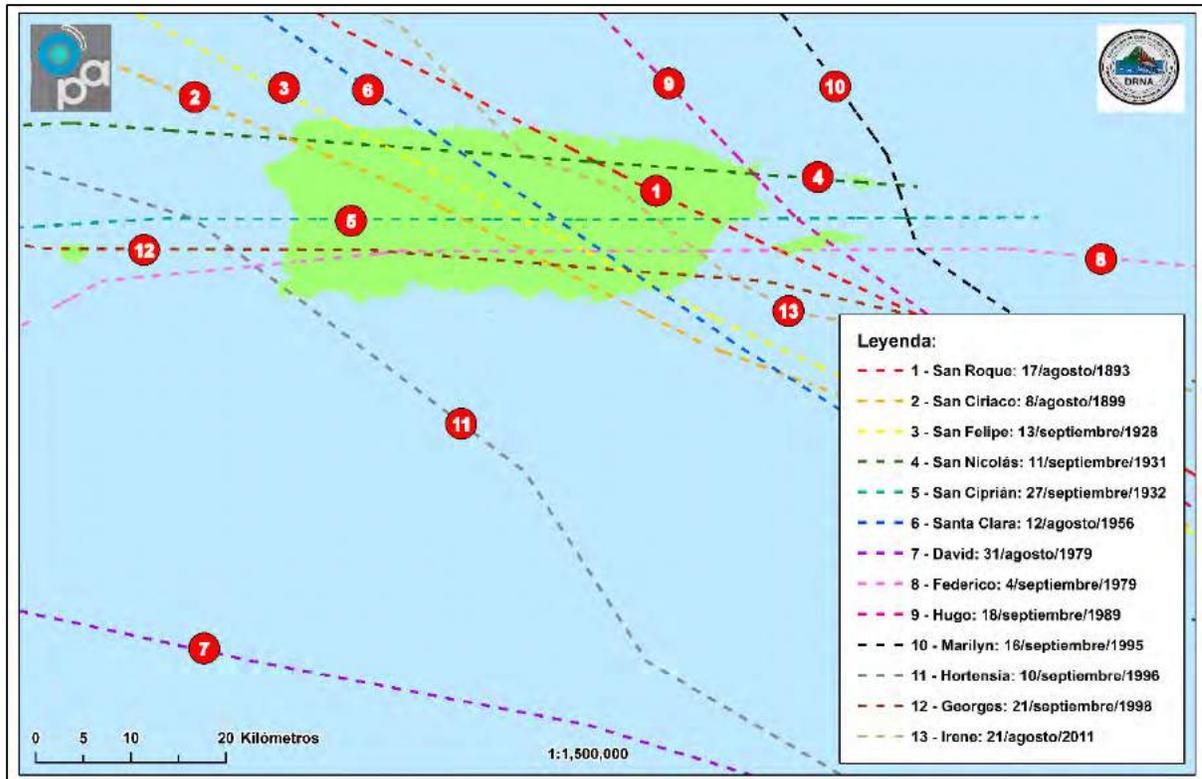


Ilustración 3.1 Huracanes principales que han afectado a Puerto Rico (1893-2011). Fuente: Colón Torres, José A., 2011 y DRNA.

3.2.3 Frentes fríos

El frente frío marca el borde delantero de una masa de aire con temperatura baja, usualmente de origen polar, que se mueve en dirección al Ecuador. Cuando esos frentes llegan hasta el área de Puerto Rico e Islas Vírgenes, causan uno o dos días de nubosidad con aguaceros, a veces acompañados de vientos fuertes del noreste. El cambio de temperatura que causan se nota más en la temperatura mínima nocturna que en la máxima diurna. La precipitación que propician consiste por lo general en lloviznas semifuertes y semicontinuas.

3.2.4 La precipitación

La Isla experimenta una variación significativa respecto a la distribución espacial y temporal de la precipitación pluvial y la escorrentía resultante. El patrón geográfico de la lluvia en Puerto Rico presenta un contraste entre la costa norte, con unas 70 pulgadas de lluvia anual, y la costa sur, con unas 35 pulgadas (véase Ilustración 3.2). Esta variación geográfica en la

lluvia corresponde, en gran parte, al efecto orográfico, debido a la influencia de las montañas sobre los vientos. El patrón clásico de precipitación orográfica se ilustra en la Ilustración 3.3, señalando que los vientos alisios encuentran la barrera de la montaña, suben para cruzarlas, enfriándose y liberando precipitación en el proceso. Luego, el aire seco avanza hacia el lado opuesto de la montaña creando una “sombra de lluvia”. Este patrón representa, en forma generalizada, uno de los factores principales que explica el aumento de la precipitación con la elevación en Puerto Rico y la presencia de condiciones más secas en la costa sur.

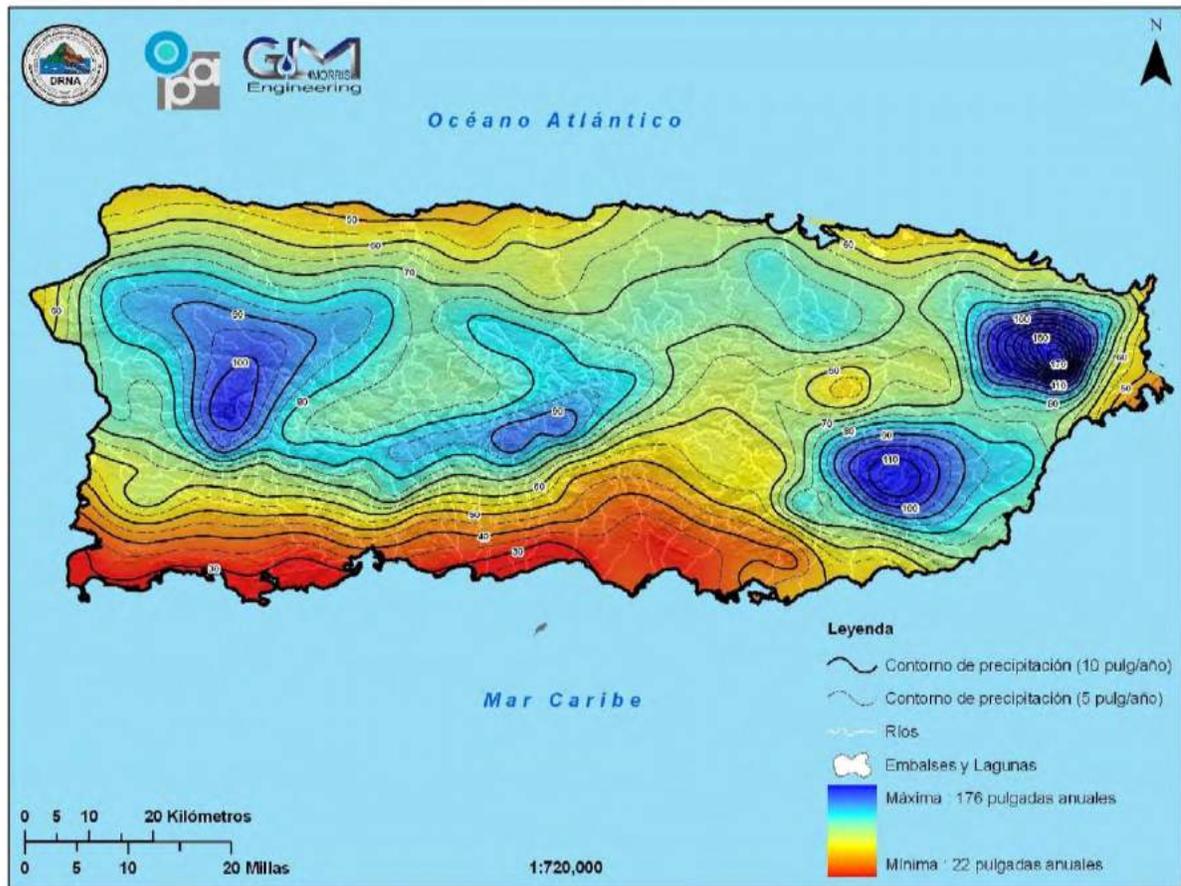


Ilustración 3.2 Patrón geográfico de lluvia promedio en Puerto Rico. Fuente: DRNA, 2009.

La precipitación en Puerto Rico presenta un patrón estacional. La Gráfica 3.5 permite observar que el mes de mayo y el período de agosto a noviembre se caracterizan por una precipitación relativamente alta mientras que el periodo de estiaje de enero a marzo es mucho más seco. La reducción normal de lluvia y caudal en los ríos durante el estiaje no debe confundirse con eventos de sequía.

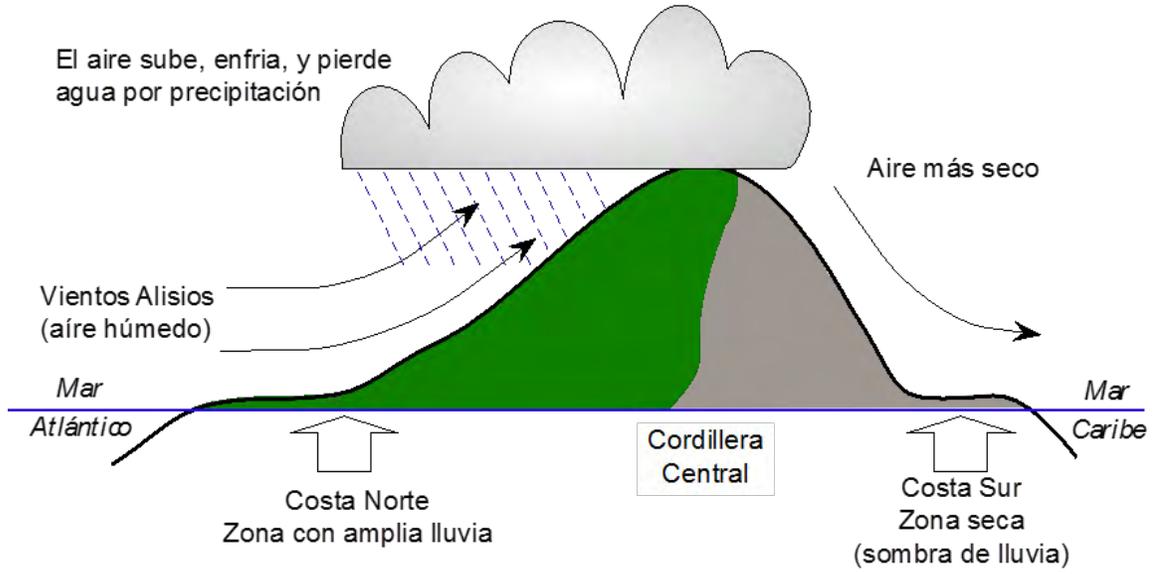
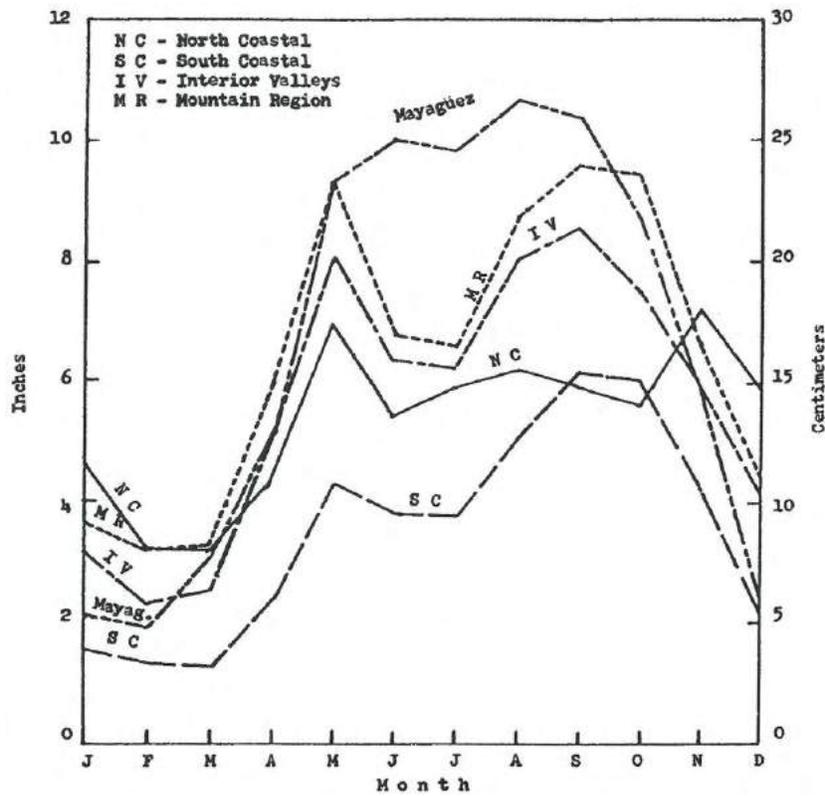


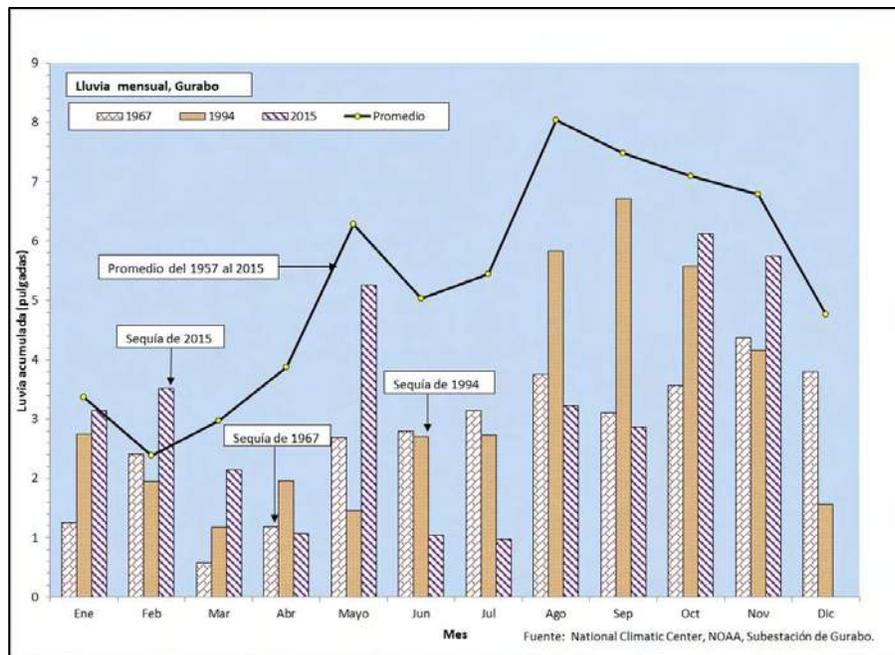
Ilustración 3.3 Precipitación orográfica. (Colón, 2009).



Gráfica 3.5 Lluvia promedio en Puerto Rico. Fuente: Capiel and Calversbert, 1976.

3.2.4.1 Sequía

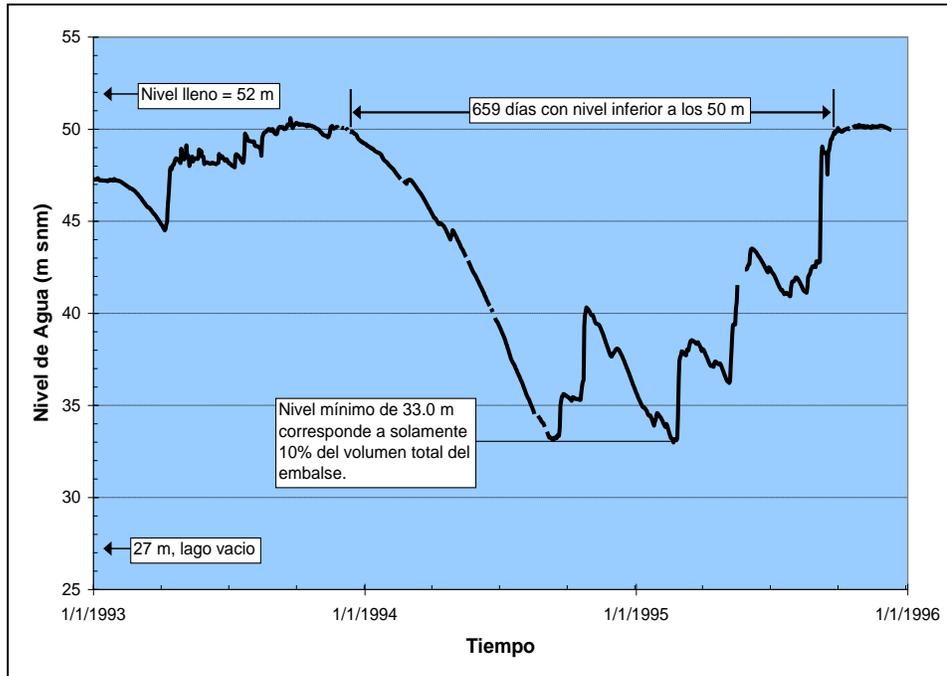
Las sequías corresponden a periodos cuando la humedad es sustancialmente menor a lo normal. Las más impactantes en Puerto Rico pertenecen a una reducción marcada en la lluvia durante los periodos del año normalmente húmedos. La Gráfica 3.6 muestra la precipitación para los años secos de 1967, 1994 y 2015 de la Subestación de Gurabo y los compara con los datos de precipitación promedio de la misma estación. Los patrones en años de sequía son distintos al promedio; las sequías registradas en Puerto Rico normalmente se inician al faltar las lluvias que caen entre mayo y septiembre, como se puede apreciar de los datos de lluvia del año 1994.



Gráfica 3.6 Comparación de la precipitación en años de sequía (1967, 1994 y 2015) con el promedio desde 1957 al 2015, Subestación de Gurabo, cuenca del Embalse Loíza. Fuente: National Climatic Center, NOAA, Subestación de Gurabo. Nota: El dato de precipitación de diciembre de 2015, no está disponible.

Las sequías en Puerto Rico que afectan a los abastos de agua usualmente se inician con la reducción en las lluvias durante los meses de abril y mayo, por esto los embalses no se llenan antes de entrar al verano, ya que es un periodo de poca lluvia. La sequía de 1967-68, que posee el récord de mayor severidad en el este interior de la isla, no propició la precipitación necesaria para llenar los embalses antes de finalizar el año. Durante este periodo, el embalse Loíza no alcanzó a llenarse a capacidad, a pesar de haberse reducido sustancialmente la tasa de extracción. En la sequía de 1994-95 el embalse Loíza se llenó, pero La Plata no alcanzó el

nivel máximo de capacidad por un periodo de casi dos años, según se muestra en la Gráfica 3.7. Para la sequía de 2015 se tuvo que entrar en el racionamiento de mayor severidad hasta la fecha, con servicio de agua solamente dos días por semana en la última etapa del racionamiento para los 160,000 abonados del embalse Loíza.



Gráfica 3.7 Niveles de agua del embalse De La Plata (1993-1996). Fuente: Servicio Geológico Federal.

En la Tabla 3.1 se muestran las cuatro últimas sequías registradas donde se ha visto una merma significativa de lluvia, con los factores de incidencia, impactos asociados más significativos y la respuesta ante estos eventos por parte del Gobierno. El promedio menor de lluvias anuales traducido en años, con las sequías más prominentes, ocurrió en 1967, seguido de 1994, 2015 y 1976.



Estructura en el Embalse Loíza, expuesta por sequía. Foto tomada el 10 de agosto de 2015. Fuente DRNA.

PLAN INTEGRAL DE RECURSOS DE AGUA
JUNIO, 2016

Efectos	1964-67	1973-76	1994-97	2015
Factores de incidencia	Reducción de un 30% del promedio anual de lluvia. Tan sólo cayeron 43.2 pulgadas de lluvia en 1967. Entre 1966 a 1968, cayó un promedio de 54.4 pulgadas de lluvia.	Periodo de lluvia bajo lo normal con sólo 46.8 pulgadas en 1976 de cantidad de lluvia registrada. La lluvia de mayo y junio de 1974 estuvo cerca de 60% bajo lo normal.	Reducción de la lluvia promedio anual con 53.9 pulgadas por año entre 1993 y 1995. Solo 45.0 pulgadas cayeron en 1994.	Año muy caluroso. Reducción de la lluvia (sólo cayeron 51.64 pulgadas a nivel isla). En el este interior cayó un promedio de 60.39 pulgadas de lluvia.
Impactos asociados	El embalse Loíza no alcanzó a llenarse por más de un año. Afectó principalmente la parte este de la Isla, sin tener efecto significativo en la zona oeste.	Racionamiento de agua potable en la zona metropolitana de San Juan. Afectó principalmente la parte norte y este de la Isla.	Pérdidas en la economía de aproximadamente \$300 millones, de los cuales \$165 millones fueron en la agricultura.	Racionamiento en el área Metro, sectores del área sur y sectores del este. Segmentos de bosques de manglares se secaron. Mortandad significativa de peces en el embalse La Plata. Migración de manatíes fuera de la Reserva Natural Estuarina de Jobos.
	Problemas en la agricultura de la zona sur de la Isla.		Se afectó la Isla completa y fue particularmente severa en el río Grande de Manatí y el de Arecibo. Reducción en el caudal de entrada en los embalses Loíza y De La Plata.	Efectos significativos en la agricultura de la zona central y región este. Impacto severo en el caudal de entrada en los embalses Loíza, La Plata y ríos de la región este y noreste.
Respuesta	Proyecto de lluvia artificial en el sur de la Isla (1965) y en la cuenca del embalse Loíza (1967).	Identificación de lugares para posibles embalses.	Construcción del Súper Acueducto del Norte.	Proyecto de lluvia artificial en las cuencas del embalse Loíza y La Plata. Adopción del Protocolo para el Manejo de Sequía en Puerto Rico. Desarrollo de Herramienta sobre Tendencia a Sequía en Cuencas
			Proyecto del Dragado del embalse Loíza (Represa Carraízo)	
			Autorización de hincado de pozos para uso doméstico e industrial alrededor de la Isla.	

Fuente: Elaborado por DMPA con información de Colón, 2009; DRNA, 2004 y Comité Científico de Sequía - DMPA 2015.

Según los datos de 40 estaciones pluviométricas de la NOAA alrededor de la Isla, se ha identificado que a partir de 1950 ocurrieron 9 de los 10 años con menor lluvia durante el siglo 20 (véase Tabla 3.2). Sin embargo, debido a que la severidad de la sequía varía de una parte de la Isla a otra, estos datos no reflejan el efecto severo que puede tener una sequía en alguna cuenca en particular. Es decir, la severidad de la sequía en una cuenca en particular puede ser peor que la ilustrada como el promedio para toda la Isla.

Ante la reducción en la lluvia y los abastos de agua en varias regiones que afectaron diversos sectores del país en el 2014, el gobierno comenzó a tomar medidas de prevención. Como iniciativa principal se desarrolló y adoptó el Protocolo para el Manejo de Sequía en Puerto

Rico, donde se estableció un Comité Ejecutivo (CE) para el análisis de los patrones de lluvia y condición de sequía para informar sobre ello al Gobernador y asesorarle sobre las acciones que se deben realizar. A su vez, el CE nombró un Comité Científico (CC) compuesto por un grupo de expertos con diversos trasfondos para que hicieran el análisis científico y técnico de los datos disponibles (incluyendo hidrológico, meteorológico y biológico), así como los pronósticos y perspectivas climatológicas realizados por la Oficina de Pronóstico del Servicio Nacional de Meteorología de EEUU.

Tabla 3.2 Los diez años con menor lluvia en Puerto Rico

Orden de Severidad	Año	Lluvia anual promedio de 40 estaciones (pulgadas)
1	1967	44.31
2	1994	46.79
3	1997	49.51
4	1976	49.93
5	1991	50.49
6	2015	51.64
7	1957	53.47
8	1947	54.77
9	1973	54.94
10	2000	58.04

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología.

En este proceso se identificó la necesidad de conocer el comportamiento de los cuerpos de agua a largo plazo. Por tal razón en el 2014, el DRNA desarrolló una herramienta para determinar la condición hidrológica en la que se encuentra una cuenca en comparación con las condiciones hidrológicas históricas. La herramienta de Monitoreo de Aguas Superficiales en Cuencas Principales de Puerto Rico utiliza como base los datos de flujo de los ríos con por lo menos 20 años de datos según se registran en las estaciones de aforo que opera el USGS.

En la Ilustración 3.4, se observan las condiciones hidrológicas del año 1994 y se contrasta con lo observado durante el 2015. Los datos revelan que la sequía de 1994 fue mucho más intensa que la ocurrida en el 2015. La ilustración muestra que los eventos de sequía no tuvieron el mismo efecto en toda la Isla. Las áreas sin color son cuencas no analizadas por falta de datos de aforo o estaciones que son influenciados por tomas grandes o embalses. Durante la sequía de 1994, la región noroeste no llegó a condiciones de sequía excepcional, contrario a otras regiones de la Isla. Para el 2015, el evento de sequía fue menos intenso, sin embargo la región

este de la Isla fue la que experimentó un nivel mayor de sequía, variando de moderada a excepcional, en donde algunas cuencas de los ríos principales registraron sequía excepcional a diferencia de 1994. Por el contrario, la región interior oeste se mantuvo principalmente bajo condiciones normales.

Además de la información que se obtiene al utilizar la herramienta, el DRNA considera la información que presenta el Monitor de Sequía. Esta es una herramienta desarrollada por el Centro Nacional para la Mitigación de la Sequía donde colaboran diferentes agencias federales, entre ellas la NOAA y el USDA con la Universidad de Nebraska-Lincoln. El Monitor incluye diferentes variables, entre ellas: el índice de Palmer, los modelos de humedad de suelo, el flujo de los ríos y el índice estandarizado de la precipitación, entre otras variables. El Monitor de Sequía establece cinco categorías de sequía: atípica, moderada, severa, extrema y excepcional. Por cada categoría de sequía se han identificado una serie de impactos. El producto final del Monitor es un mapa, publicado semanalmente, que indica las áreas más afectadas por la sequía, su intensidad y las tendencias del evento, ya sean a corto o largo plazo y la población afectada. El uso de esta herramienta provee un mejor entendimiento científico, facilitando el proceso de la toma de decisiones respecto al manejo adecuado de los abastos de agua.

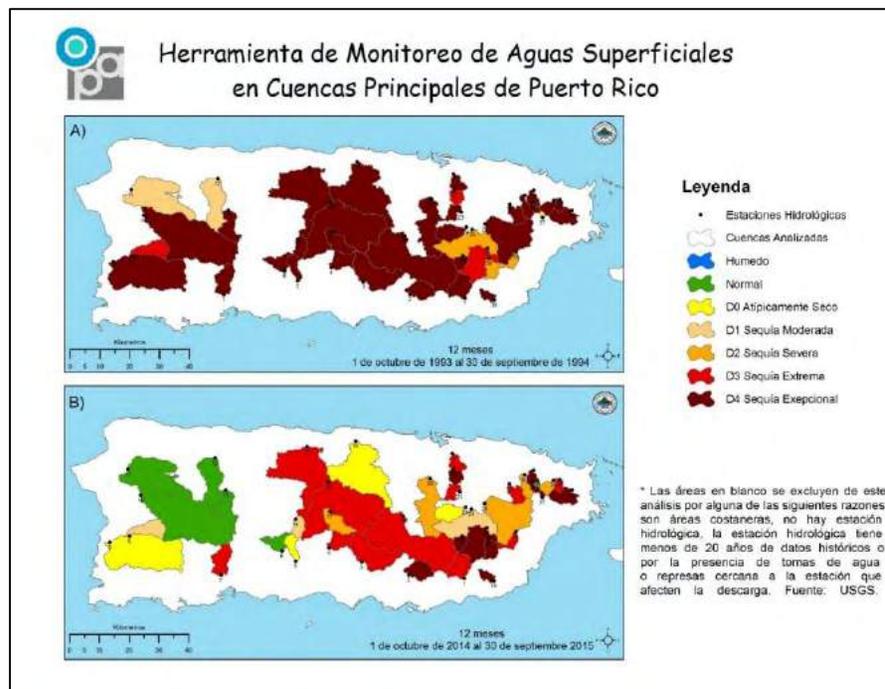


Ilustración 3.4 Condiciones hidrológicas observadas en Puerto Rico para la sequía del 1994 contrastada con la sequía de 2015.

3.2.4.2 Inundaciones

Otro fenómeno natural relacionado al agua son las inundaciones⁸. La mayor parte de los llanos costaneros en la Isla sufren inundaciones periódicas de gran magnitud, e inclusive los valles interiores. Las inundaciones ocurren cuando frentes de frío, depresiones, vaguadas, tormentas y huracanes inducen lluvias abundantes en períodos cortos en la zona montañosa de la Isla. En Puerto Rico se han registrado inundaciones severas en el 1899, 1928, 1933, 1960, 1970, 1975, 1985 y más recientemente a causa de los huracanes Hugo (1989), Hortense (1996) y Georges (1998). En los últimos 18 años se destacan inundaciones ocurridas en el 2001, 2003, 2004, 2005, 2008, 2009, 2010, 2011 y 2013. Estos eventos han causado daños a la propiedad privada y pública, así como a la agricultura e infraestructura, además de causar pérdidas de vidas. Los efectos adversos de las inundaciones más recientes han sido mayores debido al desparrame urbano en los llanos costaneros y valles del interior, donde residencias, negocios e industrias se ubican en zonas inundables.

Es importante destacar que las inundaciones son parte del proceso natural de descarga de un río. Los ríos se caracterizan por un cauce que maneja las crecidas ordinarias y una planicie inundable que recibe el desborde de las crecidas mayores. Desafortunadamente, esta planicie de inundación es una de las zonas más afectadas en nuestra Isla por el proceso urbanizador. Al impermeabilizar los terrenos se aumenta el volumen de escorrentía superficial, se acelera y amplifica la inundación aguas abajo. Parques, urbanizaciones y diferentes utilidades han sido ubicadas en esta zona, indiferentes al espacio que le pertenece al río. Entonces, cuando se produce el evento de inundación, se convierte en un problema para la sociedad.

⁸ Según el Reglamento Núm. 13 de la Junta de Planificación (Reglamento para Áreas Especiales con Riesgo a Inundación), inundación se define como sigue:

1. Condición general y temporera de inundación parcial o total de dos o más acres de un área de terreno normalmente seca o dos o más propiedades.

- a. Desbordamiento de aguas tierra adentro o por mareas.
- b. La acumulación rápida e inusual o escorrentía de aguas superficiales de cualquier fuente.
- c. Deslizamiento de fango.

2. El colapso o hundimiento de terreno a lo largo de la orilla de un lago u otro cuerpo de agua similar como resultado de la erosión o socavación causada por olas o corriente de aguas que exceden niveles cíclicos anticipados como resultado de una inundación como definido en el inciso 1-a anterior.

Como medida de prevención no se deben construir viviendas, comercios ni zonas industriales en zonas inundables. Aquellas que ya se encuentran en zonas inundables, deben ser reubicadas a zonas que no lo son. Finalmente, en aquellos casos excepcionales, que no sea costo efectiva la relocalización, entonces se recomiendan acciones que sean amigables con los ríos y puedan dirigir mejor el curso de las aguas. Las canalizaciones tradicionales en hormigón de los ríos ya no son obras recomendables.

3.3 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es un proceso continuo que representa la presencia y el movimiento del agua de la superficie de la tierra hacia la atmósfera, incluyendo un cambio de estado desde líquido a gaseoso (vapor de agua), y su regreso a la tierra por lluvia u otros procesos. La Ilustración 3.5 describe los elementos principales de disponibilidad y uso de agua que constituyen el ciclo hidrológico de la Isla bajo condiciones promedio. Aproximadamente el 60% de la lluvia que recibe Puerto Rico regresa a la atmósfera por evaporación y por transpiración de la vegetación (evapotranspiración). Este valor promedio incluye periodos de sequía cuando casi toda la lluvia se regresa por la evaporación y la transpiración de la vegetación, igual como periodos de vaguadas y tormentas tropicales cuando el suelo está saturado y casi toda la lluvia se descarga por los ríos.

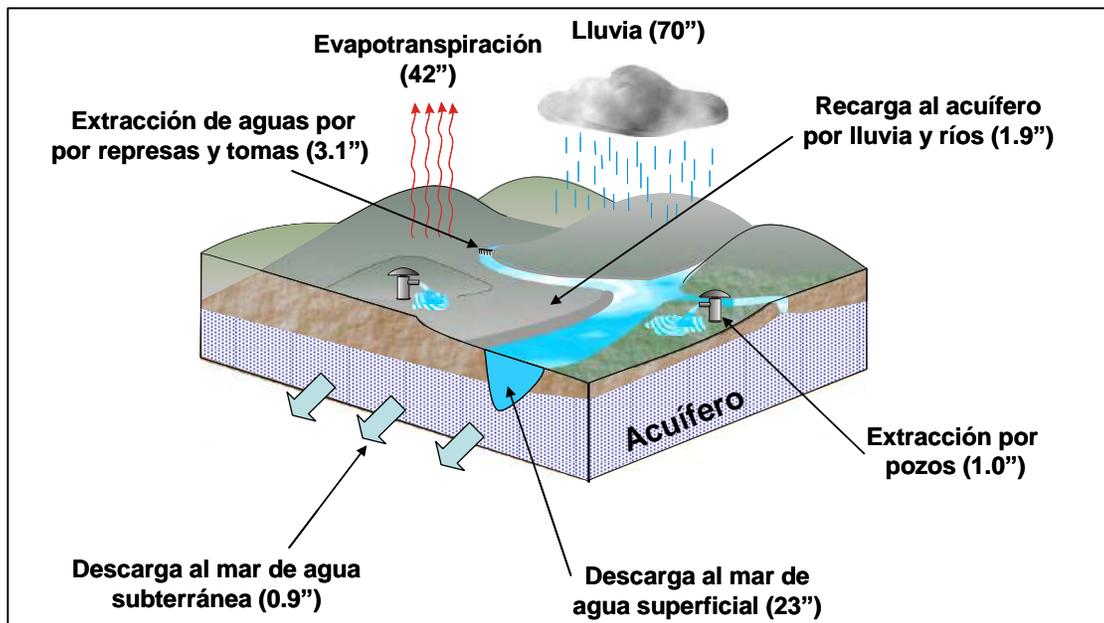


Ilustración 3.5 Ciclo hidrológico para un año promedio.

Al comparar el agua no evaporada, un promedio de 4,592 mgd con los 724 mgd utilizados en el año 2010, se puede obtener la impresión de que hay mucha agua en Puerto Rico que no se aprovecha. Este cálculo, a base de valores promedios, no toma en consideración la gran variación en la escorrentía entre periodos secos y las crecidas. La tasa de extracción actualmente representa casi la totalidad del recurso disponible durante periodos de sequía.

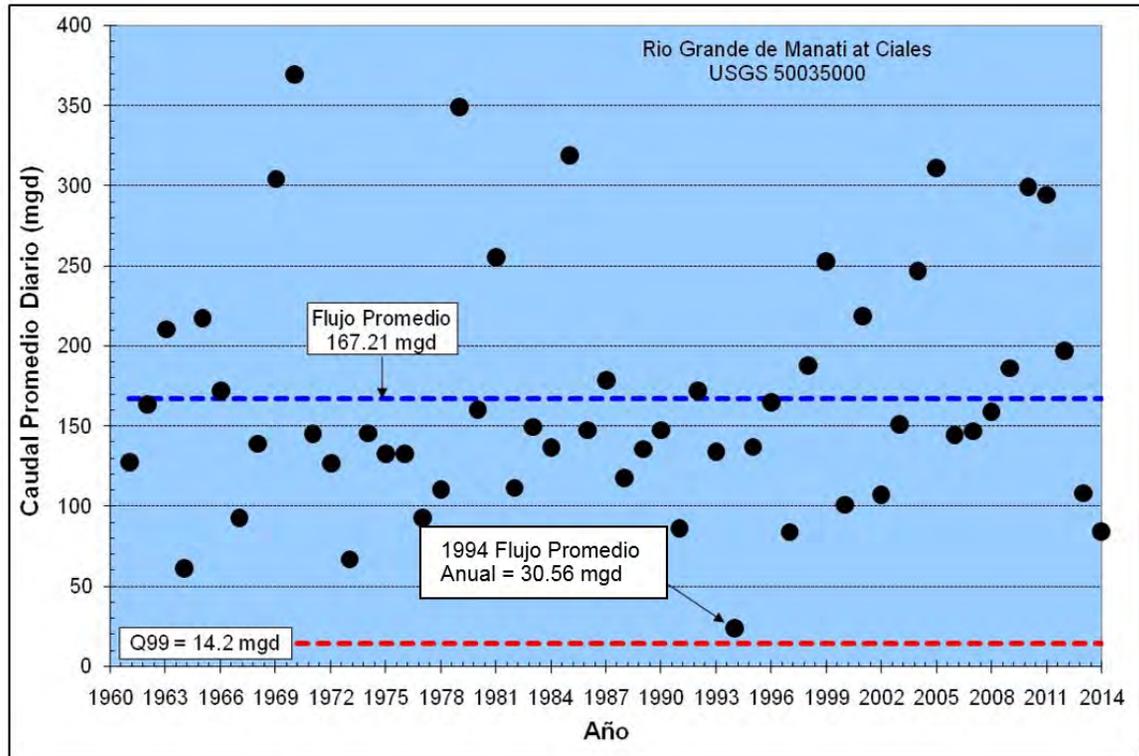
Tomando estos factores en consideración durante sequía, la disponibilidad del recurso agua está muy limitada en comparación a la tasa de utilización actual. Un balance de agua construido a base de las condiciones promedios incluye la cantidad del agua que consiste en flujo de crecidas, la cual no se puede capturar o utilizar debido a la pequeña capacidad de los embalses en relación a estos flujos. La alta variabilidad de los flujos y la gran aportación de agua que representan las crecidas hacen que un “balance de agua” a base de flujos promedios no sea un concepto útil para ilustrar la verdadera disponibilidad del recurso proveniente de una cuenca para establecer las estrategias de planificación.

3.3.1 Escorrentía superficial

A pesar de que es común usar promedios para propósitos descriptivos, en la planificación y administración de los recursos de agua lo que es importante son los eventos extremos: las sequías y las inundaciones. Los flujos extremos, particularmente los mínimos, son los flujos importantes para la vida acuática.

El planteamiento anterior se ilustra con la cuenca del río Grande de Loíza. El balance promedio de esta cuenca refleja una precipitación anual promedio de 1,192,200 acre-pie, de la cual se evapotranspiran 960,460 acre-pie. Al descontar las extracciones de agua que se llevan a cabo en la cuenca (incluyendo la toma de la AAA en el embalse Loíza), añadir las descargas de aguas tratadas y descontar las infiltraciones hacia el acuífero, se descargan al mar unos 236,890 acre-pie al año, equivalentes a 212 mgd. Esto es más del doble de la extracción de la AAA en el embalse Loíza. Este balance promedio por cuenca da la impresión de que hay un gran caudal de agua disponible en el río Grande de Loíza aguas abajo del embalse. Sin embargo, esto no es correcto. El rendimiento seguro, computado para la estación de aforo 50059050 del USGS ubicada 1.8 km (una milla) aguas abajo del embalse Loíza, es de sólo 0.4 mgd. Es decir, aguas abajo de la represa el lecho del río está casi seco, y fluye solamente cuando las crecidas desbordan la represa.

Como otro ejemplo, la Gráfica 3.8 presenta la variabilidad en el caudal del río Grande de Manatí durante varios años. La descarga del río Grande de Manatí en el año 1994 fue tan sólo 14.2% por ciento del flujo promedio del récord de 54 años (Estación USGS 50035000, río Grande de Manatí en Ciales). El 50% del flujo promedio anual es aportado por las crecidas que ocurren en tan sólo 9 por ciento de los días. En contraste, el 50% de los días con menor flujo (182 días al año) aportan solamente 14 por ciento del flujo promedio.



Gráfica 3.8 Caudal promedio anual río Grande de Manatí en Ciales señalando susceptibilidad a sequía extrema.

Los eventos extremos, como son las sequías y las inundaciones, no ocurren uniformemente a través de toda la Isla. La sequía de los años 1967-68, por ejemplo, afectó principalmente la parte este de la Isla, sin tener efecto significativo en la zona oeste (Morris y Vázquez, 1990). En contraste, la sequía de 1994-95 afectó un área mayor, aunque partes de la Isla no experimentaron una sequía intensa con este evento. La Tabla 3.3 ilustra la variación en intensidad de sequía entre varias partes de la Isla en marzo de 1983 utilizando el “Palmer Meteorological Drought Index” (Palmer, 1965). Se puede observar cómo la intensidad de la sequía varía significativamente entre regiones. Este índice calcula la sequía con una duración de solamente tres meses, un periodo suficientemente extenso como para afectar a los

agricultores, pero sin un impacto severo en los embalses que típicamente responden a sequías más prolongadas.

Tabla 3.3 Intensidad de sequía desde enero hasta marzo de 1983, computado utilizando “Palmer Drought Index” (Datos de NOAA)

Región Categórica Climatológica	Normal Lluvia (pulgadas)	Acumulada	PDI	Sequía
Costa Norte	9.71	2.84	-4.73	Extrema
Costa Sur	3.93	4.06	+1.12	Ninguna
Pendientes Norteñas	9.46	3.23	-3.34	Severa
Pendientes Sureñas	5.96	4.04	-3.19	Severa
Este Interior	11.01	9.52	+0.53	Ninguna
Oeste Interior	6.45	5.72	-3.44	Severa

PDI= Palmer Drought Index, Fuente: DRNA, 1984

3.4 Los cuerpos de agua

3.4.1 Ríos

Los ríos son sistemas dinámicos en continuo cambio debido al alto contenido de energía potencial proveniente de la escorrentía generada en la cordillera de origen. Esta escorrentía se delimita de acuerdo con el área de captación o drenaje, denominada como cuenca hidrográfica. El área superficial, junto con los cambios en elevación en el terreno, determinan la dirección de esta escorrentía, formando quebradas, riachuelos o ríos tributarios que descargan a otro río principal, embalse, laguna o al mar. Esta energía se disipa parcialmente cuando el agua erosiona los cauces de los ríos a través del tiempo.

En su paso por las cordilleras, los ríos forman rápidos y pozas, separadas por depósitos de grava y arena que son transportados constantemente aguas abajo con cada crecida. Los rápidos, se caracterizan por tener aguas poco profundas y de alta velocidad lo que promueve la oxigenación. Estos a su vez tienen un gran poder de erosión, arrastrando grandes cantidades de sedimento hacia las pozas. Las pozas por el contrario, se caracterizan por tener aguas más profundas de menor velocidad. Mantener la secuencia de estos hábitats es de suma importancia, ya que provee las condiciones necesarias para la sobrevivencia de los organismos acuáticos.

En Puerto Rico, los procesos climáticos y geológicos han dado paso a la formación de 134 cuencas hidrográficas, las cuales se dividen en 54 cuencas mayores, 10 cuencas menores y 70

en áreas costaneras. En su mayoría, las cuencas hidrográficas se originan en la región montañosa del interior de Puerto Rico. La variabilidad geológica influye sobre la escorrentía de la Isla. Las áreas que son dominadas por roca de origen volcánico son de poca permeabilidad. En estas áreas, los canales de los ríos y quebradas pueden definirse claramente. Por el contrario, en las áreas dominadas por roca caliza se caracterizan por tener alta permeabilidad, sumideros y conductos subterráneos, por lo que no es posible definir con exactitud hacia donde discurre toda la escorrentía. Esta condición de drenaje no definido ocurre en la Zona del Carso de la Región Norte de Puerto Rico. Por ejemplo, la escorrentía en el río Camuy ocurre en un sistema complejo de ríos subterráneos y cavernas donde el área de captación no se puede definir con precisión. En las cuencas costaneras, donde la topografía es plana y las pendientes del terreno son mínimas, resulta igualmente impreciso definir el área de captación, ya que la escorrentía es difusa sin un punto focal de descarga.

En Puerto Rico se pueden encontrar 224 ríos y 553 quebradas con nombres (Ilustración 3.6). Muchos de estos ríos y quebradas son tributarios de otros ríos principales, como en el caso del río Grande de Loíza, cuya cuenca incluye los ríos Canóvanas, Canovanillas, Bairoa, Canas, Turabo, Gurabo, Cagüitas y Valenciano, más un gran número de quebradas. Existen 55 ríos que descargan hacia el mar. Las características de 24 de estos se presentan en la Tabla 3.4.

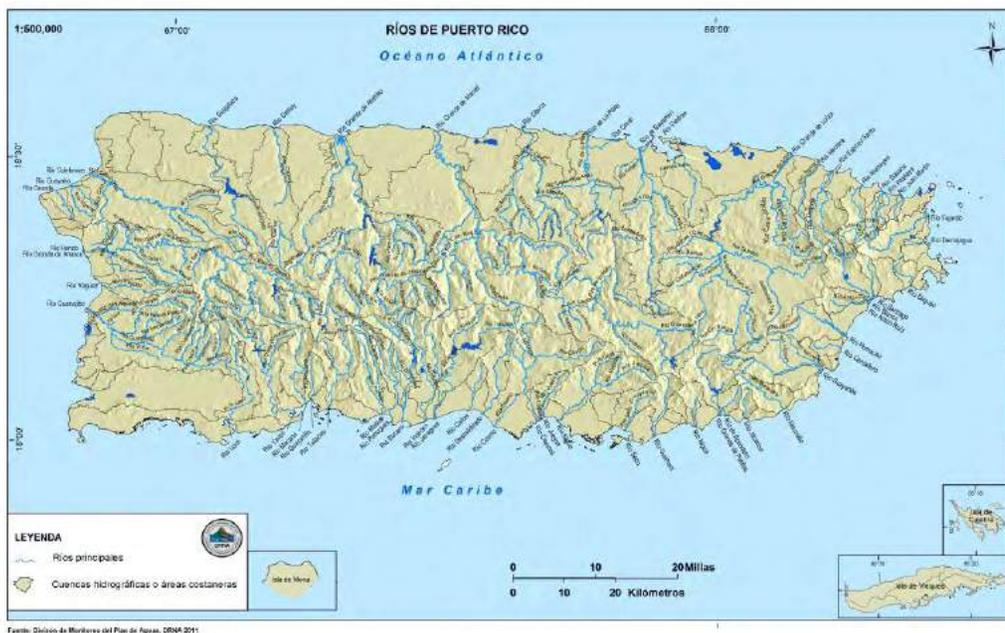


Ilustración 3.6 Los ríos de Puerto Rico. Fuente: DMPA.

Debido a su mayor área de captación y mayor cantidad de lluvia sobre sus cuencas, los ríos de las regiones norte, oeste y este mantienen un flujo perenne en comparación con la mayor parte de los cauces en la región sur donde la mayoría de los ríos y quebradas son intermitentes. Estos mantienen un flujo constante solamente durante la época de lluvia, o cuando ocurren eventos de lluvias intensas en la época de seca. Aún cuando algunos ríos en la parte alta de las laderas de la Región Sur exhiben escorrentía la mayor parte del tiempo, una vez el flujo avanza hacia los valles aluviales, la infiltración y evapotranspiración consumen la mayor parte del agua, secándose el cauce.

Los ríos son uno de los factores naturales más importantes en la evolución de los valles aluviales costaneros de Puerto Rico. La pendiente del cauce de los ríos es mucho menor en los valles costaneros que en las laderas de las cordilleras. A medida que los sedimentos son transportados de las cordilleras hacia las costas y hacia el mar, estos se precipitan cuando la corriente natural pierde energía al reducirse la pendiente del cauce. En los valles costaneros los sedimentos se acumulan en los cauces, reduciendo su profundidad efectiva. Eventualmente, durante eventos de lluvia extremos, la cantidad de escorrentía no puede ser contenida en el cauce, en parte debido a los cambios geomorfológicos que causan una reducción en profundidad según se acumulan los sedimentos.

Los ríos inician migraciones de sus cauces abriendo nuevas rutas hacia la costa, formando meandros. Los meandros son las ondulaciones formadas por el caudal de un río, como consecuencia de la erosión de los suelos durante las crecidas. Estos cambios en los canales principales pueden observarse en la desembocadura del río Grande de Arecibo y en los meandros formados por el río Grande de Manatí, en la parte cercana a la costa. La repetición de estos procesos durante milenios ha resultado en la acumulación de grandes cantidades de aluvión en los valles, contribuyendo a su vez a la formación de los acuíferos aluviales superiores que ocurren en las regiones Norte y Sur de Puerto Rico.

Los ríos en Puerto Rico también juegan un papel importante en la penetración lateral de agua salina o salobre en los acuíferos. En los valles costaneros, principalmente en la Región Norte, la baja elevación del terreno respecto al nivel del mar permite que durante mareas altas, una cuña de agua de mar penetre por la desembocadura de los ríos. Esta cuña puede avanzar varias millas aguas arriba por el cauce de un río, como ocurre en los ríos Grande de Arecibo, Grande de Manatí cerca de Barceloneta, De La Plata en Dorado, Grande de Loíza en Loíza y Espíritu Santo en Río Grande, entre otros. Lateralmente, esta cuña contribuye a la intrusión

salina hacia los acuíferos aluviales y calizos llanos de la Región Norte. La cuña de agua salada es desplazada nuevamente al mar cuando ocurren las frecuentes lluvias que causan caudales significativos, particularmente en la Región Norte. Este fenómeno de intrusión de la cuña de agua de mar no ocurre en forma significativa en los ríos de las costas sur, este u oeste. Esto se debe principalmente a que las pendientes de los ríos en estas regiones son mayores que en el norte, limitando los efectos de las mareas sobre los cauces de los ríos. No obstante, los ríos del sur durante la época de estiaje su cauce queda seco, lo que permite que la cuña de agua de mar penetre tierra adentro, efecto que es muy notable en los ríos Bucaná, Matilde, Inabón y Coamo.

Tabla 3.4 Características de los ríos principales de Puerto Rico.

Nombre del río	Área		Largo del río		Caudal Anual	
	(mi ²)	(km ²)	(mi)	(km)	(acre-pies/año)	(MGA)
Guajataca	54.99	142.42	26.31	42.34	70,830	23,078
Grande de Arecibo	259.61	672.39	32.57	52.42	348,160	113,441
Grande de Manatí	234.82	608.18	56.82	91.45	275,820	89,870
Cibuco	91.57	237.17	23.75	38.22	88,620	28,875
De La Plata	241.20	624.71	62.19	100.08	210,530	68,597
De Bayamón	89.89	232.82	30.29	48.75	92,910	30,273
Río Piedras	26.00	67.34	10.65	17.14	61,920	20,175
Grande de Loíza	289.95	750.97	44.05	70.89	236,890	77,186
Espíritu Santo	26.17	67.78	12.59	20.26	122,140	39,797
Mameyes	15.58	40.35	9.49	15.27	93,050	30,318
Fajardo	26.18	67.81	16.35	26.31	75,900	24,730
Blanco	27.67	71.67	9.24	14.86	82,280	26,809
Grande de Patillas	29.05	75.24	14.58	23.46	63,170	20,583
Nigua (Salinas)	52.76	136.65	10.48	16.87	15,740	5,129
Coamo	83.99	217.53	23.29	37.48	18,840	6,139
Jacaguas	59.85	155.01	24.68	39.72	39,310	12,808
Bucaná	28.45	73.69	5.69	9.16	54,830	17,865
Portugués	20.33	52.65	18.43	29.66	19,200	6,256
Guayanilla	25.14	65.11	15.51	24.96	50,540	16,467
Yauco	46.09	119.37	24.38	39.23	46,500	15,151
Loco	24.73	64.05	21.63	34.81	46,500	15,151
Guanajibo	127.21	329.47	23.78	38.27	136,860	44,593
Grande de Añasco	180.82	468.32	34.75	55.93	311,490	101,492
Culebrinas	103.32	267.60	37.33	60.07	291,010	94,819

3.4.2 Embalses y lagunas

En Puerto Rico no hay lagos naturales, pero existen 39 embalses, 15 de ellos considerados obras mayores (ver Ilustración 3.7). El embalse Comerío 1, fue el primer embalse construido (en el año 1906), mientras que el más reciente, es el embalse en el río Portugués localizado en el Sector Tibes en Ponce. Este comenzó a operar en el 2014 y sirve para control de inundaciones y recreación. Otros embalses recientes son el embalse del río Fajardo y el embalse en el río Blanco de Naguabo, cuya operación comenzó en el 2006 y 2011, respectivamente. Una característica distintiva de estos dos embalses es que han sido construidos fuera del cauce del río para reducir la sedimentación y los impactos ambientales, contrario a varios de los embalses pequeños, que ya están totalmente sedimentados. La Tabla 3.5 presenta información general sobre los embalses, sus ubicaciones se muestran en la Ilustración 3.7.



Ilustración 3.7 Embalses de Puerto Rico. Fuente: DRNA

Los embalses son la fuente principal de agua cruda que utiliza la AAA para producir agua potable en la Isla, además de suplir agua para riego principalmente en los valles costaneros de la Región Sur. Los embalses suplen aproximadamente 328.39 mgd de agua cruda a las plantas de filtración operadas por la AAA, lo que constituye el 54% del agua potable producida en la Isla (Molina, 2010).

PLAN INTEGRAL DE RECURSOS DE AGUA
JUNIO, 2016

Tabla 3.5 Información General sobre los embalses de Puerto Rico.

Características	Blanco	Caonillas	Carite	Cerrillos	Cidra	Dos Bocas	El Guineo	Fajardo	Garzas	Guajataca	Guayabal	Guayo	La Plata	Loco	Loiza	Lucchetti	Matrullas	Patillas	Prieto	Portugués	Toa Vaca	Yahuecas	
Clasificación	Mayor	Mayor	Mayor	Mayor	Intermedio	Mayor	Mayor	Mayor	Mayor	Mayor	Mayor	Mayor	Mayor	Intermedio	Mayor	Mayor	Mayor	Mayor	Intermedio	Mayor	Mayor	Intermedio	
Estado de situación	Activo	Activo	Activo	Activo	Activo	Activo	Activo	Activo	Activo	Activo	Activo	Activo	Activo	Activo	Activo	Activo	Activo	Activo	Activo	Activo	Activo	Sedimentado	
Cuenca hidrográfica	Río Blanco	Río Grande de Arecibo	Río de La Plata	Río Bucaná	Río Bayamón	Río Grande de Arecibo	Río Grande de Manatí	Río Fajardo	Río Grande de Arecibo	Río Guajataca	Río Jacaguas	Río Grande de Añasco	Río de La Plata	Río Loco	Río Grande de Loiza	Río Yauco	Río Grande de Manatí	Río Grande de Patillas	Río Grande de Añasco	Río Portugués	Río Jacaguas	Río Grande de Añasco	
Municipio en que está ubicado	Naguabo	Utua	Guayama	Ponce	Cidra	Arecibo y Utua	Ciales y Orocovis	Fajardo	Adjuntas	Isabela, Quebradillas y San Sebastián	Juana Díaz y Villalba	Adjuntas y Lares	Bayamón, Naranjito y Toa Alta	Yauco	Caguas, Gurabo y Trujillo Alto	Yauco	Orocovis	Patillas	Lares y Maricao	Ponce	Villalba	Adjuntas	
Año en que se completó su construcción	2010	1948	1913	1991	1946	1942	1931	2004	1943	1928	1913	1956	1974	1951	1953	1952	1934	1914	1955	2014	1972	1956	
Dueño	AAA	AEE	AEE	DRNA	AAA	AEE	AEE	AAA	AEE	ELA	AEE	AEE	AAA	AEE	AAA	AEE	AEE	ELA	AEE	DRNA	AAA	AEE	
Usos principales	Abasto doméstico	Generación de energía eléctrica, Abasto doméstico, y Recreación	Abasto doméstico, Riego y Recreación	Control de inundaciones, Recreación, Abasto doméstico	Abasto doméstico y Recreación	Generación de energía eléctrica, Abasto doméstico y Recreación	Generación de energía eléctrica y Recreación	Abasto doméstico	Generación de energía eléctrica y Recreación	Riego, Abasto doméstico y Recreación	Riego y Recreación	Riego, Generación de energía eléctrica, Abasto doméstico y Recreación	Abasto doméstico y Recreación	Riego, Generación de energía eléctrica, Abasto doméstico y Recreación	Abasto doméstico y Recreación	Riego, Generación de energía eléctrica, Abasto doméstico y Recreación	Generación de energía eléctrica y Recreación	Riego, Abasto doméstico y Recreación	Generación de energía eléctrica	Control de inundaciones y Recreación	Abasto doméstico, Riego y Recreación	Generación de energía eléctrica y Recreación	
Tipo represa	Tierra	Hormigón	Tierra	Escollera	Hormigón	Hormigón	Escollera	Tierra	Tierra	Tierra	Contrafuerte	Hormigón	Hormigón	Hormigón	Hormigón	Hormigón	Tierra	Tierra	Hormigón	Concreto	Tierra	Hormigón	
Área de captación (Km ²)	0.88	126.65	20.51	45.32	21.39	310	4.27	0.34	15.6	79.77	54.5	24.86	469	21.76	538	44.81	11.45	65.27	24.8	26.68	56.8	45.17	
Área superficial del embalse en Km ²	0.33	2.7	1.2	1.6	1.08	1.78	0.19	0.3	0.4	3.42	1.44	1.09	3.09	0.29	2.67	1.11	0.31	1.35	0.06	0.29	3.22	0.22	
Capacidad original en Mm3 (AEE 2011)	0.01	56	13.95	38.03	6.54	38	2	5.5	5.8	48.46	11.82	19.2	49.21	2.4	27	20.35	3.71	17.64	0.76	2.26	68.94	1.76	
Capacidad según estudio más reciente en Mm3 y fecha (mes, año)	ND	39.55 (2012)	10.74 (oct 1999)	37.26 (may 2008)	5.63 (2007)	16.74 (2010)	1.89 (oct 2001)	ND	5.11 (julio 2007)	42.28 (ene 1999)	5.82 (oct 2006)	16.57 (oct 1997)	31.27 (2006)	0.87 (mar 2000)	16.42 (julio 2009)	11.88 (mar 2000)	3.08 (dic 2001)	13.57 (2007)	0.22 (oct 1997)	ND	64.08 (jul 2002)	0.33 (mar 1997)	
Tasa de sedimentación promedio en m3/año	ND	251,720	37,326	45,794	14,918	305,000	5,714	ND	12,656	87,042	60,000	64,146	280,000	31,224	308,000	176,458	9,403	27,000	12,857	ND	162,000	34,878	
Vida útil remanente en años (a fecha de último estudio de batimetría)	>1,000	174	288	814	377	55	331	> 2,000	404	486	97	258	112	28	53	67	328	503	17	ND	396	9	
Caudal anual promedio de entrada en Mm3/año	17	248	39	51	15	401	5	17	17	104	24	72	291	14	415	35	26	62	23	16	22	47	
Rendimiento Seguro en mgd (PIRA, 2008)	18	42	12	14.3 - 16.7	5	54	2.8	12	7	41	7.3	11.9	50.2	1.9	63	11.7	2.7	22.7	4.2	ND	13.5	4.8	
Pesca	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si	Si	
Estado trófico (Informe 305(b), JCA 2012)	ND	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Mesotrófico	ND	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	ND	ND	Eutrófico	ND
Elevación tope del vertedor, en metros sobre el nivel del mar	28.75	251.76	543.78	186.37	403.05	89.92	902.44	54.57	736.28	202.44	100.91	445.12	47.26	70.12	41.16	173.78	748.48	58.23	452.74	156	164.94	448.48	
Largo total de la represa, en metros	365.85	75.74	46.46	145	50.29	122.66	52.5	96.64	84.56	96.64	184	51.58	71.93	55.76	64.03	53.06	65.96	99.43	22.93	1609	161.69	41.82	
Altura de la represa en metros	20.12	71.65	31.71	98.48	32.01	57.32	38.11	36.89	61.59	37.5	39.63	57.93	39.94	21.95	29.88	54.27	36.59	44.82	29.88	65.43	65.55	27.44	
Profundidad máxima, en metros	14.94	39.94	20.12	88.41	18.51	22.56	21.95	35.06	29.88	27.01	12.99	38.41	27.01	8.99	17.99	25.49	21.65	23.99	9.79	58.76	27.44	6.5	

Paralelamente, para el 2015 los embalses suministraron aproximadamente 32 mgd de agua para riego agrícola en los valles costaneros de las regiones Sur y Norte. Además, proporcionan agua para generar aproximadamente el 1.9 % de la energía eléctrica que produce la AEE, y proveen control parcial a las inundaciones en varias cuencas. También son fuente de recreación para miles de residentes dedicados a la pesca deportiva y navegación en la zona montañosa y sirven de hábitat para la vida silvestre.

Excepto los embalses Fajardo y Blanco, todos los embalses mayores en Puerto Rico se han construido en los cauces de los ríos en la zona montañosa con el propósito de almacenar cantidades relativamente grandes de las escorrentías generadas por la abundante precipitación que ocurre en esta zona. En general, los embalses se han ubicado en cañones profundos con gargantas reducidas donde las represas requieren la menor inversión posible de fondos mientras almacenan la mayor cantidad de escorrentía en el menor espacio superficial. Esta característica de su diseño hace que los embalses sean profundos y sus orillas posean declives empinados. Otra característica que se ha tomado en cuenta es la estabilidad geológica de los lugares donde ubican, para garantizar su seguridad sísmica.

La sedimentación de los embalses es uno de los problemas más recurrentes y de gran relevancia a la hora de manejar los recursos de agua en Puerto Rico. La acumulación de sedimentos ha reducido la capacidad de almacenaje de agua en todos los embalses, alcanzando condiciones críticas en varios embalses importantes, incluyendo Loíza y Dos Bocas. La pérdida de capacidad de los embalses en la Isla se debe a varios factores, tanto naturales como antropogénicos. En todas las cuencas ocurre erosión de los suelos en menor o mayor grado, siendo estos sedimentos transportados hacia los cauces de las quebradas y los ríos. Sin embargo, estas tasas naturales de erosión y transporte de sedimentos aumentan o disminuyen en intensidad y en proporción a base de la cantidad e intensidad de la lluvia, las características de los suelos, las pendientes de las cuencas y su cubierta forestal. Por el contrario, la deforestación y remoción de la corteza terrestre aceleran la erosión de los suelos y el transporte de sedimentos hacia los cuerpos de agua y eventualmente a los embalses. Un ejemplo de esto es la erosión natural de los suelos y la erosión inducida por actividades agrícolas y urbanas. Las actividades agrícolas y desarrollos urbanos aceleran la erosión de los suelos exponiéndolos a ser transportados hacia los ríos. Los estudios del USGS en la Isla demuestran que en cuencas menos desarrolladas, la tasa de generación de sedimentos es menor que en las desarrolladas.

Esto ha provocado que se revisen los diseños de las nuevas represas para evitar la acumulación excesiva de sedimentos. Los nuevos embalses Fajardo y río Blanco incluyen diseños que reducen significativamente los problemas de sedimentación. Estos embalses se construyeron en hondonadas naturales fuera del cauce del río que los abastece. Una toma en el río aguas arriba de la ubicación del embalse desvía el agua hacia la represa, la cual fluye por gravedad a través de una tubería soterrada. La capacidad hidráulica de la toma y su sistema de aducción es capaz de desviar los flujos bajos y moderados, con poca concentración de sedimentos, permitiendo que las crecidas con alta carga de sedimentos pasen aguas abajo de la toma sin entrar al embalse. De esta manera, se prolonga la vida media (vida útil) de los embalses fuera de cauce hasta más de 1000 años, en comparación con valores de 100 años o menos para los embalses convencionales de Puerto Rico que han sido construidos dentro del cauce.

Por otro lado, las represas construidas en el cauce de los ríos para embalsar las aguas alteran todos los procesos hidrológicos y biológicos del río, afectando la vida acuática en el cauce así como en el estuario. De igual forma se altera y afecta la calidad del agua de la represa.

Las lagunas al igual que los embalses son sistemas acuáticos caracterizados por la baja velocidad y turbulencia de sus aguas. En Puerto Rico y sus islas vecinas existen 34 lagunas principales. De este total, 24 se ubican en Puerto Rico. La Laguna Tortuguero y la Laguna Cartagena son lagunas naturales de agua dulce, las únicas que quedan en la Isla. La Laguna Guánica también tenía agua dulce antes de ser drenada en el año 1952 para aumentar el área de producción agrícola en el Valle de Lajas.

La Laguna Tortuguero está ubicada en la costa norte de Puerto Rico entre los pueblos de Vega Baja (al este) y Manatí (al oeste). Cubre un área de aproximadamente 57 cuerdas y está separada de la costa por una duna de arena y es uno de los cuerpos de agua natural más grandes de la isla. Se destaca por su importancia ecológica y por su sistema natural rico en fauna y flora acuática.

La Laguna Cartagena localizada en Lajas, cubre un área aproximadamente de 77 a 128 cuerdas (USFWS, 2010). Es una de las pocas lagunas que ha subsistido hasta esta época y por tal razón ha jugado un papel importante en la preservación de las especies de aves que hoy no son muy comunes o están en peligro de extinción. Su importancia estriba en que mantiene sus

poblaciones de aves y recibe muchas otras de lagunas adyacentes, especialmente aquellas en donde el agua es intermitente y de aves migratorias (U.SFW, s.f.).

La Laguna Cartagena actual es lo que queda de lo que una vez fue un gran cuerpo de agua abierto y uno de los hábitats de agua dulce más importantes de Puerto Rico para las aves acuáticas nativas y migratorias. Debido a las prácticas agrícolas de los últimos 50 años se eutrofizó el agua de la laguna, permitiendo la propagación de la hierba de enea hasta ocupar el 80 por ciento de su superficie (USFWS.). Sin embargo, sigue cumpliendo su función como un ecosistema de humedal para el beneficio de aves migratorias y las especies en peligro de extinción. Está catalogado como Refugio Nacional de Vida Silvestre desde el 2007, también se considera como un área valiosa para las aves por *BirdLife International*⁹ bajo el programa de Áreas Importantes para la Conservación de las Aves.

3.4.2.1 Red de Monitoreo Superficial

El USGS posee una red de monitoreo de aguas superficiales. Esta red consiste de 188 estaciones (Ver Ilustración 3.8) que se subdividen a su vez en 27 estaciones para medir los embalses; 54 estaciones de medición de lluvia; 81 estaciones para medir el flujo de los ríos; y 26 estaciones para medir los canales de riego. De la red que monitorea los embalses, 13 de ellas también miden precipitación. A su vez, de la red que mide el flujo de los ríos, 16 estaciones miden precipitación y 6 estaciones miden precipitación y carga de sedimentos. La red de monitoreo superficial y subterránea que opera el USGS es subvencionada con fondos de diferentes agencias, entre estas se encuentran el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, el Departamento de Agricultura, el Departamento de Salud, el Departamento de la Vivienda, la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados, la Autoridad de Carreteras y Transportación, la Autoridad de Desperdicios Sólidos, la Autoridad de Energía Eléctrica, la Compañía de Fomento Industrial, la Compañía de Turismo, la Junta de Calidad Ambiental, la Junta de Planificación y la Universidad de Puerto Rico.

⁹ Birdlife Internacional es una iniciativa global, cuyo objetivo es conservar todas las especies de aves silvestres y sus hábitats. En Puerto Rico, en colaboración con la Sociedad Ornitológica Puertorriqueña Inc. (SOPI), identificaron 20 sitios críticos para las aves, designados actualmente como áreas importantes para las aves (IBA, por sus siglas en ingles).



Ilustración 3.8. Red de monitoreo de aguas superficiales actual. Fuente: USGS.

Por su parte, la Junta de Calidad Ambiental muestra 46 puntos en los embalses de la Isla, para conocer la calidad de estas fuentes de abasto. Estos muestreos son puntuales y realizados por personal de la JCA en los lugares señalados en la Ilustración 3.9.



Ilustración 3.9 Puntos de muestreo de la Junta de Calidad Ambiental. Fuente: JCA.

3.4.3 Agua subterránea

Un acuífero es una formación geológica saturada con agua, cuyo volumen y permeabilidad son suficientes para sostener la extracción de un caudal significativo de agua dulce (Driscoll, 1986; Campbell y Lehr, 1973). Puerto Rico cuenta con una diversidad de formaciones geológicas que funcionan como acuíferos, las cuales se pueden agrupar en tres tipos de formaciones fundamentales: depósitos aluviales, roca caliza (cárstica) y roca ígnea. La clasificación y la localización de los diferentes acuíferos en la Isla se presentan en la Ilustración 3.10 .

La productividad de los acuíferos es en función de los materiales que los forman y de las fuentes de recarga. No todas las formaciones saturadas pueden producir agua en cantidades significativas. Las arcillas, por ejemplo, no funcionan como acuíferos aún cuando están saturadas con agua porque su permeabilidad es extremadamente baja. El agua en los acuíferos fluye lentamente desde las áreas de recarga hacia las áreas de descarga, un viaje que puede durar décadas. Los acuíferos se caracterizan por un volumen de almacenaje relativamente grande en comparación a su tasa de recarga. Sin embargo, si ocurren periodos prolongados de reducción en lluvia, sus niveles pueden comprometerse.

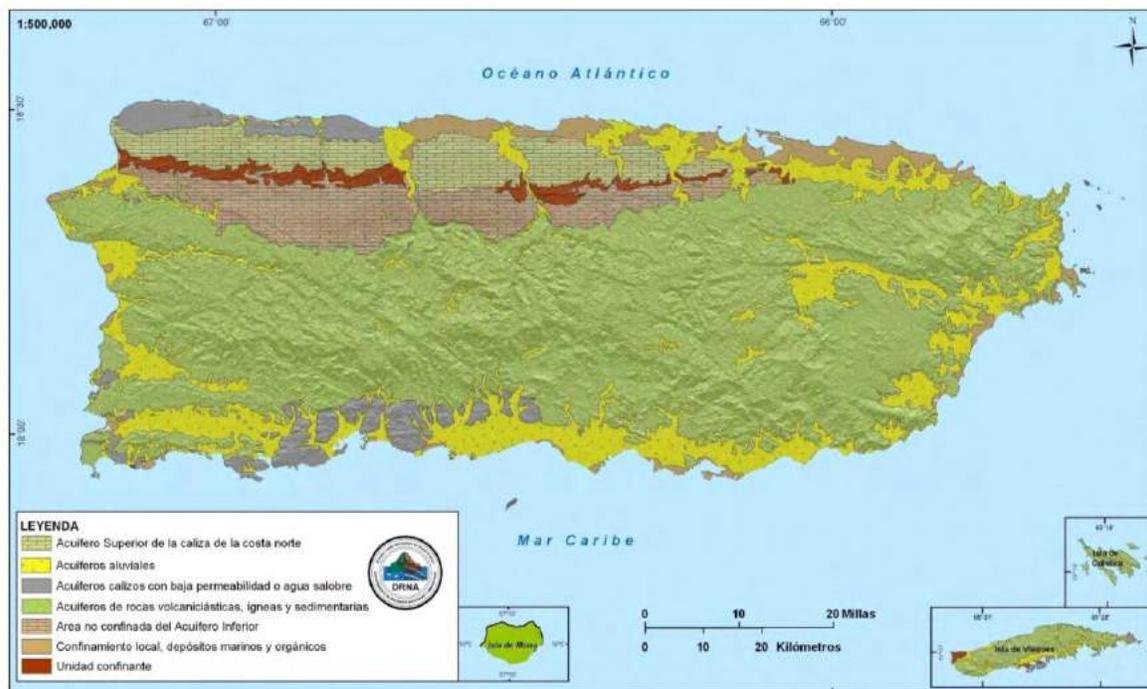


Ilustración 3.10 Acuíferos de Puerto Rico.

3.4.3.1 Acuíferos de la Costa Norte

Los Acuíferos de la Costa Norte se extienden desde Luquillo hasta Aguadilla, ocupando un área de aproximadamente 905 mi² y consisten de roca caliza (carso) y de formaciones aluviales en los valles de los ríos (Ilustración 3.11).

Los acuíferos más importantes de Puerto Rico son los de la caliza del norte, con una permeabilidad secundaria creada por la disolución de la roca por acción del agua. Esta formación se encuentra principalmente hacia el oeste de San Juan con un desarrollo mayor en el área desde Dorado hasta Arecibo.

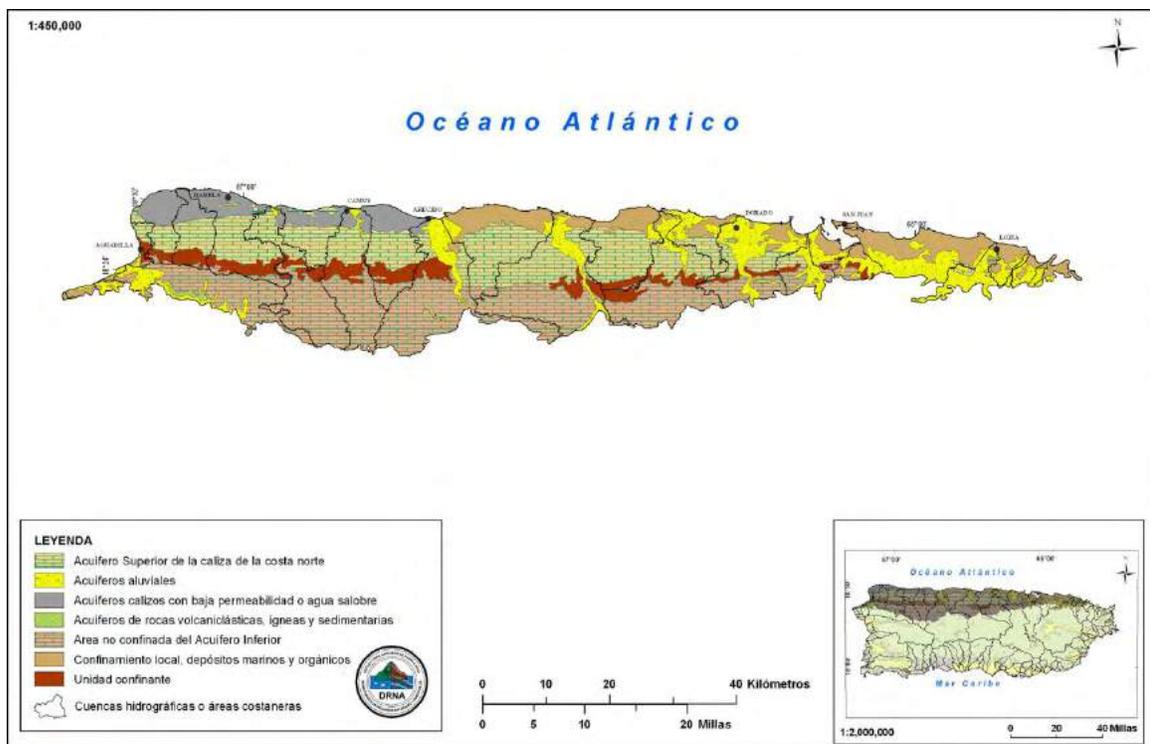


Ilustración 3.11 Acuíferos de la Costa Norte.

Los acuíferos de caliza reciben recarga mediante la percolación de lluvia a través del suelo, por la descarga de escorrentía superficial hacia los sumideros y mediante infiltración por el fondo de los ríos. Además, pueden recibir recarga por la descarga de pozos sépticos y las filtraciones de tuberías rotas. Ambos acuíferos descargan hacia el fondo del mar, aunque el Acuífero Superior también descarga hacia manantiales, el fondo de los ríos y a humedales y lagunas costeras incluyendo el Caño Tiburones y la Laguna Tortuguero. Los pozos también representan puntos de descarga para ambos acuíferos

La región del Carso de la Costa Norte es un acuífero complejo en su estructura y funcionamiento. Su estructura general consiste de dos acuíferos de roca caliza, uno por encima del otro, separados por una formación de menor permeabilidad: la caliza formación Cibao. Los dos acuíferos son denominados el Acuífero Superior y el Acuífero Inferior, también conocidos como Acuífero Llano o Freático (Superior) y el Acuífero Profundo o Artesiano (Inferior). La extracción combinada de los acuíferos Superior e Inferior es de 39 MGD, según datos del 2010 del USGS (Molina, 2010). La Ilustración 3.12 presenta un corte transversal en el área del Caño Tiburones mostrando la configuración básica de las formaciones que constituyen los acuíferos. El Acuífero Superior consiste de rocas calizas con niveles altos a moderados de permeabilidad más un sistema aluvial, formado por el depósito de sedimentos en los valles de los ríos que atraviesan la caliza. Este acuífero incluye capas de aluvión y depósitos marinos sobrepuestos a las formaciones calizas, primordialmente las denominadas Aymamón, Cibao, Camuy y Aguada (Monroe, 1980). El mismo se extiende desde la zona de Luquillo hacia el oeste. Su espesor máximo varía dependiendo de su ubicación de este a oeste, así como en los depósitos aluviales formados en los valles inmediatos a los ríos de la región. La permeabilidad en la roca caliza se desarrolla debido a canales de disolución. El Acuífero Superior es fuente importante de abastos de agua para consumo, usos industriales y actividades agrícolas. El límite inferior de este acuífero es la roca poco permeable de la formación Cibao.

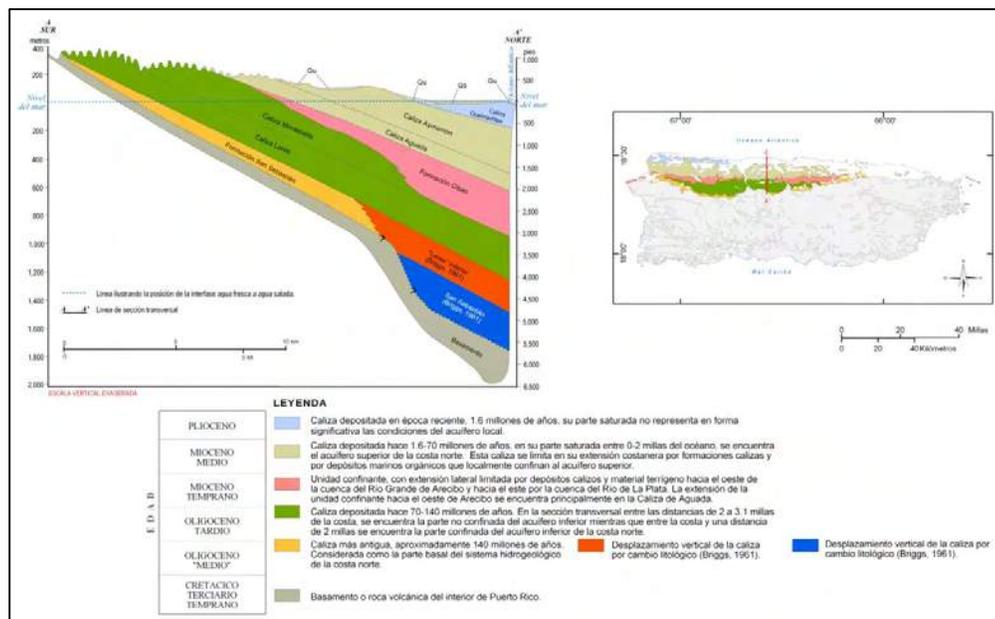


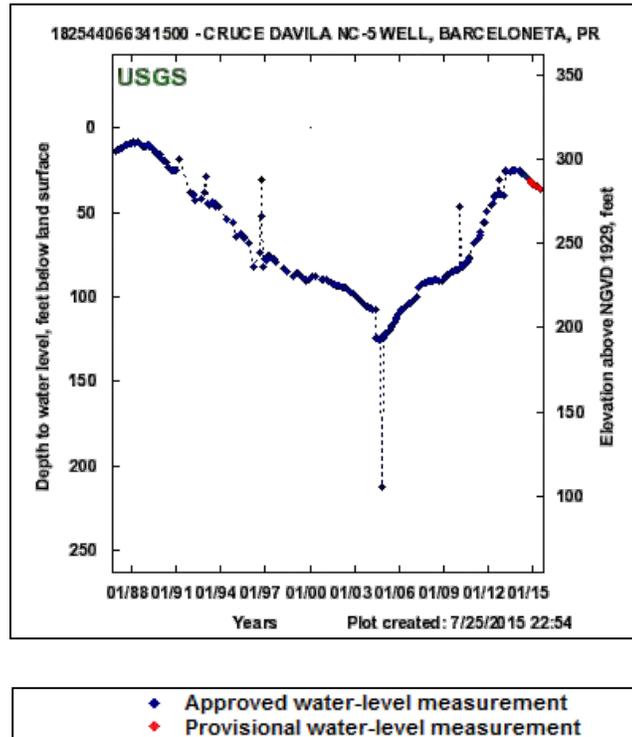
Ilustración 3.12 Sección transversal generalizada de los acuíferos de la Costa de Norte de Puerto Rico.
Fuente: DRNA, 2004, modificado de USGS, 2002.

El Acuífero Inferior (Profundo o Artesiano) incluye capas de las formaciones San Sebastián, Lares y Montebello, confinadas por estratos de barros y cienos de la Formación Cibao. El acuífero se extiende desde la Zona Metropolitana de San Juan hasta Aguadilla, aunque las zonas con mayor capacidad de producción de agua se encuentran entre Manatí y Arecibo. En esta zona se manifiestan condiciones artesianas donde, previo al desarrollo del acuífero, el nivel potenciométrico del agua permitía que los pozos en la zona fluyeran sin la necesidad de bombeo.

El Acuífero Inferior es la fuente principal de agua en usos industriales en la zona de Manatí a Barceloneta, además de suplir abastos moderados para consumo. Sin embargo, la explotación de éste ha ocasionado una reducción dramática del nivel potenciométrico en este acuífero. Según el USGS, la reducción en este acuífero se observó desde que se hincó el primer pozo en 1960 (Rodríguez y Gómez, 2008). En el pozo de observación conocido como NC-5 se registró una reducción en los niveles del Acuífero Inferior de 100 pies, esto entre 1989 y 2004 (ver Gráfica 3.9). Al hacer la comparación entre los datos recopilados durante el 1987 y el 2006, era evidente la presencia de dos conos de depresión en este acuífero, uno al norte del casco urbano de Florida y otro al suroeste del casco urbano de Barceloneta. Estos conos de depresión presentaron un descenso de 150 pies y 82 pies respectivamente (Rodríguez y Gómez, 2008). Este descenso se atribuyó a fugas de agua del Acuífero Inferior hacia el Acuífero Superior, causadas por problemas de construcción de los pozos. Se ha observado una mejoría en los niveles del Acuífero Inferior en la última década (ver Gráfica 3.9). Esta mejoría se atribuye a la reparación de varios de los pozos que presentaban filtraciones hacia el Acuífero Superior y al cierre de varias industrias que se abastecían con agua del Inferior. Ambas situaciones tuvieron como resultado una reducción en las extracciones de este acuífero y la estabilidad del mismo.

Durante la década de 1980, con la creación del Superfondo, la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés), incluyó varios lugares de la región norte del País en la lista del Superfondo. Esto porque el agua de los acuíferos se había contaminado con distintos químicos y sustancias volátiles productos del proceso de industrialización. De acuerdo a los reportes de la EPA estos lugares se encuentran en proceso de limpieza y otros todavía no han iniciado este proceso. Entre estos lugares podemos mencionar las farmacéuticas Upjohn, Merck, Sharp & Dohme y Pfizer, las industrias Scorpio Recycling, Inc. y Pesticide Warehouse I, además de los pozos de la AAA en Vega Alta. La Junta de Calidad

Ambiental junto con la EPA, monitorean constantemente el desarrollo de los procesos de limpieza de estas instalaciones, las cuales pueden durar, una vez iniciadas, hasta 30 años en completarse.



Gráfica 3.9 Niveles de agua de pozo NC-5 en Barceloneta para los años de 1988 hasta 2015.
Fuente: Servicio Geológico Federal.

3.4.3.2 Acuíferos aluviales

Los acuíferos aluviales se encuentran en las planicies inundables, principalmente en la Costa Sur y en algunos valles interiores como Caguas y Cayey. También existen acuíferos aluviales en la Costa Norte, en conjunto con las calizas, según descrita anteriormente. Estos acuíferos ocupan formaciones no-consolidadas de arenas y gravas permeables depositadas por los ríos antiguos, formaciones que ahora se encuentran por debajo de la superficie del terreno. Las áreas de mayor permeabilidad corresponden a las zonas de arenas y gravas depositadas en los cauces ancestrales. Los acuíferos más importantes de esta clase se encuentran en la Costa Sur (véase Ilustración 3.13). Los acuíferos aluviales son menos productivos en la Costa Norte debido a que hay más arcilla en los sedimentos aluviales, lo cual produce formaciones de poca

permeabilidad. Los acuíferos aluviales descargan sus aguas por el fondo del mar, los fondos de los ríos y zonas de humedales.

Las fuentes de recarga de los acuíferos aluviales incluyen:

1. La percolación de lluvia por el suelo.
2. Infiltración por los fondos de los ríos.
3. Infiltración producto de intervenciones humanas mediante percolación por canales en tierra y la aplicación de riego.
4. Filtraciones de tuberías rotas y el drenaje de pozos sépticos.

En la Costa Sur los ríos pierden flujo una vez salen de la zona de la montaña, recargando el acuífero y en algunos casos reduciendo su flujo superficial hasta cero durante el estiaje. Sin embargo, según el río se acerca a la costa, el flujo puede iniciarse nuevamente debido a la descarga del acuífero hacia el fondo del río.

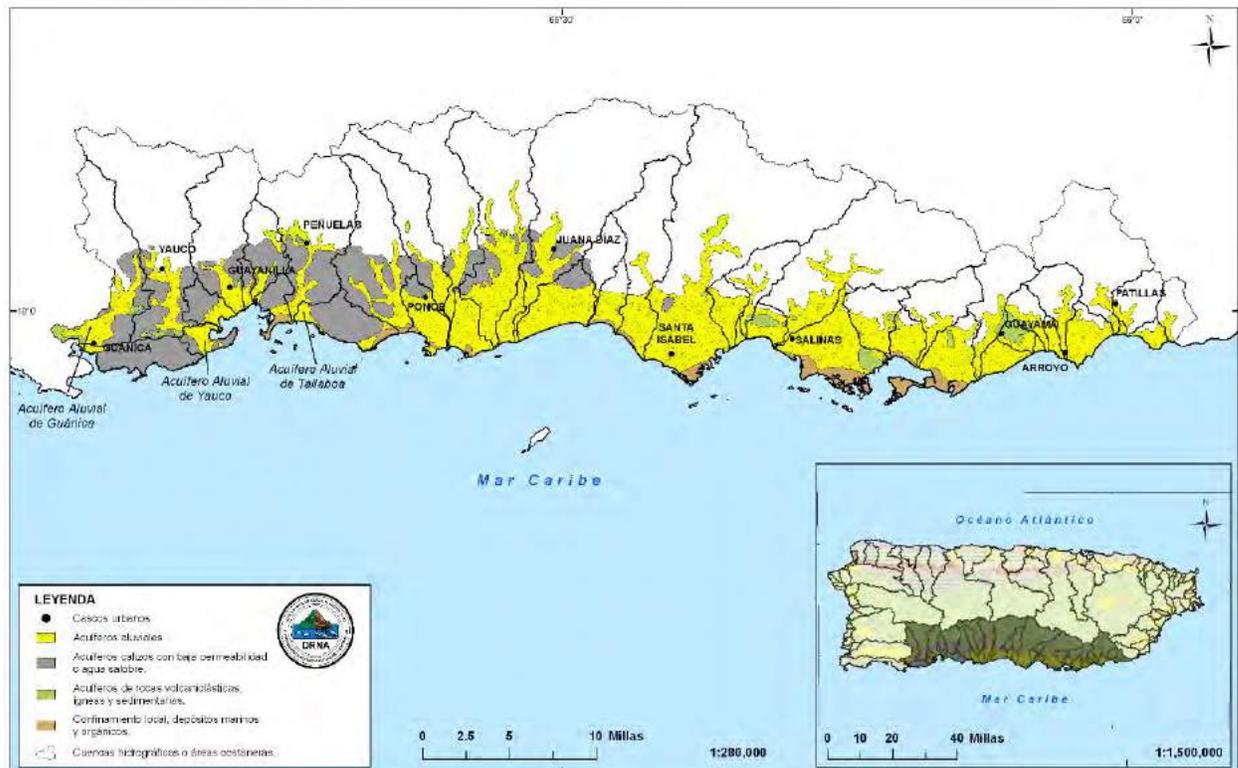


Ilustración 3.13 Acuíferos aluviales de la Costa Sur.

3.4.3.2.1 Acuíferos de la Costa Sur

La Costa Sur tiene una serie de acuíferos aluviales costaneros que se extienden desde Patillas hasta el Valle de Lajas. Estos acuíferos están formados por capas de aluvión (arena, piedra y grava) en una serie de “abanicos” deltaicos que yacen sobre rocas calizas y de origen volcánico. No existe lo que comúnmente se refiere como el “Gran Acuífero del Sur”. Cada valle aluvial forma un acuífero independiente, y las extracciones de agua en un valle no afectan los valles cercanos. Los acuíferos principales se encuentran en los valles aluviales de Patillas a Arroyo; Guayama a Salinas; Coamo; y Juana Díaz a Ponce. Al oeste de Ponce existen tres acuíferos aluviales adicionales menores también independientes: Tallaboa, Yauco y Guánica. Al oeste de Juana Díaz, hacia Ponce y hasta Peñuelas, las rocas calizas forman un acuífero de baja productividad, aunque en la parte norte de Peñuelas existen pozos de gran capacidad. En el Valle de Lajas el acuífero no es significativo o contiene agua salina, debido al clima y la geología de la zona

Los acuíferos de la Región Sur son una fuente importante de agua para consumo humano y actividades agrícolas. De estas fuentes se obtuvieron aproximadamente el 40.38 % de toda el agua que se utiliza en la zona. En los municipios de Salinas, Santa Isabel, Coamo y Guánica, la fuente principal de agua potable son los acuíferos aluviales. Para el 2010 estos acuíferos proveyeron 47.35 mgd de agua de los cuales la AAA extrajo 29.51 mgd, las fincas agrícolas 16.24 mgd, las industrias 0.45 mgd y la AEE 1.15mgd.

En general, el agua subterránea en los acuíferos de la Región Sur fluye de norte a sur. Esto se debe a que la recarga proviene de los ríos que fluyen desde las laderas montañosas al norte de los valles aluviales, así como de los canales de riego en la parte norte de los valles propios. Una vez que el agua se infiltra al subsuelo, fluye verticalmente por la fuerza de gravedad hasta la zona saturada, formando el manto o nivel freático. El nivel freático aumenta con la recarga, hasta el punto en que la fuerza de gravedad impulsa el agua desde las zonas donde la elevación es mayor hacia las de menor elevación. Normalmente la elevación del nivel freático es mayor en la parte norte de los valles aluviales descendiendo hacia la costa. Eventualmente, si el agua no se extrae del acuífero mediante pozos, descarga por gravedad en la costa o directamente al mar. Las lagunas y pantanos costaneros de la Región Sur son precisamente zonas de descarga del agua subterránea que afloran a la superficie. Cuando las extracciones de agua exceden la recarga, se deprime el nivel freático bajo el nivel de las

lagunas, pantanos o el mar, y cesa el flujo de agua natural. En varias zonas de los acuíferos de la Región Sur ocurre esta condición, siendo las zonas más afectadas las de Guayama, Salinas, Santa Isabel-Coamo y Ponce. La reducción en recarga al acuífero en estas zonas ha promovido mermas de hasta 40 pies en los niveles freáticos, propiciando la intrusión salina. Esto inutiliza parte del acuífero para todos los usos de agua.

Datos sobre los cambios en los niveles freáticos en la Región Sur han sido publicados por el USGS desde 1960. En estos mapas, definidos como “potenciométricos” (término que define el nivel del agua como una elevación relativa a la elevación promedio del nivel del mar), delimitan el nivel del agua subterránea en un área en un momento del tiempo. Esto quiere decir que las condiciones cambian con el tiempo, y los niveles pueden aumentar o disminuir dependiendo del balance entre la recarga y extracciones de agua en la zona del acuífero en particular.

Utilizando como ejemplo el acuífero en el área de Santa Isabel, los niveles potenciométricos publicados por el USGS de 1987 en comparación a los mapas de febrero 2003, 31 de marzo – 3 de abril de 2008 y abril 2014, observamos condiciones similares (Ilustración 3.14). Esta condición de descenso en los niveles de agua subterránea se refleja también en los acuíferos de las áreas de Salinas, Juana Díaz y Ponce.

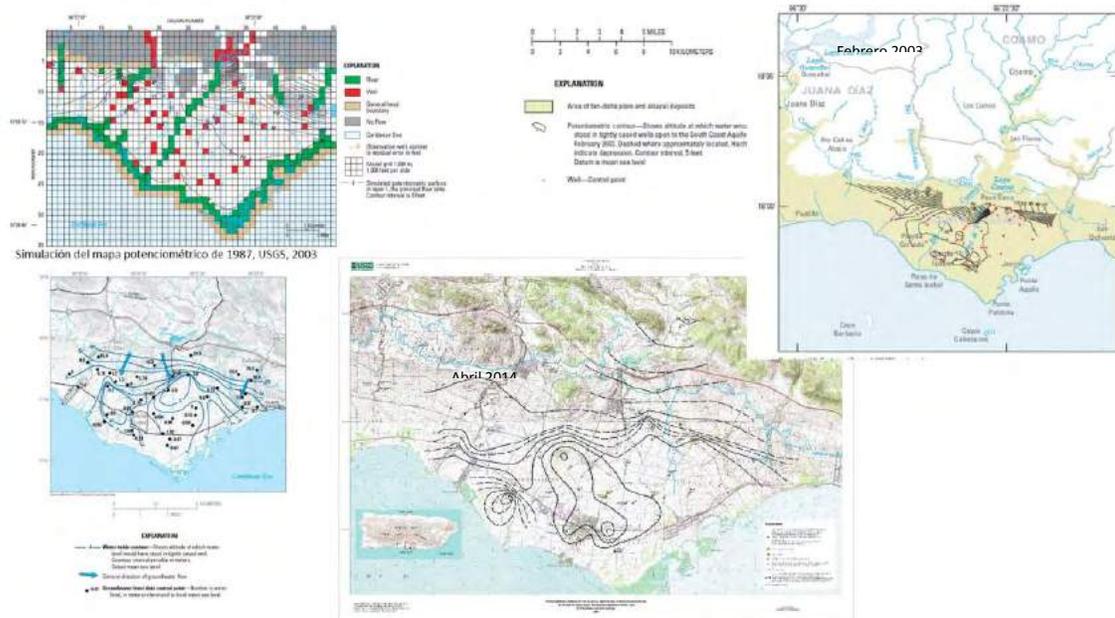


Ilustración 3.14 Estudios potenciométricos del acuífero de Santa Isabel, Fuente: Servicio Geológico Federal

Una de las fuentes de recarga más importantes para los acuíferos de la Región Sur es el excedente de agua que se utiliza para riego de las distintas cosechas y fincas en los Distritos de Riego operado por la AEE. Esto se debe a que las otras fuentes de recarga, incluyendo la lluvia y la escorrentía de ríos y quebradas, no son suficientes para reemplazar la cantidad de agua que se extrae al presente del acuífero. El riego de la zona de predios mediante que llega a las fincas a través de los canales de riego que son en tierra que se almacena en charcas o se riega por surcos en la finca y el riego aéreo mediante bombas y “cañones” fijos o móviles que aplican el agua directamente a las cosechas, ayudan a recargar el acuífero con agua de fuente superficial.

3.4.3.4 Acuíferos de los valles interiores

Los acuíferos en los valles interiores (véase Ilustración 3.15) generalmente consisten de depósitos aluviales o de roca fracturada con interconexión hidráulica con el aluvión. En algunos lugares se encuentran formaciones de caliza. Los acuíferos de mayor caudal en esta categoría son los de depósitos de aluvión en los valles de Caguas, Juncos y Cayey. Aunque algunos pozos en estas formaciones pueden tener capacidades de cientos de galones por minuto, normalmente el ritmo de extracción es mucho menor.

El ritmo de extracción de estos acuíferos está limitado por la cantidad de recarga de la lluvia, de los ríos y la capacidad de almacenaje dentro del acuífero. Estos acuíferos no tienen conexión hidráulica con el mar, por lo que no están sujetos a problemas de intrusión de agua salina. Sin embargo, la presencia de hierro y manganeso ocasiona problemas de calidad en algunos de estos acuíferos. Estos metales no representan un riesgo a la salud y pueden ser removidos fácilmente mediante oxidación.

Los acuíferos de los valles interiores generalmente tienen poca extensión y poco almacenaje. Por esta razón, es común que los pozos en esta región experimenten reducciones en sus caudales durante períodos de sequía y los niveles freáticos pueden variar sustancialmente debido a diferencias en el ritmo de recarga y descarga. El manejo de estos acuíferos depende del balance entre la extracción, la recarga y el flujo mínimo en los ríos que tienen conexión hidráulica con el acuífero. La extracción total de los acuíferos de los valles interiores fue de 14.02 mgd según datos del 2010 del USGS (Molina, 2010).

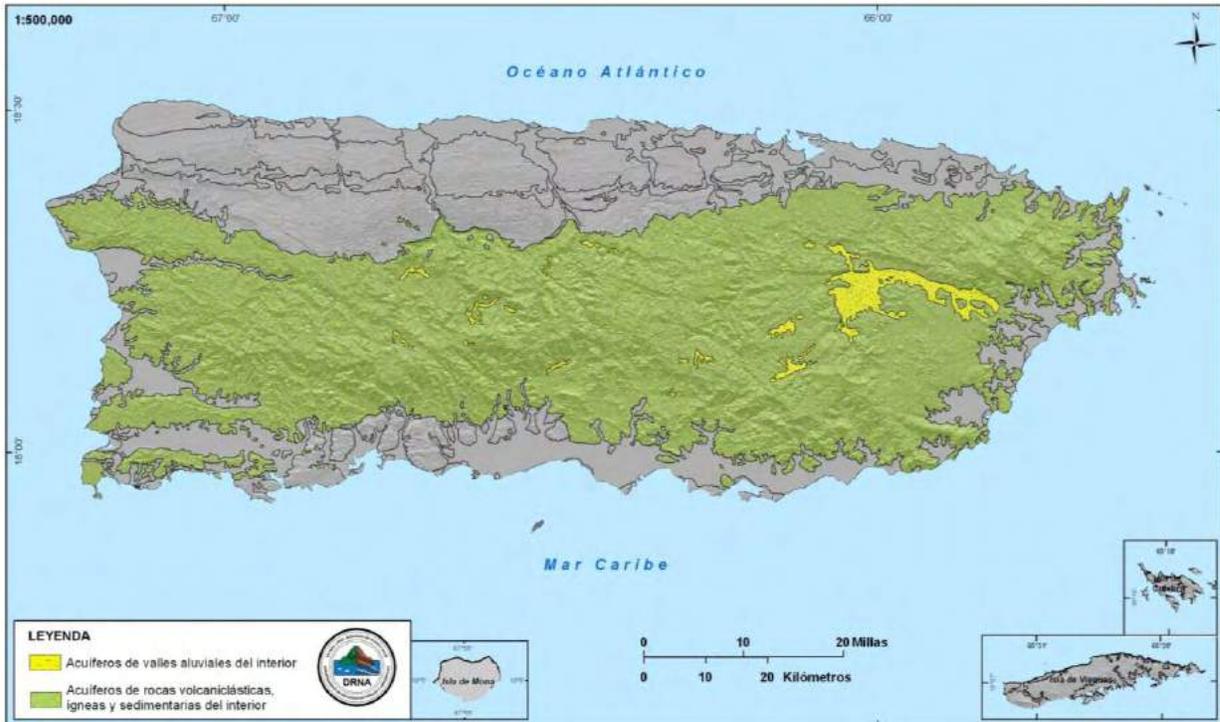


Ilustración 3.15 Acuíferos de la Región Montañosa en la Provincia del Interior Volcánica de Puerto Rico

3.4.3.5 Red de Monitoreo de Agua Subterránea

El Servicio Geológico Federal (USGS, por sus siglas en inglés), como parte del Acuerdo Colaborativo con las agencias del Estado Libre Asociado de Puerto Rico, monitorea el recurso de agua subterráneo por medio de 86 pozos, 16 de los cuales proveen información en tiempo real, los que se muestran en la Ilustración 3.16. Por medio de esta red se vigilan los niveles de los acuíferos freáticos además de vigilar la calidad del agua de los mismos. Esto permite tomar medidas de política pública y acciones concretas con información fiable sobre la condición de las aguas al momento. También permite advertir y por lo tanto, prevenir la intrusión salina a nuestros acuíferos y que la calidad de los mismos no se vea comprometida.

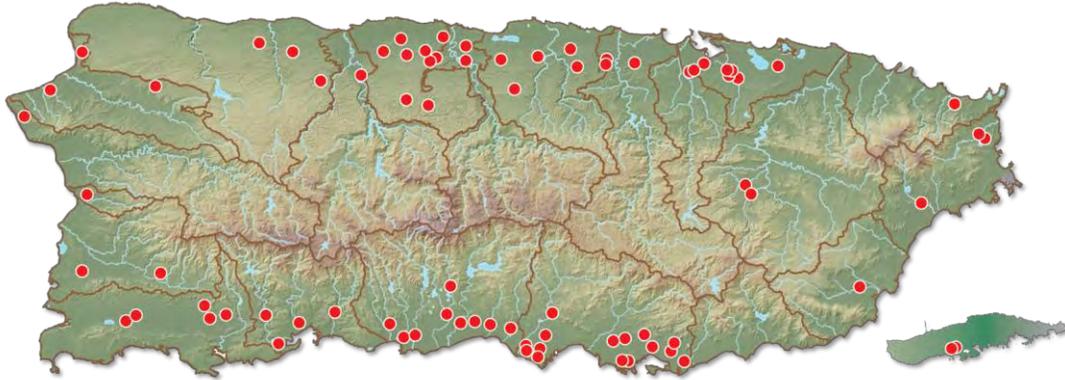


Ilustración 3.16 Red de Muestreo Subterránea de Puerto Rico. Fuente: Servicio Geológico Federal.

3.4.4 Estuarios

Los estuarios son zonas donde el agua dulce se mezcla con el agua del mar. Debido a que las mareas, el oleaje y las escorrentías varían en tiempo y espacio, el estuario es un sistema muy dinámico en lo que respecta a la salinidad de sus aguas y puede experimentar cambios dramáticos de una localización a otra, al igual que pueden fluctuar en el tiempo. En Puerto Rico hay cinco clases de estuarios.

El primero es el que se forma en la **zona de las desembocaduras de los ríos**. Como el agua dulce es menos densa que el agua salada de mar, estos estuarios tienden a estar estratificados, lo que significa que tienen una capa de agua dulce flotando sobre el agua de mar. En los ríos, el agua salada que entra tierra adentro se conoce como *uña de mar*, por entrar por debajo de la capa de agua dulce.

Los estuarios de la desembocadura de los ríos pueden estar separados del mar por una berma de arena excepto durante periodos cortos en que las crecidas remueven la berma en la boca. Esta berma se restablece por la acción del oleaje de la playa. El patrón de mezcla en esta clase de estuario se presenta en la Ilustración 3.17 la cual muestra la condición normal de estratificación vertical con agua salina en el fondo y una capa de agua dulce fluyendo por encima. En los ríos principales costeros, la *uña de agua salina* se puede extender hasta varias millas tierra adentro, ejemplos incluyen el Guajataca, Grande de Arecibo, Grande de Manatí, La Plata, Grande de Loíza y Espíritu Santo.

Cuando hay poco flujo de agua dulce, por ejemplo aguas abajo de embalses, la circulación en esta clase de estuario puede quedar esencialmente paralizada, el agua salina queda atrapada

en el fondo con muy poco insumo de oxígeno lo que puede crear condiciones anaeróbicas en el fondo del estuario por periodos prolongados. Lluvias intensas, provocan un aumento en el flujo de agua fresca en los ríos que a su vez elimina la cuña de agua salobre. Cuando merma el caudal de agua dulce, la cuña de agua de mar penetra nuevamente. El agua dulce se va mezclando con el agua de mar, formando aguas de salinidad intermedia. Esta mezcla se produce por la acción combinada de la marea, las olas y la fuerza de las escorrentías.

La segunda clase de estuario son aquellos asociados con **sistemas de lagunas costeras** con conexión directa al mar. Ejemplo de éstos son las lagunas en el área de San Juan (San José, Piñones, Torrecilla) y el Caño Tiburones (Arecibo-Manatí), cuya boca ha sido cerrada artificialmente, pero mantiene su conexión a través de la caliza permeable y manantiales de agua de mar. El agua dulce en las lagunas en el área de San Juan tiene su origen principalmente en la escorrentía superficial, mientras el Caño Tiburones se nutre principalmente de aguas subterráneas que brotan en esta zona.

El tercer tipo de estuario es el que forman los **ríos que desembocan en bahías abiertas** como la de Mayagüez y Arecibo. Estos estuarios son sistemas muy abiertos con poca extensión y predomina la acción y salinidad del mar.

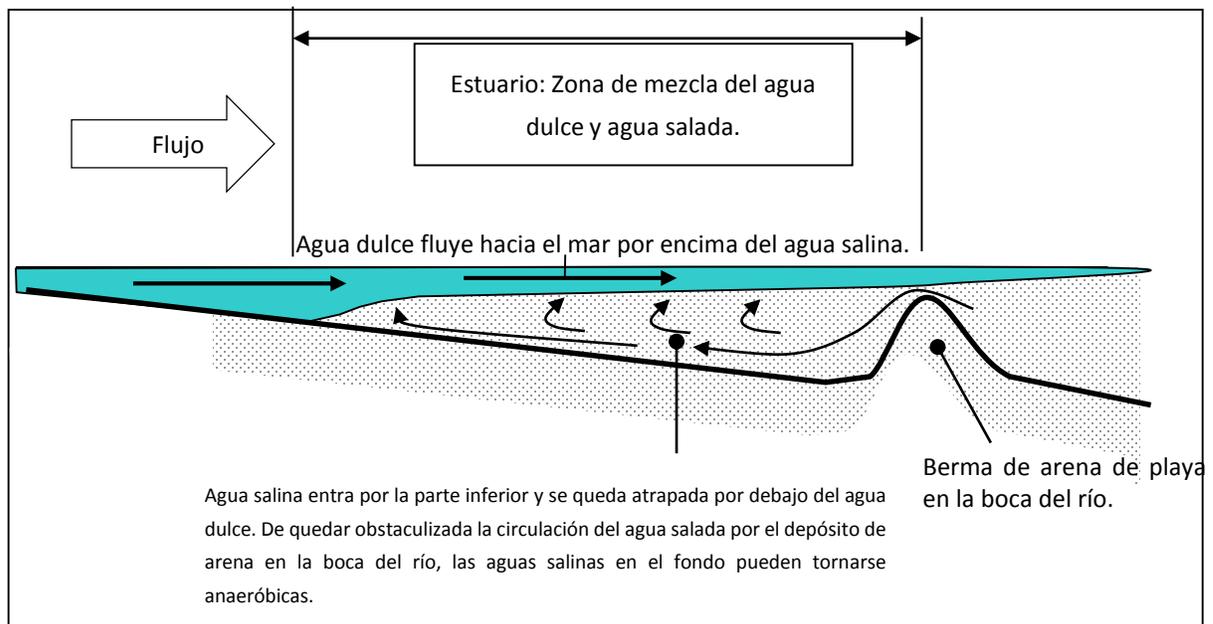


Ilustración 3.17 Diagrama de estuario con berma. Fuente: DRNA.

El cuarto tipo se forma cuando los **cuerpos de agua dulce desembocan en bahías semi-cerradas** como lo es la Bahía de San Juan, Guánica y Guayanilla, las cuales son de mayor extensión. En ambos tipos de estuarios, el intercambio entre el agua dulce y la salada es libre y directo.

El quinto tipo de estuario es el **salino** el cual se forma cuando los cuerpos de agua dulce son intermitentes. En regiones secas, la salinidad del estuario puede ser más alta que la del mar, ya que cuando el agua de mar se evapora, la salinidad aumenta. A este tipo de estuario se le conoce como estuario negativo, porque en vez de diluir la salinidad del mar, la aumenta. La bahía de Ceiba y la bahía Bioluminiscente de La Parquera son ejemplos de estuarios en Puerto Rico cuya salinidad es levemente superior a la del mar (Lugo y García Martínó, 1996).

Los estuarios son importantes para mantener la alta calidad de las aguas costaneras, acomodar las inundaciones, amortiguar las marejadas, y sostener la recreación y el turismo. Sin embargo, éstos son afectados negativamente por algunas actividades antropogénicas, entre ellas: las descargas de efluentes domésticos e industriales, aguas calientes, la sedimentación excesiva, derrames de petróleo y otros contaminantes. También resultan en daños negativos al estuario las estructuras para controlar el movimiento del agua dulce, tales como las presas, las tomas de agua superficial, bombas de drenaje y extracción de agua subterránea y otras que afectan el equilibrio del estuario.

3.5 Ecosistemas de agua dulce

3.5.1 Ecosistemas estuarinos

El estuario es el último ecosistema en utilizar el agua dulce antes de que ésta se diluya completamente en el mar. En los estuarios se pueden encontrar especies endémicas y otras que sólo vienen a desovar o a pasar una parte de su ciclo de vida. Este ecosistema es refugio para una diversidad de especies marinas, terrestres y de agua dulce, entre estas, peces, aves, moluscos, crustáceos, anfibios y reptiles. Algunas de estas especies pueden ser anfídomas, donde se reproducen río arriba y son sus larvas las que migran a través del continuo del río hasta el área del estuario. Un ejemplo de esto lo podemos observar en el pez olivo (*Sycidium plumieri*), el cual durante su etapa de adultez, se encuentra río arriba en las montañas de Puerto Rico. Sin embargo, durante su etapa de reproducción, las larvas migran río abajo, se desarrollan y comienzan a migrar río arriba como post-larva. El conocido festival del Cetí en

Arecibo se nombra a partir del sinnúmero de post-larvas capturadas por los pescadores en la desembocadura del río Grande de Arecibo durante la fase lunar menguante, entre los meses de julio-diciembre. Los camarones también muestran conductas similares, en donde sus larvas migran varios kilómetros desde los ríos en la montaña hasta el estuario y luego regresan río arriba nuevamente para continuar desarrollándose hasta su etapa de adultez. Estudios muestran que la migración de estos camarones ocurre con mayor frecuencia durante la noche (Lugo y García Martínó, 1996). Para estos organismos, cualquier impedimento que obstruya su acceso al estuario o al río implica una alteración a su ciclo de vida, imposibilitando así la reproducción de generaciones futuras. Esto resalta la necesidad de proteger el gradiente ribereño-marino para mantener las poblaciones de dichas especies.

Los estuarios poseen tres tipos de productores que realizan el proceso de fotosíntesis: micrófitos (algas, hierbas marinas e hierbas de pantanos), micrófitos bénticos (algas y otros tipos de plantas unidas al fondo) y fitoplancton (algas microscópicas flotantes).

Las comunidades de plantas asociadas a lugares como bosques pantanosos (ej. *Pterocarpus officinalis* o "palo de pollo"), pantanos, manglares y plantas flotantes también contribuyen a la cadena alimentaria del estuario. En Puerto Rico hay cuatro especies nativas de mangle: mangle rojo (*Rhizophora mangle*), mangle negro (*Avicennia germinans*), mangle blanco (*Laguncularia racemosa*) y mangle botón (*Conocarpus erectus*). Los mangles crecen en las áreas donde la alta salinidad (aprox. 5,000 mg/l) impide el crecimiento de plantas de agua dulce. Los mangles toleran un amplio rango de salinidad por lo que pueden crecer en lugares donde no hay insumos de agua dulce, como los cayos, las costas secas y lagunas hipersalinas. Igualmente, tienen la capacidad de crecer en lugares con muy baja concentración de sal, sobre todo las especies de mangle botón, blanco y negro. Los manglares de mayor productividad son aquellos que reciben insumos de nutrientes y agua dulce de los ríos.

3.5.2 Zona ribereña

Como parte de los ecosistemas acuáticos, existe una diversidad de flora que puede crecer tanto en el borde de los cuerpos de agua como dentro del cauce. Su ubicación está determinada por las adaptaciones que tenga la vegetación para crecer dentro o fuera del agua. Mucha de la vegetación asociada a los cuerpos de agua crece en la zona ribereña, la cual se establece paralelo al río o en la periferia de un lago, laguna o embalse.

En la zona ribereña se establece el bosque de ribera. Esta zona se describe como el ecotono o zona de transición, entre el ambiente terrestre y el acuático y se caracteriza por tener una vegetación muy distinta del bosque circundante. En la zona ribereña podemos encontrar plantas adaptadas a condiciones de anegamiento en el extremo más cercano al río, mientras que en el extremo opuesto está dominado por la vegetación terrestre (Tabacchi et al., 1998).

La zona ribereña es muy compleja y provee múltiples beneficios al ecosistema. Mediante el proceso de transpiración¹⁰, grandes cantidades de agua regresan a la atmósfera. Todo el material orgánico de origen vegetal producido fuera del cauce es considerado material orgánico alóctono¹¹. Este, al desprenderse de la planta, forma la hojarasca. Comunidades microbianas, como bacterias y hongos descomponen la hojarasca, formando el particulado del cual dependen otros organismos para su alimentación, entre ellos insectos y camarones filtradores y recolectores. El material más recalcitrante, como ramas y troncos, al caer dentro del cauce, reducen la velocidad del agua y forman pozas. Las pozas son necesarias para la retención del sedimento y los nutrientes, evitando que sean transportados río abajo y proveyendo refugio y alimento para macroinvertebrados acuáticos y peces.

La vegetación de ribera puede actuar como un filtro, ayudando a mejorar la calidad del agua. Las aguas de escorrentía, al ser interceptadas por la vegetación, disminuyen su velocidad, lo que permite que las partículas y las sustancias, como sedimentos y nutrientes, acarreados se depositen en la zona de la ribera. Esto contribuye a mantener una buena calidad del agua. Las raíces de la vegetación contribuyen a la consolidación y estabilización de los sedimentos reduciendo los procesos de erosión. El dosel de la vegetación intercepta la radiación solar, proveyendo sombra al río y manteniendo la temperatura del agua fresca (Ilustración 3.18).

En términos estructurales, la vegetación se puede distribuir vertical y horizontalmente. En la organización vertical se pueden observar estratos de vegetación, considerando al dosel como la parte más alta hasta la superficie del suelo. Estos estratos se subdividen de la siguiente manera: estrato arbóreo, compuesto mayormente por árboles de gran tamaño, que proporcionan sombra a las otras especies; arbustos de menor tamaño; y el estrato herbáceo,

¹⁰ Transpiración - Proceso por el cual el agua se evapora a través de los poros de las hojas de las plantas.

¹¹ Material alóctono - Material orgánico que es propiamente producido y consumido en el mismo lugar.

el cual está compuesto por helechos, las gramíneas y plantas bulbosas¹². El estrato lianoide está compuesto por lianas y bejucos que trepan en las ramas de los árboles, mientras que el estrato epifítico lo componen bromelias, musgos y helechos creciendo sobre las ramas de los árboles. Estos últimos tres estratos se describen como vegetación nemoral¹³ (Ilustración 3.19).

Esta organización vertical es típica de cuerpos de agua poco impactados, sin embargo pueden perderse en áreas donde la vegetación ribereña ha sido altamente impactada. La vegetación dominante en áreas impactadas son los pastos. También es común observar la vegetación que representa un valor ornamental o nutritivo para la comunidad. Son pocos los trabajos realizados en zonas ribereñas en Puerto Rico. Un ejemplo de uno de éstos es un estudio realizado en el Río Piedras donde se realizaron perfiles horizontales en 5 sitios a lo largo del mismo (Lugo et al., 2011). En este se encontró que la zona ribereña del Río Piedras es una muy alterada, dominada por especies adaptadas a disturbios. Las especies reportadas consistían de árboles introducidos como el flamboyán o árboles frutales como el guineo, el mangó y el aguacate (Lugo et al., 2001). La vegetación no leñosa más abundante reportada estaba dominada por gramas nativas como yerba peluda o arrocillo (*Paspalum paniculatum*).

Otra especie comúnmente observada en los bordes de los cauces de los ríos es el bambú, el cual fue introducido en el Bosque Experimental de Luquillo entre los años 1930 y 1940.

Además de la zonación¹⁴ vertical, podemos observar una distribución horizontal de la vegetación. Este aspecto se puede apreciar mejor en el borde inmediato al cuerpo de agua. Aunque la zonación horizontal no siempre es diferenciable, como es el caso de las zonas ribereñas en los bosques húmedos de montaña (Heartsill et al., 2009), sí se pueden establecer ciertos patrones y tendencias. Por ejemplo, en el borde de los ríos se pueden identificar cuatro zonas principales, comenzando desde la zona más terrestre: terraza, ladera, el borde del cauce y el cauce activo (en el centro del canal) (Ilustración 3.20).

¹² Plantas bulbosas- Plantas que tienen una reserva de alimento conocida como bulbo.

¹³ Vegetación nemoral- Vegetación que puede crecer en presencia de sombra.

¹⁴ Zonación - En biogeografía, distribución de animales y vegetales en zonas o fajas según factores climáticos.

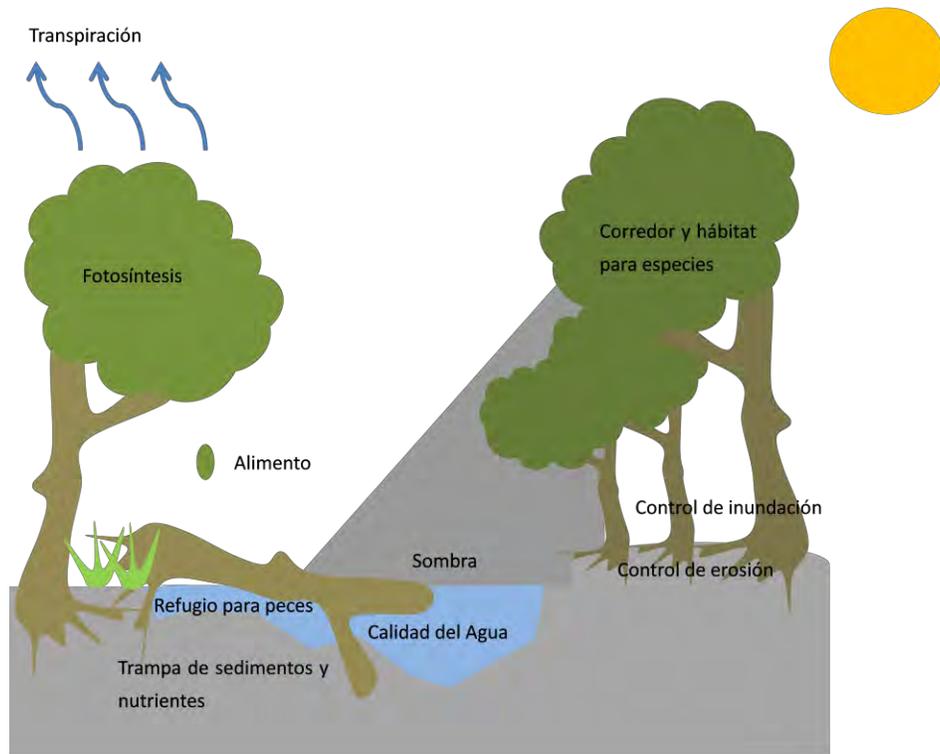


Ilustración 3.18 Beneficios que se obtienen al mantener el bosque ripario. Diagrama modificado de Elosegi y Diez (2009).

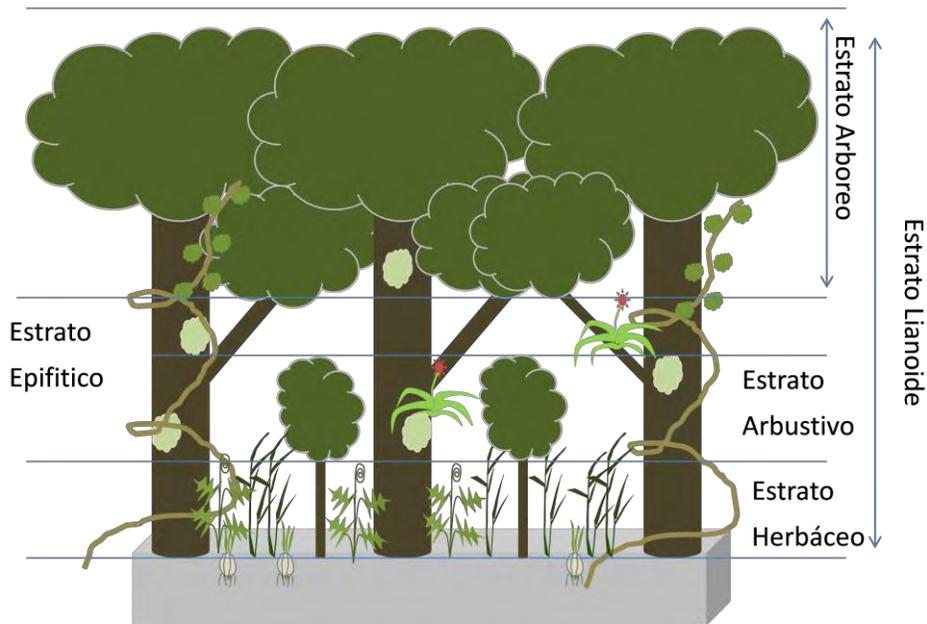


Ilustración 3.19 Estratos verticales de una zona ribereña típica poco impactada.

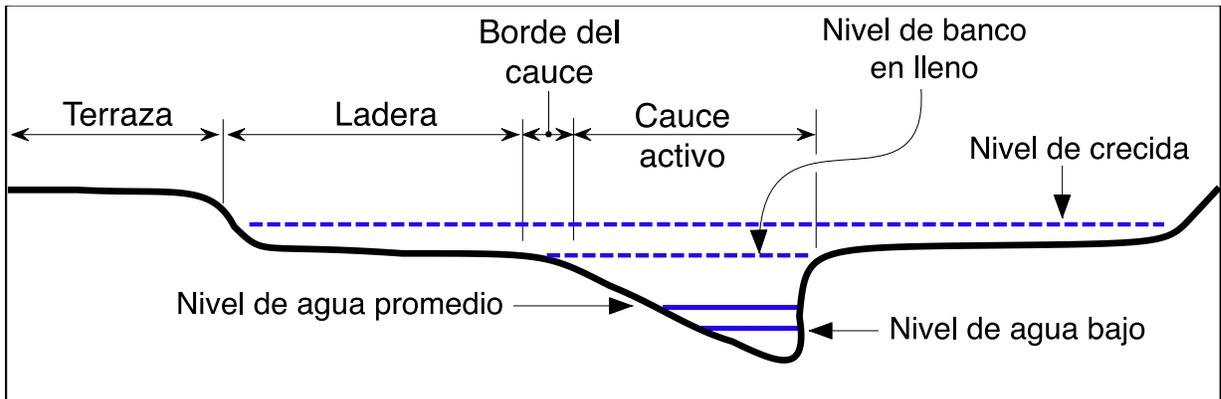


Ilustración 3.20 Perspectiva seccional de un canal indicando las zonas en las que puede crecer la vegetación de los ríos.

La terraza es la zona que se encuentra en el tope del banco y es donde se establece el bosque de ribera (Ilustración 3.20). Esta zona es menos húmeda. Por su proximidad al ambiente terrestre, tiende a ser la zona más susceptible a daño por el uso de terreno (ejemplo: actividades agropecuarias).

La ladera es el área de transición entre el canal activo y la planicie inundable y es el punto donde la vegetación terrestre y acuática puede encontrarse. Las plantas que crecen en esta zona pueden formar un agregado de raíces muy denso que protege los bancos de la erosión. Esta zona no siempre es obvia y en algunos casos, dependiendo de la pendiente, puede estar ausente (Ilustración 3.20).

El borde del cauce es la zona llana, inundada cuando el río se encuentra a nivel de cauce lleno, por lo que la vegetación dominante está adaptada a tolerar altas cantidades y fluctuaciones en el nivel de agua, como lo es la vegetación emergente, típica de humedal (Ilustración 3.21). La vegetación en esta zona favorece la disminución de la velocidad de las aguas de escorrentía, lo que ayuda a la deposición de sedimentos.

El cauce activo es el área inundada por agua todo el tiempo, por lo tanto, la vegetación establecida tiene altos requerimientos de agua y está adaptada a un flujo constante. Es poco deseable que haya mucha vegetación creciendo sobre el cauce ya que retardan la velocidad

del flujo y causan anegamiento¹⁵ de las tierras adyacentes. Tales efectos están regulados por la densidad y la flexibilidad de la vegetación, lo que a su vez depende de las especies presentes y la etapa de vida en que se encuentren. La vegetación que podemos encontrar en esta región son plantas sumergidas y las plantas flotantes, aunque también se pueden encontrar organismos fotosintéticos creciendo sobre la superficie de rocas (algas epilíticas). Si es un río intermitente, esta vegetación estará ausente. Durante épocas de estiaje las gramíneas pueden invadir el cauce, pero son removidas al aumentar la descarga.



Cauce del río Portugués mostrando vegetación típica de los ríos.

Entre la vegetación acuática, están las plantas emergentes. Las hojas de estas plantas son rígidas y flotantes y crecen formando un entrelazado denso de las raíces (Ilustración 3.21). Estas plantas contribuyen al mejoramiento de la calidad del agua al prevenir la erosión y la resuspensión de los sedimentos. Es típico encontrar hierbas, juncos, pastos y helechos.

¹⁵ Anegado - Áreas inundadas.

Las plantas flotantes se encuentran en áreas donde el movimiento del agua es más lento, como ocurre en los embalses (Ilustración 3.21). Estas plantas en su mayoría son angiospermas que se caracterizan por tener hojas duras y cerosas que le permiten la flotabilidad. Otras tienen un peciolo¹⁶ largo y elástico, que se extiende desde los sedimentos. También hay especies que crecen libremente en el agua de forma que sus raíces quedan suspendidas en la columna de agua.

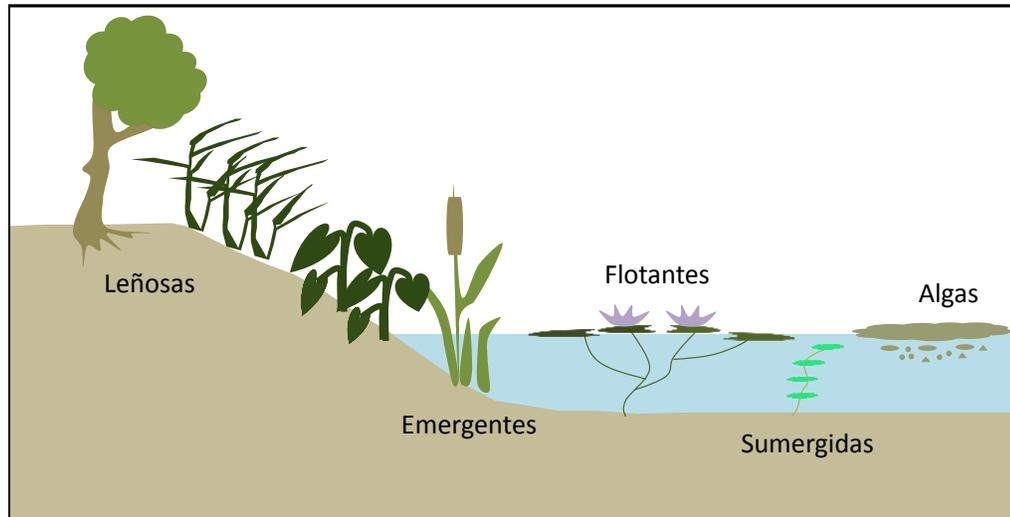


Ilustración 3.21 Algunas comunidades de plantas presentes en los cuerpos de agua.

La comunidad de las plantas sumergidas se caracteriza por tener adaptaciones para vivir completamente cubiertas por el agua. Algunas especies producen flores que pueden sobresalir sobre la superficie del agua (Ilustración 3.21).

En áreas más profundas, la flora es dominada por especies de algas. En la superficie de las rocas se forman agregados de microorganismos conocidos como biopelículas. De los organismos fotosintéticos, las diatomeas tienden a ser las más abundantes. En áreas donde el flujo de agua es más lento, se pueden observar “tapetes” de algas flotando sobre la superficie del agua, que pueden estar compuestos por agregados de algas filamentosas y

¹⁶ Peciolo- es el rabillo que une la lámina de la hoja a su base foliar o al tallo.

cianobacterias (Ilustración 3.21). En la columna de agua también se pueden encontrar formas planctónicas de algas, las cuales son más abundantes en cuerpos de agua lénticos¹⁷.

En el cauce activo, puede haber rocas expuestas sobre la superficie del agua, las cuales sirven de sustrato para el establecimiento de ciertos grupos de plantas, como las briofitas y algunos helechos. En menor abundancia también se pueden establecer otras plantas, como lo son las *Lepanthes sp.*, una especie de orquídea de tamaño muy pequeño, cuyas poblaciones se restringen a bosques de montaña (Ackerman 1995, Tremblay 1997).

3.5.3 Los Humedales

Los humedales de agua dulce o ecosistemas palustrinos, están asociados a los arroyos, ríos, estanques, lagos, canales o embalses. Estos, son ecotonos entre ecosistemas acuáticos y terrestres, y se encuentran frecuentemente inundados o saturados por aguas superficiales y subterráneas. Esta condición favorece el crecimiento de vegetación hidrofítica, es decir vegetación adaptada a suelo inundado y bajas concentraciones de oxígeno en los sedimentos, o anegamiento. Estos humedales pueden ser semi-permanentes, pueden perdurar permanentemente inundados, o tener agua en movimiento, lo que determina el tipo de vegetación presente. Se han identificado cerca de 670 especies de plantas vasculares que habitan en los humedales.

De acuerdo al Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU, en Puerto Rico se reconocen 7 tipos de humedales, entre ellos están:

1. el pantano de agua dulce (cubierto mayormente por vegetación leñosa, algunas especies típicas son: palo de pollo (*Pterocarpus sp.*), corazón cimarrón (*Annona glabra*) y úcar (*Bucida buceras*));
2. la ciénaga de agua dulce (la cual se encuentra inundada ocasionalmente por agua dulce, dominada por plantas leñosas y herbáceas, tales como malojilla (*Eriochloa polystachia*), emajagua (*Hibiscus tiliaceus*) y eneas (*Typha domingensis*));
3. el acuático de agua dulce (típico en desembocaduras de ríos, lagos y charcas con vegetación flotante e inundadas, representado por especies como junco de ciénaga

¹⁷ Lénticos- Son cuerpos de agua cerrados que permanecen en un mismo sitio sin fluir.

- (*Cyperus giganteus*), jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y lirio de agua (*Nymphaea sp*));
4. los pantanos de agua salada (manglares, donde dominan especies como mangle rojo (*Rhizophora mangle*) y (*Avicennia germinans*));
 5. las ciénagas de agua salada (dominado por herbáceas y leñosas inundados ocasionalmente por agua salada, dominan especies como *Acrostichum aureum*, *marunga* (*A. danaefolium*) y mangle blanco (*Laguncularia racemosa*));
 6. planicies costeras de agua salada (salitrales asociados al mangle, dominado por verdolaga (*Batis marítima*) y verdolaga roja (*Sesuvium portulacastrum*)) y;
 7. el acuático marino (dominado por praderas de yerbas marinas).

Muchos organismos, incluyendo peces, camarones, entre otros, incluso animales que se clasifican como vulnerables o en peligro de extinción, usan los humedales como zonas de cría y como hábitat, búsqueda de alimento y refugio. Además, estos ecosistemas contribuyen a la recarga de los acuíferos, al control de la erosión, regulación de las aguas de escorrentía y reducen el efecto de las inundaciones y sirven de amortiguamiento contra los contaminantes que puedan haber disueltos en las aguas de escorrentía.

3.5.4 La fauna

Los ríos presentan una diversidad importante de fauna acuática. Existen diez especies de peces nativos en la isla: Familia Gobiidae (5 especies), Eliotridae (3 especies), Mugilidae (1 especie) y Anguillidae (1 especie) (Cooney y Kwak, 2013). Podemos igualmente encontrar 18 especies de camarones pertenecientes a tres familias (familias Palaemonidae, Atyidae y Xiphocarididae) y una especie de cangrejo perteneciente a la familia de Pseudohelphusidae (Perez-Reyes et al., 2013). También, se encuentran varias especies de caracoles. Entre éstas se destaca la familia Neritidae, *Neritina virgínea*, conocido comúnmente como caracol burgao, el cual se encuentra particularmente en los ríos y quebradas del este de la Isla (Blanco y Scatena 2005). Todas las especies nativas de Puerto Rico requieren migrar entre el agua dulce y el agua salina para completar su ciclo reproductivo (descrito en detalle en la sección 3.5.5), con la excepción del cangrejo buruquena. Entre los peces nativos sobresalen el dajao (*Agonostomus monticola*), el olivo (Sirajo, cetí o setí, *Sycidium plumieri*), la saga o goby (*Awous tajasica*), la guavina (*Gobiomorus dormitor*), la anguila (*Anguilla rostrata*) y el morón (*Eleotris pisonis*). Peces como el dajao y el olivo pueden saltar o trepar pequeñas cascadas,

por lo que pueden encontrarse a más de 10 Km (6.2 millas) aguas arriba desde la desembocadura de los ríos debido a que estos peces tienen la aleta pélvica modificada en forma de “chupón”, lo que les permite adherirse a la superficie de las rocas para brincar las cascadas (Ilustración 3.22). La guavina, la anguila y la saga alcanzan distancias intermedias y usualmente su distribución es limitada por barreras pequeñas, ya que su capacidad de salto es menor. Finalmente, el morón, con menos capacidad de natación, se aleja poco de las aguas salobres, por lo que se limita a los tramos de la planicie costera y la parte alta del estuario. En la ilustración 3.23 se presenta el rango de distribución de peces nativos de Puerto Rico (Cooney y Kwak, 2013). En esta ilustración se presentan los tramos de ríos que, debido a la ausencia de barreras, están accesibles a las especies nativas (colores azul y verde). De haber alguna barrera, como lo es una represa, algunas de estas especies no pueden continuar su migración. Ejemplo de esto lo podemos ver en la Ilustración 3.23, donde los colores rojo y negro representan los tramos de ríos en los que hay poca o ninguna presencia de especies nativas, debido a la existencia de barreras.



Ilustración 3.22 Pez Goby. Foto tomada en el río Grande de Manatí en el año 2008. Fuente: DMPA.

La mayor parte de las especies de camarones se encuentran distribuidas en los tramos no intervenidos de todos los ríos y quebradas alrededor de la Isla (Pérez, 1999). Las especies más abundantes son la gata (*Atya* spp.), chiripi (*Xiphocaris elongata*) y los bocú, coyunteros o leopardos (*Macrobrachium* spp.). Éstas han sido reportadas a más de 24 km (15 millas) aguas arriba de la desembocadura de algunos ríos

(Santiago, 1979) y han sido detectados en algunos lugares con represas. Por ejemplo, Kwak et al. (2007) detectaron camarones en seis de diez lugares con represa.

En la zona ribereña se encuentra la buruquena (*Epilobocera sinuatifrons*), que baja a los ríos y quebradas para alimentarse de insectos, camarones pequeños y caracoles. Al estas no tener un ciclo de vida migratorio, se puede encontrar aguas arriba de represas (Kwak et al., 2007).

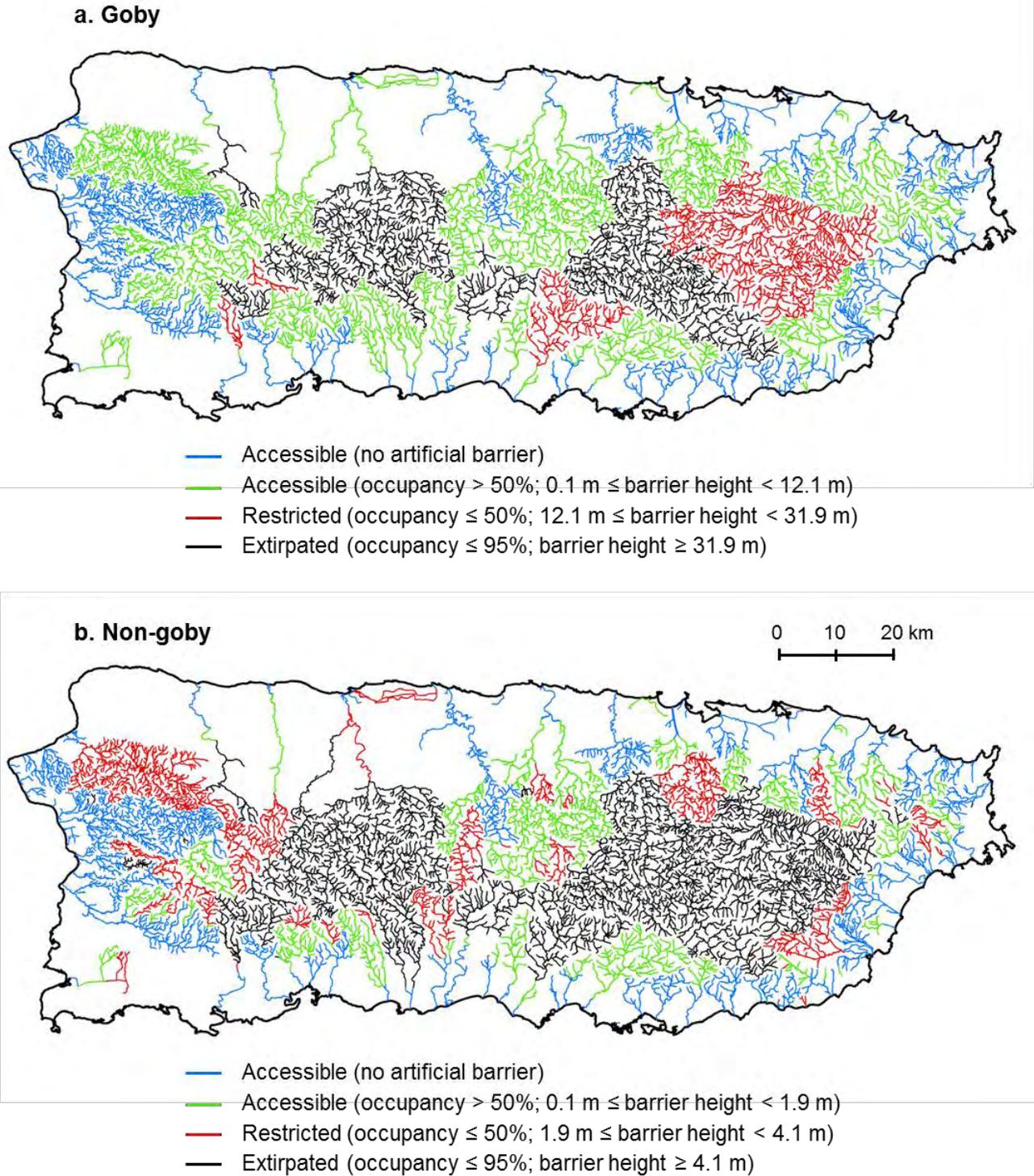


Ilustración 3.23 Rango de distribución de peces nativos de Puerto Rico (Cooney y Kwak, 2013).

Dentro de los embalses se pueden encontrar solo una especie de pez nativo, la guavina. Estudios indican que existen poblaciones aisladas en el embalse Carite y Patillas (Bachelier et al., 2004; DRNA sin publicar). Con el propósito de fomentar la pesca recreativa en los embalses, en la primera mitad del siglo veinte, se introdujeron diferentes especies de peces que tuvieran la capacidad de completar su ciclo de vida en agua dulce. Entre las especies de valor recreativo se encuentra la lobina (*Micropterus salmoides*), Tucunaré (*Cichla ocellaris*), Barbudo (*Ictalurus spp.*), las chopas (*Lepomis spp.*) y la tilapia (*Tilapia spp.*). También, estos peces exóticos se han establecidos en los ríos y estuarios de Puerto Rico (Tabla 3.6). Sin embargo, sus impactos no han sido evaluados formalmente. Algunas especies exóticas de peces y caracoles se han dispersado desde los embalses donde han sido introducidos como parte de programas de control biológico. Ejemplo de esto lo son los caracoles *Thiara granifera* y *Marisa cornuarietis*, los cuales fueron introducidos como controles biológicos como parte del programa de erradicación de la bilharzia. Otras han sido introducidas accidentalmente. Ejemplo de esto es el caracol manzana, *Pomacea paludosa*, el cual se encuentra establecido en algunos humedales y podría afectar negativamente a las especies nativas por ser un consumidor voraz (Williams, et al., 2001). Otras especies introducidas accidentalmente incluyen: especies de las familias Characidae, Cyprinidae, Ictaluridae, Aplocheilidae, Poecillidae, Centrarchidae y Cichlidae. El pez *Parachromis managuensis* se ha reportado en Lajas y Sabana Grande y se caracteriza por alimentarse de otros peces y ser muy agresivo. El género, *Pterygoplichthys spp.* (pleco) ha sido poco estudiado y se cree que hay tres o más especies presentes en Puerto Rico. Estos se han reportado en los embalses Caonillas, Cidra, Dos Bocas, Guajataca, Guayabal, La Plata, Loíza, Luchetti y Patillas, al igual que en los ríos de Bayamón, Grande de Loíza, Guanajibo, Gurabo, Loco y Río Piedras. Estos peces representan una amenaza potencial a los ecosistemas acuáticos ya que pueden comprometer la estabilidad de los bancos aumentando la erosión y las descargas de sedimentos.

Existen otras especies exóticas que también amenazan los cuerpos de agua dulce en Puerto Rico. Ejemplo de esto lo es la almeja asiática, la cual se encuentra establecida en los embalses de Cidra, Dos Bocas, Guajataca, La Plata, Loíza y Patillas. Su dispersión podría ser detrimental para la almeja nativa *Eupera portoricensis* y la almeja ubicua *Pisidium casertanum*, como ha ocurrido en otras partes del mundo (Williams, et al., 2001). También se encuentra el langostino australiano, *Cherax quadricarinatus*, el cual se ha reportado en varios ríos y quebradas de Puerto Rico, tales como Grande de Loíza y Espíritu Santo. También se ha

reportado en los embalses Loíza, La Plata, Cidra y Carite y en el sistema Valle de Lajas. En otras partes del mundo su liberación imprudente ha causado la desaparición de los camarones nativos debido a la transmisión de enfermedades y a la modificación del hábitat.

3.5.5 Ciclos de vida

Debido al aislamiento geográfico de Puerto Rico, las especies nativas de peces, camarones y caracoles guardan relación con ancestros recientes marinos y aparentemente colonizaron los ríos costeros como un mecanismo evolutivo para escapar de la depredación (Vermeij, 1987) y aprovecharse de la disponibilidad de alimento (Grosset al. 1988). Por esta razón, estas especies de ríos costeros aún requieren de las aguas marinas para completar sus ciclos de vida para el desarrollo larval.

Este ciclo de vida de la fauna acuática nativa es diádroma, donde las especies necesitan que exista una conectividad directa entre el agua dulce y el agua salada. Estos patrones migratorios de nuestras especies nativas pueden ser de dos tipos: catádromos o anfídromos (véase Ilustración 3.24). Las especies catádromas (ej. la anguila) habitan en los ríos en estado juvenil y adulto. Los adultos regresan al mar para reproducirse y liberar los huevos. La etapa de vida larval también la pasan en el mar. Después de permanecer a la deriva de las corrientes marinas durante varios meses, las larvas regresan a los estuarios para migrar río arriba y convertirse en adultos.



Foto: Anguila, (*Anguilla rostrata*), cortesía de Beverly Yoshioka

En el caso de las especies anfídromas, como lo son el dajao, el olivo, la saga, la guavina y los camarones, viven y se reproducen en el río, donde luego sus larvas son arrastradas hasta el mar donde continúan su desarrollo. Después de varios meses, las postlarvas migran de los estuarios hacia el río, estableciéndose en diferentes elevaciones río arriba para convertirse en juveniles y adultos. Los camarones perteneciente a las familias Palaemonidae, Atyidae y Xiphocarididae y los caracoles burgao (*N. virginea*) son anfídromos (Nieves 1998, by Scatena, 2005). Otras especies de peces y camarones realizan migraciones locales entre las aguas marinas costeras y los estuarios para reproducirse o alimentarse.

Los cangrejos también migran entre los hábitats terrestres costeros y el mar para completar sus ciclos de vida. Por ejemplo, durante ciertas épocas del año las hembras migran hacia las playas para desovar en el mar.

Varias semanas después, grandes grupos de individuos pequeños migran nuevamente hacia la tierra. En los manglares sobresalen el juey (*Cardiosoma guanhumi*) y en las playas varias especies de las familias Ocypodidae (cangrejos fantasmas y violinistas) y Coenobitidae (cobitos). En la Isla de Mona aún son comunes estas migraciones denominadas “las cobadas”.



Cobada en Mona, Foto DRNA

Estas migraciones a lo largo de los ríos y quebradas, las costas y los bosques ocurren durante épocas particulares del año y pueden denominarse como ritmos ecológicos. Por ejemplo, según pescadores, las mayores migraciones río arriba del cetí (postlarva del pez olivo *Sycidium plumieri*) ocurren uno o dos días después del cuarto creciente o de la luna llena entre septiembre y noviembre y duran dos días. También se cree que estas migraciones masivas ocurren después de las crecientes o golpes de agua (Erdman, 1986). Migraciones masivas de cetí, de hasta 90 millones de individuos, se han observado en el río Grande de Añasco (Erdman, 1961). Se estima que éstos pueden recorrer unas 18 millas en 10 días.

PLAN INTEGRAL DE RECURSOS DE AGUA
JUNIO, 2016

Tabla 3.6 Especies exóticas establecidas

Nombre Científico	Nombres Comunes	Fecha de Introducción y Procedencia
FAMILIA CHARACIDAE		
<i>Dorosoma petenense</i>	Sardina de agua dulce, Threadfin Shad	1963 Georgia, U.S.A.
FAMILIA CYPRINIDAE		
<i>Carassius auratus</i>	Goldfish	1900 China
<i>Pimephales promelas</i>	Fathead Minnow	1957 Norteamérica
FAMILIA ICTALURIDAE		
<i>Ameiurus catus</i>	Barbudo de canal, White Catfish	1938 Norteamérica
<i>Ameiurus nebulosus</i>	Brown Bullhead	1916 Norteamérica
<i>Ictalurus nebulosus marmoratus</i>	Marbled Bullhead	1946 Norteamérica
<i>Ictalurus punctatus</i>	Liza, Channel Catfish	1938 Norteamérica
FAMILIA POECILLIDAE		
<i>Gambusia affinis</i>	Mosquito fish	1914 Norteamérica
<i>Poecilia reticulata</i>	Guppy	1935 Suramérica
<i>Poecilia vivipara</i>	Top Minnow	
<i>Xiphophorus helleri</i>	Swordstail	1935 Mexico
<i>Xiphophorus maculatus</i>	Southern Platyfish	1935 Mexico
<i>Xiphophorus variatus</i>	Variable Platyfish	
<i>Barbus conchoniis</i>	Minó rosado, Minow	
FAMILIA CENTRARCHIDAE		
<i>Lepomis auritus</i>	Redbreast Sunfish	1957 Norteamérica
<i>Lepomis gulosus</i>	Warmouth Bass	
<i>Lepomis macrochirus</i>	Chopa de agalla azul, Bluegill Sunfish	1916 Norteamérica
<i>Lepomis microlophus</i>	Chopa caracolera, Redear Sunfish	1957 Norteamérica
<i>Micropterus coosae</i>	Redeye Bass	1958 Sureste de U.S.A.
<i>Micropterus salmoides</i>	Lobina de boca grande, Largemouth Bass	1946 Norteamérica
FAMILIA CICHLIDAE		
<i>Astronotus ocellatus</i>	Oscar	
<i>Cichla ocellaris</i>	Tucunaré, Peacock Bass	
<i>Tilapia aureus</i>	Golden Tilapia	
<i>Tilapia urolepis</i>	Redeyed Tilapia	
<i>Oreochromis mossambicus</i>	Tilapia moteada, Tilapia	1958 Mozambique, Africa
<i>Tilapia rendalli</i>	BlueTilapia	
<i>Parachromis managuensis</i>	Jaguar gapote	Centroamérica
<i>Amphilophus labiatus</i>	Red devil	Centroamérica

Fuentes: Lugo y colaboradores (2001), DRNA (1986), Erdman (1984 y 1987).

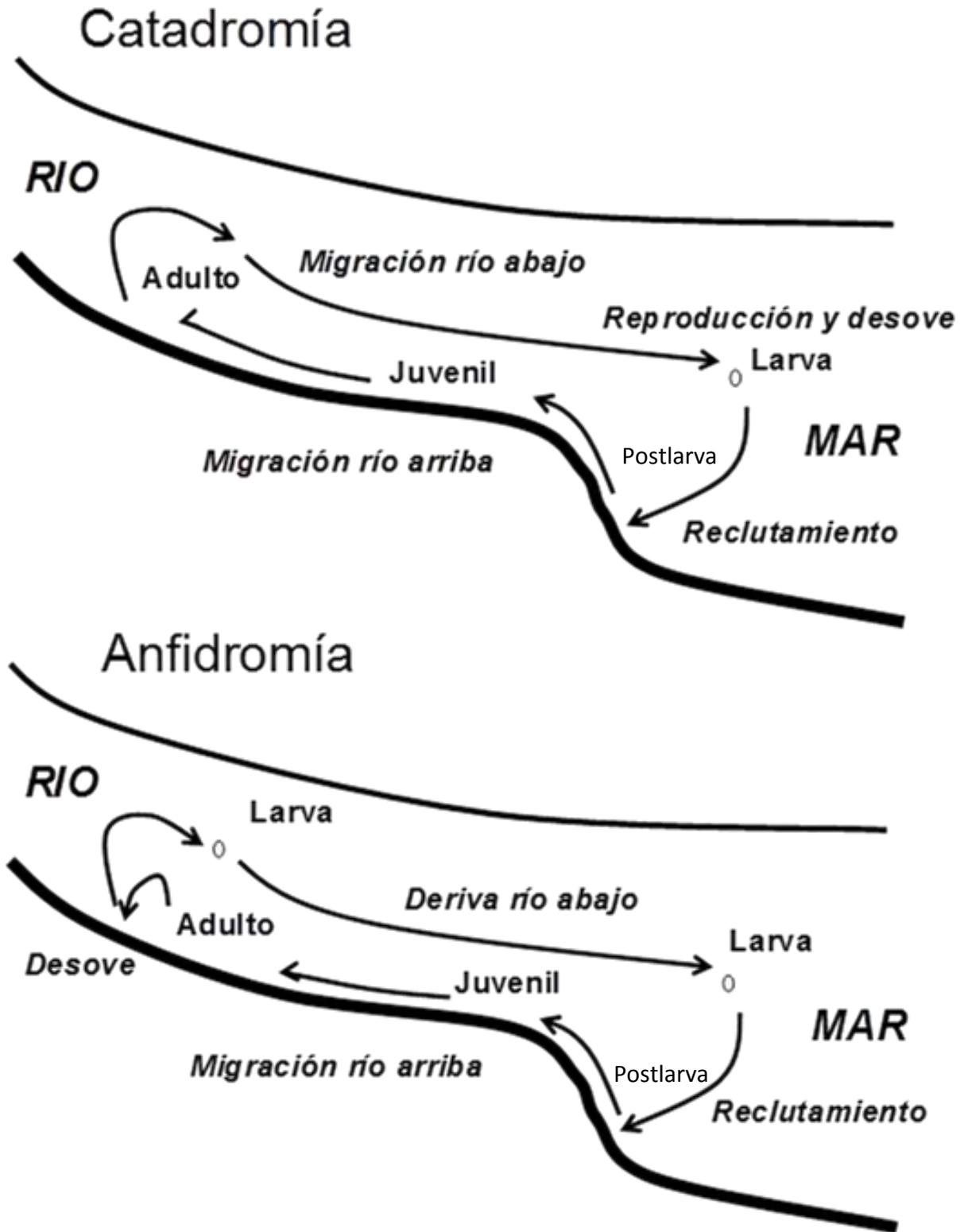


Ilustración 3.24 Ciclos de vida de especies diadromas de los ríos y estuarios de Puerto Rico.

Las migraciones río arriba de camarones juveniles *Macrobrachium*, que pueden ocurrir al mismo tiempo que las del cetí (Erdman, 1986) y son aparentemente comunes en los ríos Grande de Arecibo y Grande de Manatí y han sido incorporadas en la cultura popular. Existen varios estudios sobre la distribución y dinámica de las poblaciones de los camarones *Atya* y *Xiphocaris* (Covich et al. 1991, 1996 y 2003; Pyron et al. 1999). Sin embargo, sus migraciones han sido poco estudiadas. Se conoce que las postlarvas y los juveniles migran aguas arriba entre febrero y abril, mientras que las larvas migran hacia el mar entre septiembre y octubre durante la época reproductiva de los adultos (Scatena, 2001). Otros estudios indican que los patrones migratorios de los camarones están ligados a las condiciones del flujo de agua: menor flujo permite la migración de estos río arriba, mientras que altos niveles en el flujo pueden impedir las migraciones (Kikkert et al., 2009). Por otro lado, mantener el régimen del flujo es importante para incrementar la disponibilidad de hábitats, promover el transporte de larvas río abajo (Covich et al., 2006), además de limpiar el río de químicos y sedimentos. La migración en ambas direcciones ocurre mayormente de noche para evitar la depredación (March et al., 1998; Johnson y Covich, 2000; Pérez-Reyes et al. 2015).

Algunos estudios reportan la ocurrencia de migraciones masivas de caracoles burgao (*Neritina virginea*) en los ríos Mameyes y Espíritu Santo en el área del Yunque (Pyron y Covich, 2003; Blanco, 2005). Estas migraciones ocurren varios días después de las crecientes a lo largo de todo el año, pero son más frecuentes en la época de lluvias entre agosto y diciembre. Grupos de hasta 200 mil individuos (con densidades de hasta 7,000 individuos por metro cuadrado) se han observado en la parte baja del río Mameyes. Durante estas migraciones los individuos recorren cerca de 50 metros (150 pies) diarios (Blanco, 2005).

3.5.5.1 Conectividad de los ecosistemas

Existe una conexión directa entre los ecosistemas de agua dulce y de agua salada. El agua dulce transporta sedimentos y nutrientes desde las cabeceras de los ríos hasta la parte baja de la cuenca, nutriendo las playas y previniendo la erosión costera. Por otro lado, los organismos que migran desde las costas hacia el agua dulce aportan minerales y los nutrientes derivados del mar, los cuales se encuentran de forma limitada en el agua dulce (Cooney y Kwak, 2013). Estos procesos dinámicos se pueden ver afectados por estructuras, restringiendo tanto la migración de los organismos como el flujo de sedimentos, minerales y nutrientes (Neal et al., 2009, McDowall, 2010).

Las barreras migratorias más obvias son las estructuras físicas localizadas dentro del cauce de los ríos como son las represas. En el estudio realizado por Cooney y Kwak (2013) se evaluaron 203 represas, que variaban de 0.1 a 98.0 m de alto. De acuerdo a este estudio, estructuras con una altura mayor 32 m eliminan el paso de 95% de las especies. Los efectos inmediatos de las represas pueden ser contrarrestados mediante la modificación de la estructura haciendo mallas. Otra estrategia, que ha tenido mucho auge a través de los Estados Unidos es la remoción de aquellas represas que están en desuso. Esto ha ayudado al restablecimiento de las especies de peces y a la recuperación de los procesos hidrológicos y geomorfológicos. Algunos ejemplos son el río Elwha en el estado de Washington, en los ríos Calapooia y Rouge en el estado de Oregón.

Otras estrategias para contrarrestar las barreras lo son las escaleras de peces, las cuales ayudan a mantener la conectividad de las especies a través del continuo ribereño. Estas escaleras minimizan las diferencias en elevación entre el embalse y río abajo, permitiendo que los peces y camarones puedan migrar río arriba de la represa. La presencia de estas escaleras en las represas de Puerto Rico permitirían el paso de estas especies nativas, las cuales están ausentes río arriba de algunas represas (Ilustración 3.25). Sin embargo, la falta de mantenimiento de estas estructuras impide su funcionamiento, eliminando la posibilidad de migración de las especies (Cooney y Kwak, 2013).

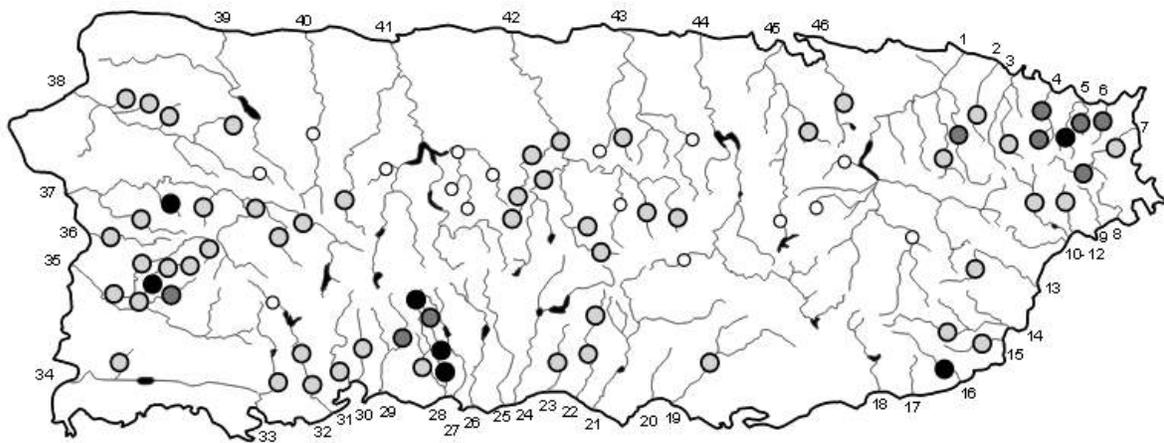


Ilustración 3.25 Presencia y densidad de peces nativos en los ríos de Puerto Rico (Kwak et al., 2007).

3.5.6 Embalses o lagos artificiales

Los 39 embalses construidos entre 1913 y 2015, en su mayoría se han transformado en ecosistemas o lagos artificiales que albergan comunidades de plantas y animales, lo que les añade valor ecológico y de recreación.

Actualmente, el DRNA administra instalaciones para la pesca en los embalses Guajataca, La Plata, Toa Vaca y Lucchetti. También es administrador y dueño de las instalaciones para la pesca en el embalse Cerrillos. Además, a través de su Programa de Pesca Recreativa, maneja la pesca recreativa, realiza siembras de lobinas y chopas producidas en el Vivero de Peces de Maricao, y hace encuestas a los pescadores recreativos. En Puerto Rico hay aproximadamente 60,000 personas que pescan en los embalses con fines recreativos. Frecuentemente, se realizan torneos de pesca de la lobina y el tucunaré.

La mayor parte de la fauna presente en los embalses ha sido introducida para suplementar la dieta de la población, además de proveer oportunidades de recreación para la gente a través de la pesca deportiva. La actividad de introducción de peces se inició entre los años 1915 y 1916 y continúa hasta hoy por el DRNA. Las familias de peces comúnmente introducidas son Centrarchidae, Cichlidae y Poecillidae con seis especies cada una. La tilapia (*T. mossambica*) es la especie más abundante en embalses tales como Loíza, Patillas y Toa Vaca y también se encuentra en los ríos. La tilapia es una de las especies de mayor tolerancia a la contaminación y a la reducción en los niveles de oxígeno en el agua.

En los embalses también se encuentran algunas especies nativas de peces y camarones. Las especies presentes, en su mayoría, son aquellas capaces de trepar por las represas bajas. Por lo tanto, especies que requieren del desarrollo larval en el mar para completar su ciclo de vida pueden encontrarse en bajas densidades en estos embalses y ausentes en los embalses con represas altas (mayores de 30 m, Cooney y Kwak, 2013, Rivera, 1979). En el río Matrullas, aguas arriba del embalse, aún se conservan poblaciones de camarones y peces migratorios a pesar de que la represa fue construida en el año 1934 (Ortiz-Carrasquillo, 1981). Debido a que la represa Matrullas es baja y siempre tiene agua vertiendo, los camarones pueden migrar hasta el mar y volver a subir aguas arriba de la represa.

El manejo de los embalses tiene un efecto directo sobre la reproducción y mortandad de las especies de peces. Por ejemplo, la reproducción de la lobina depende de que haya un nivel

de agua estable en los embalses entre diciembre y marzo debido a que hacen sus nidos en aguas llanas. Si los embalses no son manejados correctamente, los nidos de las lobinas pueden quedar completamente expuestos durante eventos de estiaje. Así mismo, niveles de agua bajos en los embalses puede provocar mortandad de peces, por los cambios abruptos que se dan en la columna de agua, como ocurrió en el embalse La Plata con el paso de la tormenta Bertha.

En los embalses, se encuentra una gran variedad de vegetación acuática. Entre ellas podemos encontrar: las eneas, los juncos, las sagitarias, lentejillas, jacinto de agua, lechuguilla, helechos de agua, los lirios de agua, algas planctónicas y filamentosas (ej. Chara). En bajas densidades esta vegetación puede proveer oxígeno, hábitat, refugio y alimento para los organismos acuáticos, purifican los compuestos tóxicos y pueden ayudar a atrapar los sedimentos. Sin embargo, estos beneficios se pierden cuando la vegetación presente en los embalses es muy abundante. Un exceso de nutrientes en los embalses puede resultar en incrementos en la densidad de la vegetación acuática, lo que a su vez provoca un proceso de eutroficación. A medida que la vegetación muere, el proceso de descomposición reduce el oxígeno disponible para los organismos acuáticos, disminuyendo el valor ecológico y recreativo del embalse. Un crecimiento muy abundante de la vegetación acuática no solo reduce la calidad del agua, sino que interfiere con el uso, operación y mantenimiento del embalse, ya que causan olor y sabor desagradable al agua, aumentando los costos para potabilizar el agua.

Cuando la vegetación acuática es muy abundante, esta transpira grandes cantidades de agua, hasta 5 veces más de lo que se evapora en una superficie de agua equivalente. Esto puede reducir la cantidad de agua disponible para consumo. En términos estructurales, si la vegetación es muy abundante, se agrega un elemento de riesgo mayor, ya que la estructura de la pared del embalse no fue diseñada para sostener el peso asociado a la vegetación. La vegetación también puede atascarse entre las turbinas y afectar la estructura de la represa.

3.6 Uso de agua en Puerto Rico

El uso de agua se puede clasificar como “consuntivo” o “no consuntivo”¹⁸ (Ilustración 3.26). Se entiende como consuntivo los usos que típicamente crean limitaciones para su utilización subsiguiente debido a un cambio en su calidad o sitio de disposición. Ejemplos del uso consuntivo incluyen el uso doméstico, industrial y agrícola. Usos no-consuntivos incluyen aquellos en que se aprovecha el agua, pero no se consume, liberándola cercano a su punto de extracción luego de su uso. Ejemplos de este último es el pasar agua por turbinas hidroeléctricas o utilizar agua en los sistemas de enfriamiento a base de intercambio de calor.

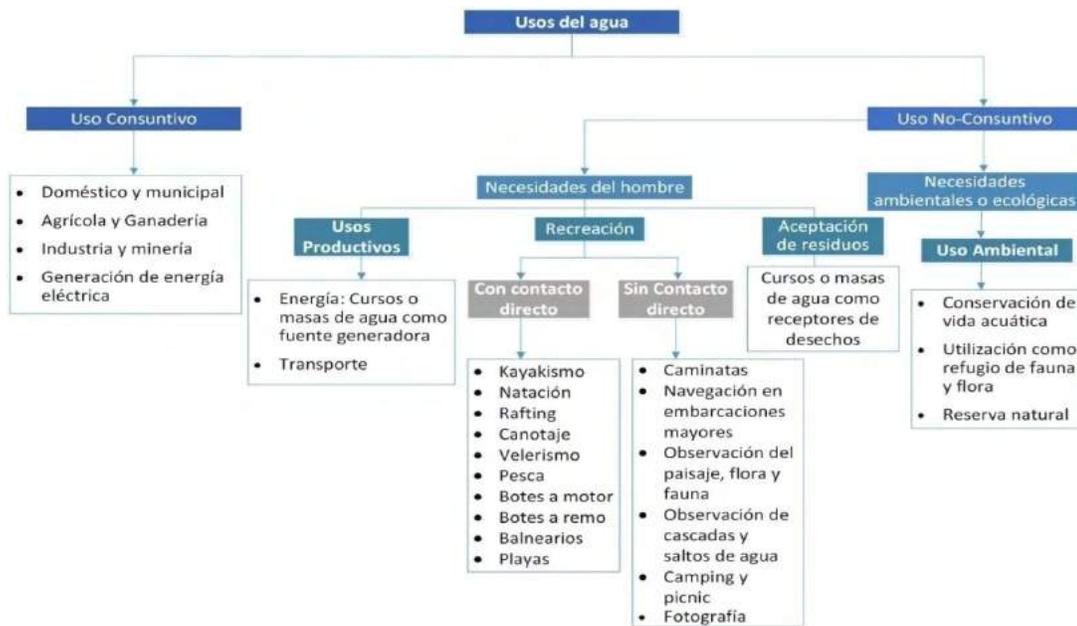
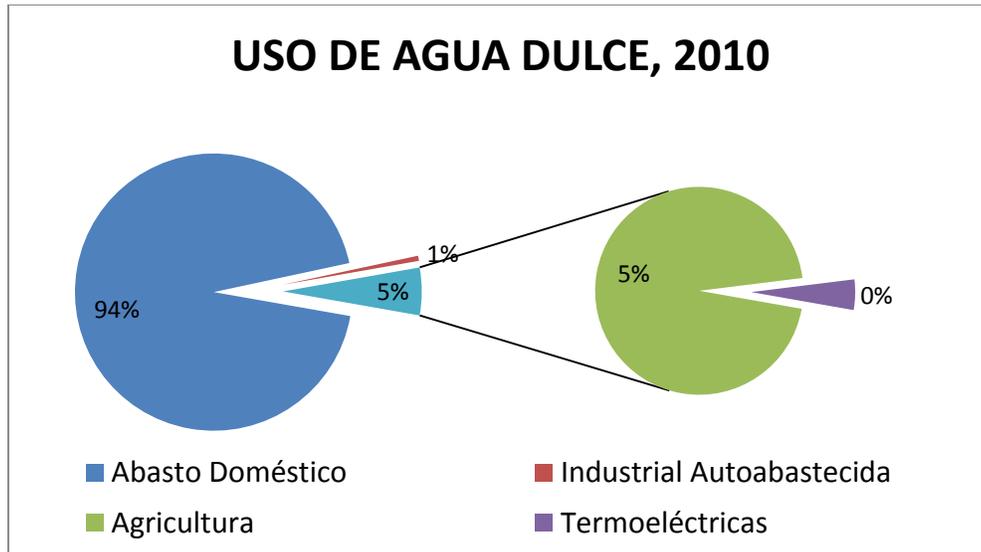


Ilustración 3.26 Tipos de usos del agua (Modificada de Tipología de los Usos del Agua). Fuente: Universidad Austral de Chile.

¹⁸ El uso consuntivo, son aquellos usos que extraen o consumen el agua de su lugar de origen (ríos, lagos y aguas subterráneas), sin que se devuelva a su sistema hídrico; mientras que el uso no consuntivo del agua corresponde a los usos que ocurren en el ambiente natural de la fuente de agua sin extracción o consumo del recurso (Global Water Partnership, 2013).

De acuerdo con los datos recopilados por el USGS para el 2010¹⁹, en Puerto Rico se extrajeron para uso consuntivo 724 mgd de agua dulce para satisfacer las necesidades sociales y económicas del País. De este total, 606 mgd (83.7%) provienen de fuentes superficiales y 118 mgd (16.3%) de agua subterránea. Los embalses constituyen la principal fuente de abasto, proveyendo 328.39 mgd (54%) mientras que las tomas directas de ríos aportaron 262 mgd (43%). La porción restante, 23.56 mgd (4%), se extrajo de los sistemas de canales de riego (Molina, 2010).

El abasto doméstico es de 677 mgd, lo que representa un 93.6% de la utilización del agua dulce y es el principal renglón de uso del agua extraída de las fuentes en Puerto Rico (véase Gráfica 3.11). El abasto doméstico incluye los usos de los sectores servidos por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA): residencial, comercial, industria liviana, gobierno y uso público y las de comunidades y familias que operan sus propios sistemas de extracción de agua (sistemas Non-PRASA). Para éste último, doméstico autoabastecido, el agua utilizada fue de 2.4 mgd.



Gráfica 3.11 Uso consuntivo de agua dulce en Puerto Rico. Fuente: Molina, 2010.

¹⁹ El USGS publica su reporte de usos de agua cada 5 años. Al momento de la revisión de este Plan, no se ha completado la revisión de los datos de usos de agua para el año 2015. No obstante, los datos preliminares para el 2013 reflejan una reducción en las extracciones de la AAA de aproximadamente 10 mgd.

El sector agrícola utiliza un total de 45.91 mgd para cultivo y crianza de animales. De esta cantidad, 27.97 mgd, proviene de pozos operados por los propios agricultores y los restantes 17.94 mgd de fuentes superficiales, incluyendo los sistemas de riego operados por la Autoridad de Energía Eléctrica (AEE). La industria autoabastecida, las termoeléctricas de la AEE y la termoeléctrica privada AES utilizan 4.3 mgd, 1.7 mgd y 0.2 mgd, respectivamente, de agua subterránea proveniente de pozos desarrollados por los dueños.

En cuanto a usos no consuntivos, la AEE utiliza un promedio anual de 556 mgd de agua dulce para la generación de electricidad en las plantas hidroeléctricas. Este uso depende de la disponibilidad del agua y el patrón de demanda de energía eléctrica. Por ende, durante periodos con bastante lluvia se operan las turbinas diariamente para suplir la demanda en las horas pico, mientras que en estiaje no hay generación por la falta de agua. Luego de pasar por las turbinas, el agua utilizada es devuelta a los ríos y está disponible para otros usos aguas abajo en la cuenca. Por ejemplo, las aguas utilizadas en las turbinas en las plantas hidroeléctricas de Caonillas y Dos Bocas son devueltas al río y utilizadas aguas abajo para suplir a la toma del proyecto del Superacueducto. De igual manera, las aguas utilizadas en las plantas hidroeléctricas Yauco I y Yauco II del sistema Lucchetti-Locho, son destinadas para usos agrícolas en el Valle de Lajas y domésticos en los municipios de Yauco, Sabana Grande, San Germán, Lajas y Cabo Rojo. Por otra parte, la AEE y Ecoeléctrica extraen aproximadamente 2,281 mgd de agua salina para enfriamiento en sus plantas generatrices de energía eléctrica. La AEE extrae agua de mar en Puerto Nuevo (San Juan), Palo Seco (Cataño), Aguirre (Salinas) y Costa Sur (Guayanilla) al igual que la Ecoeléctrica en Peñuelas. Estas aguas son descargadas nuevamente a las bahías o canales costaneros de donde fueron extraídas, pero con una temperatura mayor.

3.6.1 El concepto de rendimiento seguro

Debido a los impactos económicos adversos y disloques sociales ocasionados por la falta del agua, los sistemas de abasto doméstico e industrial deben proveer un alto nivel de confianza para evitar tener que interrumpir el servicio, aún en periodos de sequía. El rendimiento seguro de una fuente de abasto se define como la cantidad de agua que puede ser extraída de forma confiable y sin producir una escasez intolerable aún durante la sequía más intensa. El estándar de diseño para abastos domésticos e industriales es de mantener el flujo normal el 99 por ciento del tiempo (Q_{99}). En un uno por ciento (1%) de los días, el racionamiento

debe ser de un nivel tolerable. El cumplimiento con este criterio conlleva proveer un servicio donde no haya racionamiento en más de 36 días en cada década. En el diseño de sistemas de riego es común planificar a base de un nivel de confianza más cercano al 90 por ciento.

Niveles de confianza altos en el suministro de agua para uso doméstico sólo pueden ser alcanzados si la capacidad de la planta de filtración coincide con el rendimiento seguro de la fuente de abasto. En muchas áreas de Puerto Rico hay racionamiento de servicio en periodos de precipitación baja debido a que las plantas de filtración normalmente operan a una capacidad muy superior al rendimiento seguro de su fuente de abasto, por tanto, durante periodos de sequía es necesaria una reducción dramática de la tasa de extracción acostumbrada. Por ejemplo, durante la sequía de 1994 la extracción del Embalse Loíza (supliendo a la planta de filtración Sergio Cuevas), fue reducida a solamente un 30% de su producción normal, y en el embalse De La Plata fue reducida a 33%. El racionamiento más fuerte implantado para la Zona Metropolitana de San Juan fue para los abonados que se sirven de la planta de filtración Sergio Cuevas. El mismo ocurrió durante la sequía del 2015, donde la producción de agua en la planta de filtración Sergio Cuevas se redujo a menos del rendimiento seguro del embalse (63 mgd) a partir del 14 de mayo de 2015 y fue disminuyendo hasta un mínimo de 19 mgd el 10 de septiembre de 2015. Ya para el 20 de septiembre de 2015 se llenó el embalse y se comenzó a extraer nuevamente un volumen mayor al rendimiento seguro, aunque se ha mantenido a un volumen menor de 90 mgd.

3.6.2 Requerimiento de caudales ambientales

El uso consuntivo del agua requiere que se establezcan objetivos en cuanto a los usos y funciones que se esperan obtener de un cuerpo de agua. En la medida que el régimen de caudal de los ríos y quebradas se ha transformado para suplir las necesidades de los seres humanos, han surgido diferentes conceptos (Parra, 2012; MAVDT, 2008). De acuerdo a Moore (2004), se han utilizado 57 términos similares para definir caudales ambientales, los cuales varían según surgían las preocupaciones debido a las alteraciones hidrológicas que ocurrían alrededor del mundo y en la medida que nueva información científica se hacía

disponible. En la Conferencia de Brisbane²⁰, realizada en Australia en 2007, se reconocen los caudales ambientales como esenciales para la salud de los ecosistemas y el bienestar humano, lo que le da un reconocimiento global al concepto.

Los dos términos más empleados son caudales ecológicos y caudales ambientales, los que si bien se utilizan como sinónimos, tienen diferencias sustanciales (Rodríguez et al., 2011). En general, el caudal ecológico se define como el flujo de agua requerido para mantener las necesidades mínimas de los ecosistemas acuáticos existentes en un área de influencia antropogénica para mantener la estabilidad y cumplir con las funciones esperadas. En esta definición no se incluyeron aspectos como beneficios ambientales, sociales y económicos. Sin embargo, estos aspectos son integrados en el concepto caudal ambiental, el cual requiere que se incluya suficiente agua en los ríos y quebradas para asegurar, además del funcionamiento ecológico, beneficios ambientales, sociales y económicos aguas abajo. Es decir, se busca satisfacer las necesidades de las especies acuáticas al igual que las necesidades fijadas por la sociedad (Rodríguez et al., 2011; MAVDT, 2008). El caudal ambiental es utilizado para determinar la cantidad de agua necesaria para rehabilitar el ecosistema a un estado o condición requerida (King et al., 1999). De esta forma, los caudales ambientales son una herramienta de gestión integrada de los recursos hídricos. Sin embargo, se requiere de una referencia específica en los estatutos de aplicación vigentes (Rodríguez et al., 2011, según citado en UNESCO, 2005). La aplicación de caudales ambientales requiere de un involucramiento social, un marco institucional y normativo, así como de políticas claras y efectivas.²¹ El caudal ambiental es una herramienta necesaria para la gestión integral de los recursos de agua de Puerto Rico dentro del marco de respuesta al Cambio Climático.

El primer esfuerzo documentado para definir estos conceptos como parte de la política pública ambiental en Puerto Rico se realizaron en el 2008 con la Primera Conferencia de Flujos Ambientales celebrada por el DRNA. En ésta participaron expertos en los campos de la

²⁰ The Brisbane Declaration, acuerdo firmado en la “10th International River Symposium and Environmental Flows”, celebrada en Australia en el 2007, con la participación de más de 750 científicos, economistas, ingenieros, administradores del recurso agua y funcionarios de gobiernos de más de 50 países acuerdan que los caudales ambientales son esenciales para la salud de los ecosistemas de agua dulce y para el bienestar de la humanidad en general por lo que se comprometen a restaurar y conservar caudales ambientales en sus países.

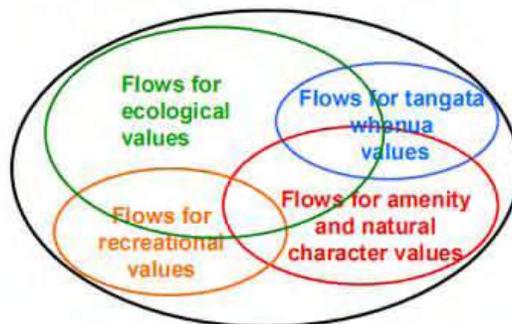
²¹ UNESCO, 2014. Qué son los Caudales Ambientales y cuál es la perspectiva de su aplicación en Uruguay. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N° 34

ecología e hidrología. Uno de los logros principales de esta conferencia fue la definición de caudal ecológico, basado en la realidad de los ríos de Puerto Rico. En esta conferencia se estableció lo siguiente: *“el caudal ecológico es aquel que mantiene las poblaciones de organismos naturales del río en condiciones óptimas así como su valor ecológico, tomando en consideración la calidad y el régimen de variación del flujo de agua para mantener los componentes, funciones y procesos de los ecosistemas acuáticos que proporcionan bienes y servicios a la sociedad”*.

Este término se establece para garantizar agua para el uso ecológico e incluye lo siguiente:

1. Proteger los hábitats naturales que cobijan la diversidad de flora y fauna.
2. Mantener la habilidad de los cuerpos de agua para ejercer las funciones ambientales de éstos, como por ejemplo, la dilución de contaminantes.
3. Amortiguar los extremos climatológicos e hidrológicos.
4. Preservar el paisaje, el valor escénico y recreacional de los cuerpos de agua.

En Puerto Rico, se aplica el concepto de flujos ambientales mínimos para las tomas de agua, los cuales son determinados por el DRNA caso a caso. Debido a que pocos ríos aún preservan sus caudales relativamente intactos y dada la alta densidad de tomas en los ríos (véase Ilustración 3.27), el DRNA aplica hoy en día un estándar de flujo ambiental más estricto en protección de la vida acuática, y solicita el mantener un flujo mínimo de Q_{99} aguas abajo de tomas nuevas mientras se realizan los estudios que establezcan los caudales ambientales necesarios para los ríos de Puerto Rico. Además, requiere el que se incorpore en el diseño y operación de sistemas de extracción, los elementos necesarios para mantener las vías migratorias de las especies nativas en cada río.



Componentes de Flujos Ambientales

Fuente: Ministerio del Ambiente Manatú Mo Te Taiao, www.mfe.govt.nz



Ilustración 3.27 Tomas de agua de la AAA (2015).

En Puerto Rico se ha realizado un esfuerzo por mantener un flujo ambiental mínimo para la protección de la vida acuática, pero también se entiende que el estándar del Q_{99} sirve exclusivamente para calcular la extracción de agua con el fin de lograr niveles de confianza altos en el suministro de agua potable, más no contempla criterios para mantener la integridad ecológica del cuerpo de agua. Se requiere de esfuerzos adicionales para definir la metodología adecuada para estimar los caudales ambientales de los ríos y quebradas de Puerto Rico con el fin de poder tener una mejor gestión integral en la administración del recurso.

3.6.3 Rendimiento seguro de tomas superficiales

El ritmo de extracción al que puede ser sometido un río está limitado por la magnitud del flujo que discurre en el lugar de la toma en cualquier momento determinado. El rendimiento seguro del río, en el lugar de la toma, se computa ordenando una serie histórica de datos de flujo promedio diario para determinar el valor excedido el 99 por ciento del tiempo. Por norma, sólo se permite extraer el flujo que excede al que es requerido para sostener las necesidades ambientales del ecosistema acuático. Es decir, el flujo disponible para usos

doméstico, industrial y agrícola es, en teoría, el excedente del Q_{99} . No obstante, hay muchos lugares en la Isla donde las tomas y los embalses desvían la totalidad del flujo, sin mantener un flujo ambiental aguas abajo. Por esta razón, el DRNA ha establecido para las franquicias nuevas el requisito de proveer un flujo ambiental mínimo igual o superior al Q_{99} .

El Apéndice 2, Rendimiento seguro para las tomas de ríos y embalses de abastecimiento municipal en Puerto Rico, incluye estimados de rendimiento seguro para cada una de las tomas activas de la AAA que se muestran en la Ilustración 3.27. Existen tomas de agua en casi todos los ríos de la Isla. El potencial de ampliar el volumen de extracción en ríos es muy poco y si se toma en consideración las necesidades ambientales, los ríos del País podrían clasificarse como “sobreexplotados”. El informe en el Apéndice 2 no incorpora los flujos mínimos históricos establecidos durante la sequía del 2015 para muchos de los ríos del segmento este de la Isla. La actualización de este informe es necesaria y urgente, no obstante es necesario esperar que el USGS revise y apruebe los caudales registrados que establecen nuevos flujos mínimos para los ríos del este.

3.6.4 Rendimiento seguro de embalses

La construcción de embalses permite almacenar parte del flujo de los caudales altos para ser utilizados en periodos más secos. De esta manera, la disponibilidad del recurso es mayor de la que podría ser obtenida mediante una toma superficial sin almacenaje. El comportamiento de un embalse se puede simular por medio de un balance de masa, expresado en su forma más sencilla por la ecuación:

$$\text{Volumen 2} = \text{Volumen 1} - \text{Extracción 1} - \text{Agua Vertida 1} + \text{Afluencia 1} + (\text{Lluvia} - \text{Evaporación})$$

Esta ecuación lo que significa es que el volumen de agua dentro de un embalse el día #2 (Volumen 2) se puede calcular a base del volumen que había en el embalse en el día anterior (Volumen 1), menos la extracción realizada, menos el volumen de agua que se vierte o se desborda por la represa, más el agua que llega al embalse de su cuenca tributaria (Afluencia 1) más la diferencia entre la lluvia que cae sobre el embalse y la evaporación desde su superficie. En Puerto Rico el balance neto entre lluvia y evaporación sobre la superficie del embalse es poco significativo y generalmente no se calcula.

El rendimiento seguro de los embalses utilizados para abasto público se ha definido como la razón de extracción que puede sostenerse durante un evento histórico de sequía extrema,

sin que sea necesario racionar el agua por más de un por ciento (1%) de los días y se mantiene la extracción en el rango de 70% a 75% de lo normal en los días de racionamiento.

El Apéndice 2 presenta estimados de rendimiento seguro para los embalses del País según su volumen de almacenaje al 2008. La mayoría de los embalses, al presente, no mantienen un caudal ambiental aguas abajo. El análisis se hizo a base de que el racionamiento se iniciara una vez el volumen de agua restante en el embalse sea el 25 por ciento de su volumen total y el racionamiento se realizara mediante una reducción de 25 por ciento en su tasa de extracción. Bajo esta regla y los rendimientos informados, los embalses nunca se secan aún con las sequías severas registradas en Puerto Rico hasta la fecha. Como se indicó en la sección anterior existe la necesidad de revisar los rendimientos seguros de los embalses en el segmento este de la isla tomando los datos de flujo y niveles del 2015.

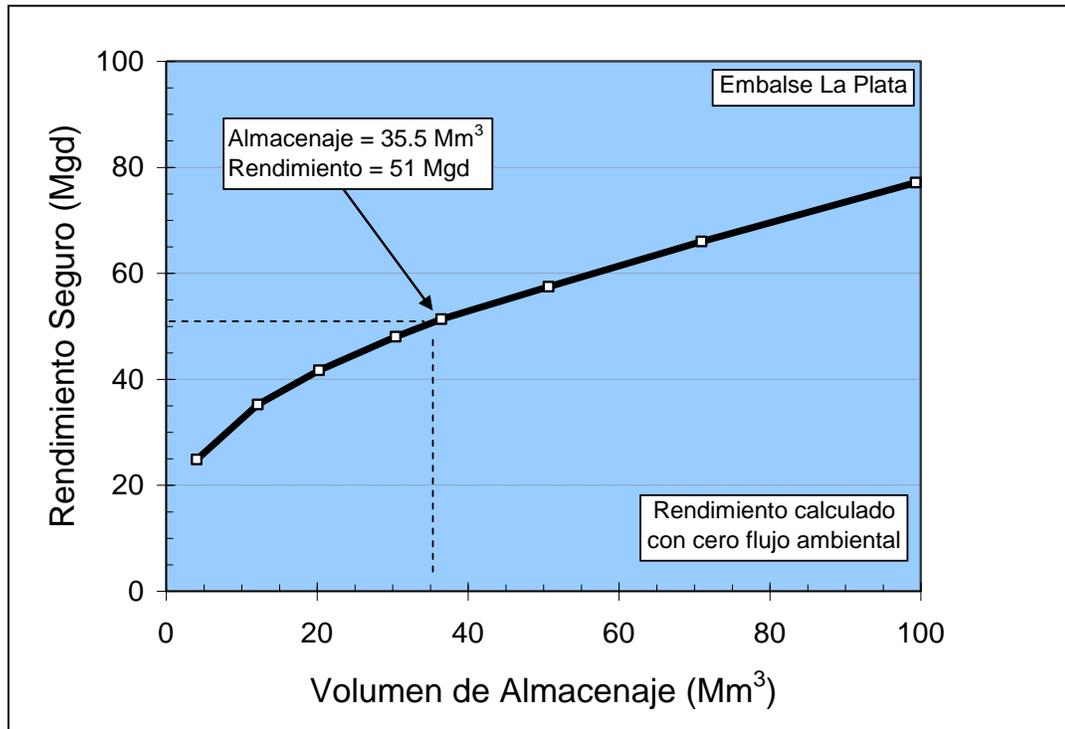
Los embalses son las estructuras más importantes en el sistema de suministro de agua en Puerto Rico. Sin embargo, debido a varios factores la construcción de embalses nuevos es prácticamente imposible. El estudio de sitios con potencial para la construcción de embalses en Puerto Rico, preparado para AFI (Morris, 2005), reveló las siguientes limitaciones:

- Tienen costos económicos altos.
- Los embalses convencionales no se consideran sostenibles.
- El desparrame urbano ocupó los sitios más aptos para la construcción de los embalses.
- Tienen impactos ambientales, incluyendo el consumo de grandes áreas de terrenos (más de 1,000 cuerdas en algunos de los embalses potenciales de mayor capacidad) y la interrupción de vías migratorias acuáticas.

Por lo antes expuesto, no se recomienda la construcción de embalses nuevos en la Isla si no realizar un buen mantenimiento a los ya existentes para de esta manera extender su vida útil.

El volumen de almacenaje de un embalse es un elemento crítico en la determinación del rendimiento seguro del mismo. La Gráfica 3.12 presenta la relación entre volumen de almacenaje y rendimiento seguro para el embalse La Plata. Esta relación se desarrolla para cada embalse y se utiliza para ayudar a escoger el volumen de embalses nuevos en la etapa de diseño. Además, se utiliza para cuantificar el impacto de la sedimentación en embalses

existentes y propuestos ya que su rendimiento disminuye en la medida en que se pierde capacidad de almacenaje como consecuencia del proceso de sedimentación.



Gráfica 3.12 Relación entre volumen y rendimiento seguro para el Embalse La Plata en Toa Alta.

3.6.5 Rendimiento seguro de los principales acuíferos

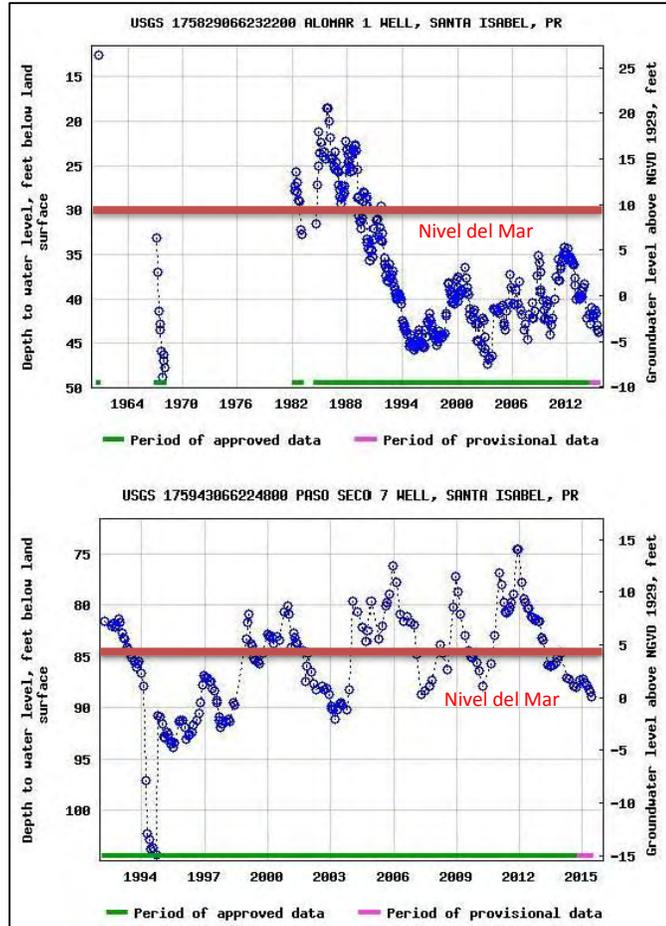
El rendimiento seguro de un acuífero se define como la cantidad de agua que puede ser extraída sin que se produzca un deterioro a largo plazo en la calidad y caudal del mismo. Su valor está determinado por las características físicas particulares de las formaciones geológicas que lo componen y las fuentes de recarga que lo alimentan. En los acuíferos costeros el caudal disponible está muy relacionado a la configuración y operación del sistema de extracción del agua. La explotación sostenible del agua subterránea siempre requiere una razón de bombeo inferior a la totalidad de la recarga, pero en los acuíferos costeros, los cuales contienen agua salobre además del agua dulce, la tasa de extracción sostenible es menos que la recarga porque siempre tiene que mantener flujo hacia el mar para frenar el proceso de la intrusión salina. Las variaciones en los niveles de agua en un pozo de observación en Santa Isabel, una zona afectada por bombeo intensivo e intrusión salina, se presentan en la Gráfica 3.13. El proceso de la intrusión salina se discute en mayor detalle en el Capítulo 5.

En Puerto Rico, los acuíferos más grandes y productivos se ubican en la costa sur y la costa norte. En estos acuíferos costeros el agua subterránea interactúa de forma dinámica con el agua salina, que también reside dentro de la formación, de manera que el agua dulce “flota” encima del agua salina. La posición de la interfase entre el agua salina y el agua dulce depende de factores como la permeabilidad de la formación geológica y el flujo del agua dulce. Cualquier bombeo de agua dulce reduce el flujo descargado hacia el mar, favoreciendo el flujo de agua de mar hacia el acuífero. La migración tierra adentro de la interfase entre agua dulce y salina es una consecuencia natural del bombeo de pozos costeros, pero un exceso de bombeo puede ocasionar un exceso de la intrusión salina, dañando así partes del acuífero. El impacto de la intrusión salina puede minimizarse manteniendo una razón de bombeo significativamente inferior a la recarga promedio y optimizando la localización de los pozos.

3.7 Enfoque para mejorar la disponibilidad del recurso

Existen alternativas para aumentar la disponibilidad del recurso agua en Puerto Rico, pero para aprovechar una fuente de abasto es necesario construir obras e instalaciones de extracción, almacenaje, tratamiento y distribución. El desarrollo de las mismas implica costos económicos sustanciales, y la escasez de recursos económicos impone límites severos a las opciones viables para el desarrollo de abastos de agua. Además, plantea la posibilidad de que diversos usuarios tengan que competir por la asignación de un mismo recurso.

En Puerto Rico, las opciones de abasto de menor costo (pozos y tomas de ríos) están altamente desarrolladas. Varios de los embalses que son fuentes importantes de suministro de agua dulce están confrontando problemas de sedimentación, y la contaminación de los acuíferos ha tenido un impacto sustancial en el suministro del recurso de esa fuente. Es decir, no sólo es más costoso el desarrollo de fuentes nuevas de abasto de agua, sino que simultáneamente se están perdiendo progresivamente las fuentes de abastos ya desarrolladas. Además, los datos de la AAA revelan que, en el año 2015 se perdió el 55 por ciento del agua producida. Aunque este valor ahora está siendo reducido, aún falta mucho trabajo para lograr niveles de pérdidas aceptables.



Gráfica 3.13 Comportamiento de dos pozos de rastreo en la Costa Sur, señalando la variabilidad en el nivel del agua debido a eventos de recarga y bombeo. Fuente: USGS.

Ante esta situación se hace imprescindible que el manejo del agua del País concentre esfuerzos en acciones dirigidas a mejorar la eficiencia en su uso y asegurar la integridad de los sistemas que sostienen la disponibilidad actual del recurso de las fuentes de abasto ya desarrolladas. En esta dirección deben tener prioridad proyectos tales como la implantación de un programa que atienda efectivamente el problema del agua no contabilizada, la conservación del agua, el manejo de los sedimentos en los embalses y la protección y optimización de la utilización de los acuíferos para maximizar su rendimiento sostenible. Estas acciones son discutidas en el Capítulo 6.

El cuadro actual imposibilita el seguir expandiendo la utilización del recurso mediante la alternativa tradicional de desarrollar fuentes de abasto nuevas. El costo financiero de las estrategias nuevas que se proponen en este Plan es menor que el costo ascendente dirigido a desarrollar abastos nuevos con las alternativas utilizadas tradicionalmente.

3.7.1 Huella hídrica - indicador de uso

Uno de los retos que enfrentan los gobiernos este siglo es dotar a la población de una dieta balanceada y saludable de forma equitativa (eradicando el hambre y la obesidad) y sustentable. (Vanham, Mekonnen & Hoekstra, 2013). Estos autores sugieren que se fomente una dieta más vegetariana debido al impacto ambiental que tiene la producción de carne sobre los ecosistemas en el planeta. Para esto, destacan que es ineludible tener disponibles dos recursos: suelo y agua y resaltan que los conceptos de Agua Virtual y de Huella Hídrica son herramientas excelentes para establecer la relación entre el consumo de bienes de todo tipo y el uso de agua.²² Galli et al., 2012 y Hoekstra and Chapagain, 2008, concurren en que ambos conceptos se introducen a la administración del recurso agua para demostrar la importancia de los patrones de consumo y la dimensión global que conlleva el sabio manejo del recurso agua, una máxima que persigue la Ley de Aguas.

El uso de agua cotidiano en el hogar: saciar la sed, cocinar, aseo personal y lavar ropa, nos son comunes; al igual que regar las plantas o lavar el auto, cuando es necesario. No nos percatamos de que al adquirir alimentos y ropa, virtualmente consumimos agua ya que estos productos en su elaboración emplearon agua y la materia prima de éstos a su vez también utilizó agua. La huella hídrica o huella del agua, es un indicador de uso de agua que tiene en cuenta tanto el uso directo como indirecto por parte de un consumidor o productor. La huella hídrica de un individuo, comunidad o comercio se define como el volumen total de agua dulce que se utiliza para producir los bienes y servicios consumidos por el individuo o comunidad así como los producidos por los comercios.

En el 2009 la ISO designa a un grupo de expertos redactar una Norma Internacional para el uso de la Huella Hídrica como indicador del buen uso del agua. En agosto de 2014 se promulga la ISO 14046:2014 - Gestión Ambiental - Huella Hídrica - Principios, requisitos y directrices, la cual puede ser aplicada a los productos, procesos, organizaciones y gobiernos. Esta nueva norma se fundamenta en una evaluación del ciclo de vida. Además de identificar el potencial de los impactos ambientales relacionados al agua, incorpora las dimensiones geográfica y temporal e identifica la cantidad de uso del agua y los cambios en la calidad del

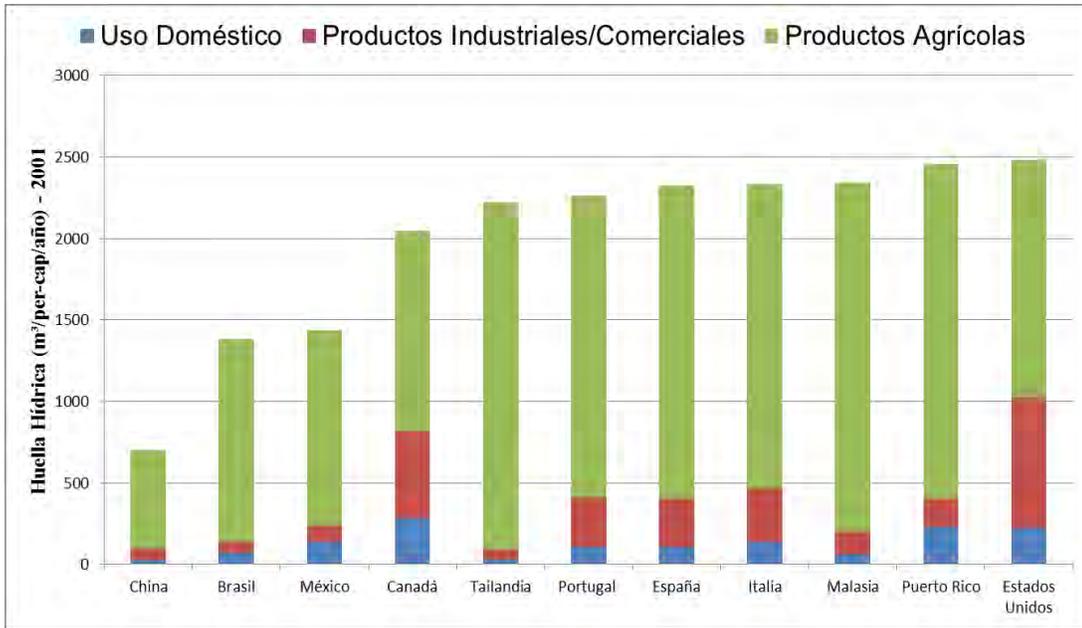
²² UNESCO, 2014

agua. La nueva norma se convierte en el referente internacional para empresas, procesos y producto respecto al buen uso del agua.

El “*Water Footprint Network*” es una organización sin fines de lucro establecida en Holanda, cuyo objetivo es la promoción del uso sostenible, equitativo y eficiente del recurso agua a nivel mundial. Sus esfuerzos iniciales estuvieron destinados a contabilizar las huellas hídricas de los países con mayores importaciones y exportaciones para establecer los promedios globales. El análisis más completo se realizó en el año 2001, y en el mismo se promedió un valor de huella hídrica global de 1,243 m³/per cápita/año.

Mediante la metodología delineada en “*The Water Footprint Assessment Manual; Setting the Global Standard 2011*” (Hoekstra et al., 2011), se contabilizó la huella hídrica puertorriqueña per cápita para el año 2001, siendo estimada en 2,459 m³/per cápita/año. En la Gráfica 3.14 se presenta la diferencia en uso del recurso agua entre algunos de los países que exportan a Puerto Rico, expresado a través de la huella hídrica. El estudio más reciente y detallado sobre este tema en Puerto Rico (Ojeda Matos, 2012) tuvo como propósito establecer estrategias para la gestión integrada y sostenible del recurso agua. Se empleó la huella hídrica como indicador novel para medir la sostenibilidad partiendo de la premisa de que la cuenca hidrográfica es la delimitación natural donde se deben tomar las decisiones de asignación de los recursos hídricos.

Como parte de esta investigación, se contabilizó la huella hídrica puertorriqueña per cápita para el año 2009, siendo 2,696 m³/per cápita/año, y se concluyó que ha ido en aumento en comparación con la calculada en el 2001. Durante la fase de evaluación de sostenibilidad se analizó la huella hídrica per cápita agregada en la cuenca de hidrográfica del río Cagüitas en Aguas Buenas-Caguas. Al comparar el balance hidrológico aproximado entre la lluvia anual captada en la cuenca hidrográfica y la huella hídrica per cápita agregada de los residentes, se determinó que la oferta de agua no era suficiente para sostener las actividades de la población.



Gráfica 3.14 Huella hídrica per cápita por componentes y por países (Chapagain y Hoekstra, 2004).

Este estudio concluye que se puede considerar la huella hídrica como indicador del uso de agua en las cuencas hidrográficas de Puerto Rico. Los resultados de huella hídrica pueden facilitar cómo definir los escenarios de producción y establecer la distribución adecuada y sostenible del recurso. Internalizar la producción no necesariamente implica reducirla, ya que la producción local puede requerir igual o mayor cantidad de agua.

Ojeda Matos concluye que si se desea ser un país con mayor producción y exportación, es necesario considerar qué bienes y servicios contienen mayores huellas hídricas, lo que equivaldría a mayor exportación de agua virtual. El costo asociado a la utilización del recurso agua para un fin determinado debe rendir beneficios que equiparen el costo total asociado a su huella hídrica.

La metodología adoptada por ISO, es ahora el referente a utilizar para medir la Huella Hídrica de un país. Esta reciente metodología no se ha probado en Puerto Rico. El estudio realizado por Ojeda Matos demuestra que es posible adoptar el concepto de Huella Hídrica a Puerto Rico. Partiendo del debate a nivel global que hay al presente sobre el buen uso del recurso natural que es el agua y la gobernalidad de este bien económico, es recomendable desarrollar el ejercicio de evaluar la Huella Hídrica de Puerto Rico, dato que las próximas generaciones deben tener disponible.

Referencias

Ackerman, J.D. (1995) An orchid flora of Puerto Rico and the Virgin islands, Memorials. *New York Botanical Garden*, (73): 1-208.

Agencia Estatal para el Manejo de Emergencias y Administración de Desastres (AEMEAD). (s.f.). Huracanes y Tormentas Tropicales que han afectado a Puerto Rico. P, 23. Obtenida el 01 de junio del 2014 (On-line) http://www.gobierno.pr/NR/rdonlyres/49EA64D0-305B-4881-8B85-04B518004BD5/0/Ciclones_en_PR.pdf

Blanco, J. F., & Scatena, F. N. (2005). Floods, habitat hydraulics and upstream migration of *Neritina virginea* (Gastropoda: Neritidae) in Northeastern Puerto Rico. *Caribbean Journal of Science*, 41(1), 55-74.

Campbell, M. D., & Lehr, J.H. (1973). *Water Well Technology. Field Principles of Exploration Drilling for Ground-Water and Selected Minerals*. New York: McGraw-Hill.

Colón, José A. (2009). *Climatología de Puerto Rico*. Universidad de Puerto Rico. Primera edición, p 205. San Juan, Puerto Rico.

Cooney, P. B. , Kwak, T. J. (2013) Spatial Extent and Dynamics of Dam Impacts on Tropical Island Freshwater Fish Assemblages. *BioScience*, (63):176-190.

Covich, A. P., Crowl, T. A., & Heartsill-Scalley, T. (2006). Effects of drought and hurricane disturbances on headwater distributions of palaemonid river shrimp (*Macrobrachium* spp.) in the Luquillo Mountains, Puerto Rico. *Journal of the North American Benthological Society*, 25(1), 99-107

Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. (2004). *Plan Integral de Recursos de Agua de Puerto Rico* (BORRADOR).

Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. (2008). *Memorias de la Primera Conferencia de Flujos Ambientales*, San Juan, PR: Oficina del Plan de Aguas.

Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. (2009). *Guía para el Manejo de Ríos, División Monitoreo del Plan de Aguas*. Preparado por: Morris G. L., Portalatín J., De Jesús, R., Ramos, M., Toledo, T.

Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. (2009). *Mean Annual Rainfall Mapa for Puerto Rico*. San Juan, Puerto Rico.

Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. (2013). Orden Administrativa Núm. 2013-12. Para establecer el tipo de estudio hidrológico e hidráulico que será evaluado por el

Departamento de Recursos Naturales y Ambientales; y derogar la Orden Administrativa 2009-06.

Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. (2016). *Plan de Manejo y Restauración de los Acuíferos del Sur*. San Juan, PR: División Monitoreo del Plan de Aguas.

Driscoll, F.G. (1986). *Groundwater and Wells*. Minnesota: Johnson Division.

Elosegi A., Diez J. (2009) *La vegetación terrestre asociada al río: el bosque de ribera. En: Conceptos y técnicas en ecología fluvial*. Edd. Elosegi, A. Sabater, S. (pp. 311- 321). Bilbao, España.

Esteban Moratilla, F., M. Molina Moreno y M Fernández Barrena. 2010. La Huella Hídrica en España. *Revista de Obras Públicas*, Nº 3.514. Año 157

Galli, A., Wiedmann, T., Ercin, E., Knoblauch, D., Ewing, B., Giljum, S., 2012. Integrating ecological, carbon and water footprint into a “footprint family” of indicators: definition and role in tracking human pressure on the planet. *Ecol. Ind.* 16, 100–112.

Global Water Partnership (2013). *Tecnologías para el Uso Sostenible del Agua: Una contribución a la seguridad alimentaria y la adaptación al cambio climático. Asociación Mundial para el Agua, capítulo Centroamérica*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Tegucigalpa, Honduras, 68 p.

Heartsill, T., Crowl, T. A., Thompson J. (2009) Tree species distributions in relation to stream distance in a mid-montane wet forest, Puerto Rico. *Caribbean Journal of Science*, (45): 52-63.

Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K. (2008) *Globalization of Water – Sharing the Planet’s Freshwater Resources*. Blackwell Publishers, Malden, Oxford, Carlton.

Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M. and Mekonnen, M.M. (2011) *The Water Footprint Assessment Manual; Setting the Global Standard*. Earthscan: London, UK.

Junta de Planificación. (2006). *Mapa de Riesgo a Inundaciones. Administración de Valles Inundables de Puerto Rico*. Obtenida el 16 de marzo de 2016 (On-line) <http://www.jp.gobierno.pr/avi/areasderiesgo/mapasderiesgoainundacion/tabid/76/default.aspxdefault.aspx>

Junta de Planificación (2010). *Reglamento sobre Áreas Especiales de Riesgo a Inundación (Reglamento de Planificación Núm. 13). Séptima Revisión*. Gobierno de Puerto Rico. P, 90.

Kikkert, D. A., Crowl, T. A., & Covich, A. P. (2009). Upstream migration of amphidromous shrimps in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico: temporal patterns and environmental cues. *Journal of the North American Benthological Society*, 28(1), 233-246.

King, J., Tharme, R. and Brown, C. (1999). *Contributing Paper: Definition and implementation of Instream flows*. Thematic Report World Commission on Dams.

Kuniansky, E.L., Gómez-Gómez, Fernando, and Torres-González, Sigfredo., (2004) Effects of aquifer development and changes in irrigation practices on ground-water availability in the Santa Isabel area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 03-4303, 56 p.

Kwak, T. J., Cooney, P. B., & Brown, C. H. (2007). *Fishery population and habitat assessment in Puerto Rico streams: phase 1 final report*. Federal Aid in Sport Fish Restoration Project F-50 Final Report. Marine Resources Division, Puerto Rico Department of Natural and Environmental Resources, San Juan.

Lugo, Ariel y Andrés García Martinó. (1996) *Cartilla del Agua para Puerto Rico*. Instituto de Dasonomía Tropical, Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, San Juan, Puerto Rico.

Lugo, S. Bryan B. Reyes L., Lugo A. E. (2001) Riparian vegetation of a subtropical urban river. *Acta Científica*, (15): 59- 72.

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) (2008). *Metodología para la estimación del caudal ambiental en proyectos licenciados*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Facultad de Ingeniería, 135 p.

Molina-Rivera, W.L. (2010). *Estimated water use in Puerto Rico*. U.S. Geological Survey Open-File Report, __ p.

Monroe, W.H. (1980). *Geology of the Middle Tertiary formations of Puerto Rico*. U.S. Geological Survey Professional Paper 953. Washington, D.C., 93 p.

Moore, M. (2004). *Perceptions and interpretations of " environmental flows" and implications for future water resource management: A survey study*. 3 p.

Morris, Gregory. (2005). *Analysis of Potential Reservoirs in Puerto Rico*. Puerto Rico Infraestructure Financing Authority.

Morris, Gregory L. & Malí Vázquez. (1990). *The Geographic Distribution of Drought on Two Caribbean Islands: Puerto Rico and St. Kitts*. Proceedings of 1990 Intl. Symposium on Tropical Hydrology at San Juan, PR. American Water Resources Assn., Bethesda.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2010). *The Local Impacts of ENSO across the Northeastern Caribbean*. National Weather Service San Juan, PR Weather Forecast Office. Obtenida el 01 de junio del 2014 (On-line) <http://www.srh.noaa.gov/sju/?n=enso2010>

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2012). *Frequently Asked Questions About El Niño and La Niña*. Obtenida el 01 de junio del 2014 (On-line) http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensofaq.shtml

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2014). *¿Qué es una onda tropical?*. Hurricane Research Division. Obtenida el 01 de junio del 2014 (On-line) http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/A4_esp.html

Nieves, L.O. (1998). *Ecological study of the freshwater stream fishes of the upper Mameyes River (Bisley) in the Luquillo Mountains of Puerto Rico*. Ph.D. dissertation, George Mason University, Fairfax, Virginia

Ojeda Matos, G. (2012) *Estrategias para la gestión integrada y sostenible del recurso agua Evaluación de la huella hídrica como indicador de la sostenibilidad en la cuenca hidrográfica del Río Cagüitas, Aguas Buenas – Caguas, Puerto Rico*. Escuela Graduada de Planificación, Universidad de Puerto Rico, Recinto de Río Piedras: UMI Dissertation Publishing by ProQuest.

Ortiz-Carrasquillo, W. (1981). *Notas sobre los crustáceos y peces del Río Matrullas*. Science-Ciencia, 8 (1): 9-13.

Palmer, Wayne C. (1965). *Research Paper No. 45: Meteorological Drought*. U.S. Weather Bureau, Washington, D.C.

Parra, E. A. (2012). *Modelamiento y manejo de las interacciones entre la hidrología, la ecología y la economía en una cuenca hidrográfica para la estimación de caudales ambientales*. Proyecto de grado (Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos). Universidad Nacional de Colombia, Medellín. Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, 127 p.

Pérez-Reyes, O., Crowl, T. A., & Covich, A. P. (2015). Comparison of decapod communities across an urban-forest land use gradient in Puerto Rican streams. *Urban Ecosystems*, 1-23.

Rivera, J. (1979). *Estudio de las poblaciones piscícolas en los lagos Loíza y Guajataca*. Tercer Simposio del Departamento de Recursos Naturales. Páginas 1-10.

Rodríguez Gallego – Lorena, C., Chreties, M., Crisci., M., Fernández, N., Colombo, B., Lanzilotta, M., Saravia, C., Neme, V., Sabaj, D., & Conde (2011). *Fortalecimiento del concepto de Caudales Ambientales como Herramienta para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos*. Vida Silvestre Uruguay y PNUMA, Uruguay, pp. 138

Rodríguez, J.M., Gómez-Gómez, F. (2008). *Potentiometric surface of the upper and lower aquifers of the North Coast Limestone aquifer system and hydrologic conditions in the Arecibo-Manatí area, Puerto Rico*, November 27-December 1, 2006: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3030, 2 sheet.

Rodríguez, J. M. and Gómez-Gómez, F. (2008). Historical ground-water development in the Salinas alluvial fan area, Salinas, Puerto Rico SCIENTIFIC INVESTIGATION MAP 2008-3032, 1900-2005

Tabacchi, E; Correl D. L.; Pinay, G; Wissmar, R. C. (1998) Development, maintenance and role for riparian vegetation in the river landscape. *Freshwater Biology*, 40: 497-516.

Tremblay, R.L. (1997) Distribution and dispersion patterns of individuals in nine species of Lepanthes (Orchidaceae). *Biotropica*, (29): 38-45.

UNESCO (2005). *Taller de caudales ambientales: experiencias y desafíos regionales*. San José. Costa Rica.

UNESCO (2014). Qué son los Caudales Ambientales y cuál es la perspectiva de su aplicación en Uruguay. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N° 34

Universidad Austral de Chile. (s.f.). Tipología de los Usos del Agua. Obtenida el 01 de junio del 2014 (On-line) http://www.uach.cl/proforma/insitu/2_insitu.pdf

U.S. Census Bureau. (2014) Estimados de población para los municipios de Puerto Rico para el 2014 del American Community Survey. Obtenido del American Fact Finder y generado por Alberto L. Velázquez Estrada del Instituto de Estadísticas de Puerto Rico. <http://factfinder2.census.gov>. (1 de julio de 2015)

U.S. Fish & Wildlife Service. (2010). *Borrador del Plan abarcador de Conservación y Evaluación Ambiental: Refugio Nacional de Vida Silvestre de Laguna Cartagena*. Atlanta: Georgia.

U.S. Fish & Wildlife Service. (s.f.). *Laguna Cartagena. Refugio Nacional de Vida Silvestre*. Obtenida el 21 de enero de 2016 (on-line) <http://www.fws.gov/caribbean/refuges/Lagunacartegena/default.htm>

Vanham, D., M.M. Mekonnen, A.Y. Hoekstra (2013) The water footprint of the EU for different diets. ELSEVIER, Ltd. Ecological Indicators, Vol. 32, 1-8p.



PLAN INTEGRAL DE RECURSOS DE AGUA

CAPÍTULO 4

Evaluación Regional de la Disponibilidad de los Recursos de Agua
en Puerto Rico.

RESUMEN

En este capítulo se realiza un análisis de la demanda y oferta de agua para diversos usos en Puerto Rico. Se presentan también los estimados de las proyecciones de demanda y oferta de agua en Puerto Rico, desde el presente y hasta el 2030, teniendo en cuenta factores como la reducción poblacional y la crisis económica.

TABLA DE CONTENIDO

4.1 INTRODUCCIÓN.....	1
4.1.1 EL RETO DEMOGRÁFICO	2
4.1.2 PERSPECTIVAS ECONÓMICAS DE PUERTO RICO.....	3
4.1.3 AUMENTOS EN TARIFAS DEL AGUA	5
4.2. LOS USUARIOS DEL RECURSO.....	5
4.2.1. MERCADO DEL AGUA DOMÉSTICA ADMINISTRADO POR LA AAA.....	5
4.2.2. SISTEMAS DOMÉSTICOS COMUNITARIOS (NON-PRASA)	6
4.2.3. SISTEMAS DE RIEGO ADMINISTRADOS POR LA AEE	7
4.2.4 AUTOABASTECIMIENTO	8
4.3. PROYECCIONES DE DEMANDA DE AGUA Y REQUERIMIENTOS DE PRODUCCIÓN.....	9
4.3.1 DEMANDA DE AGUA DEL SECTOR RESIDENCIAL SERVIDO POR LA AAA	9
4.3.2 DEMANDA DE AGUA DEL SECTOR NO RESIDENCIAL SERVIDO POR LA AAA.....	12
4.3.3 PROYECCIÓN DE DEMANDA DE AGUA PARA LA TOTALIDAD DEL SECTOR SERVIDO POR LA AAA	14
4.3.4. REQUERIMIENTOS DE PRODUCCIÓN SECTOR SERVIDO POR LA AAA.....	14
4.3.5. REQUERIMIENTOS DE PRODUCCIÓN NON-PRASA, AUTO ABASTO RESIDENCIAL, INDUSTRIAL Y TERMOELÉCTRICAS	18
4.3.6. REQUERIMIENTOS DE PRODUCCIÓN SECTOR AGRÍCOLA	19
4.3.6.1. <i>Operaciones Agronómicas</i>	20
4.3.6.2. <i>Operaciones Agropecuarias</i>	21
4.3.7. REQUERIMIENTOS DE PRODUCCIÓN USOS EXTRACTIVOS	21
4.3.8. REQUERIMIENTOS RECREATIVOS, ESTÉTICOS Y AMBIENTALES.....	23
4.4. BALANCES DE DISPONIBILIDAD REGIONAL.....	23
4.4.1 REGIONES DE PLANIFICACIÓN	24
4.4.2 DISTRIBUCIÓN REGIONAL DE LOS REQUERIMIENTOS DE PRODUCCIÓN	25
<i>Producción máxima vs. Producción promedio</i>	31
4.5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	32
4.5.1 MANEJO INEFICIENTE DEL RECURSO.....	33
4.5.2 DEFICIENCIAS EN LA DISPONIBILIDAD DEL RECURSO.....	34
4.5.2.1 <i>Regiones Metropolitana, Norte, Noreste, Oriental y La Sierra</i>	34
4.5.2.2 <i>Región Centro Oriental</i>	39
4.5.2.3 <i>Regiones Oeste y Cordillera Central</i>	41
4.5.2.4 <i>Regiones Sur y Sureste</i>	42
4.5.3 LIMITACIONES PARA APROVECHAR EL POTENCIAL AGRÍCOLA.....	43
4.5.3.1 <i>Región Noroeste</i>	44
4.5.3.2 <i>Región Suroeste</i>	45
4.5.3.3 <i>Región Sur</i>	47
4.5.3.4 <i>Región Sureste</i>	48
4.5.4 CONFLICTOS CON EL AMBIENTE.....	50
4.5.4.1 <i>Plantas operando en exceso del rendimiento seguro</i>	50
4.5.4.2 <i>Sobre explotación de los Acuíferos del Sur</i>	50
4.5.5 IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE DISPONIBILIDAD DE AGUA POTABLE	51
4.5.5.1 <i>Retos para la planificación y administración del recurso agua</i>	52
REFERENCIAS	56

4.1 Introducción

En este capítulo se actualizan los estimados y proyecciones de demanda de agua y requerimientos de producción para cada uno de los sectores socioeconómicos y segmentos que configuran el mercado del agua en Puerto Rico. En el mismo se resumen la metodología y resultados de un análisis más exhaustivo el que se detalla en un documento incluido como referencia al Plan de Aguas, ver Apéndice 3. Estos datos serán contrastados con la capacidad de los sistemas de producción y la disponibilidad del recurso en las diversas regiones del País. Como resultado de estos balances de agua, podremos identificar situaciones de deficiencias de abasto o conflictos de uso que requieren de intervenciones infraestructurales o del establecimiento de políticas públicas.

Las proyecciones de demanda de agua y de requerimientos de producción que se presentan en este documento utilizan como insumo los trabajos realizados por la compañía CDM en el documento *“Update of Puerto Rico Water Demand Forecast”*, los esfuerzos desarrollados por la AAA en los años 1993, 2011 y 2014 y los correspondientes a las versiones anteriores del Plan Integral de Recursos de Agua del DRNA en los años 1984 y 2008.

Además, se incorporan al análisis las proyecciones de población revisadas por la Junta de Planificación y datos relacionados con varios esfuerzos que en la actualidad realiza el Gobierno del Estado Libre Asociado de Puerto Rico entre los que se encuentran:

1. El Plan de Uso de Terrenos de la Junta de Planificación de Puerto Rico
2. El Plan de Recuperación Económica de Cuatro Años
3. El Plan de Seguridad Alimentaria del Departamento de Agricultura¹
4. Plan Estratégico 2014 – 2018 de la AAA

Las proyecciones realizadas previas al año 2014 establecían incrementos significativos en la demanda de agua de todos los sectores y usuarios. Sin embargo, varios factores sugieren que la demanda de agua futura en Puerto Rico no será tan alta como es proyectada en dichos documentos. Los factores principales se discuten a continuación.

¹ Este Plan de Seguridad Alimentaria no precisa la demanda de agua para la actividad agrícola presente ni futura. Si hace un reconocimiento de la necesidad de que esto se haga.

4.1.1 El Reto Demográfico

Por primera vez en su historia, Puerto Rico experimenta una pérdida poblacional absoluta. El censo de población del año 2010 registra una disminución de 2.2% en el nivel poblacional, respecto al computado en el censo del año 2000. Por su parte, la Junta de Planificación proyecta que esta tendencia decreciente de la variable poblacional se mantendrá hasta por lo menos el año 2030². La merma poblacional estimada del año 2000 al 2013 es de 150,442 personas, lo que representa un descenso de alrededor de 4% de la población residente de la Isla. Según presentado en la Tabla 4.1 y la Gráfica 4.1, las reducciones en población proyectadas para los años 2020 y 2030 representan mermas decenales de 11.4% y 6.1% respectivamente.

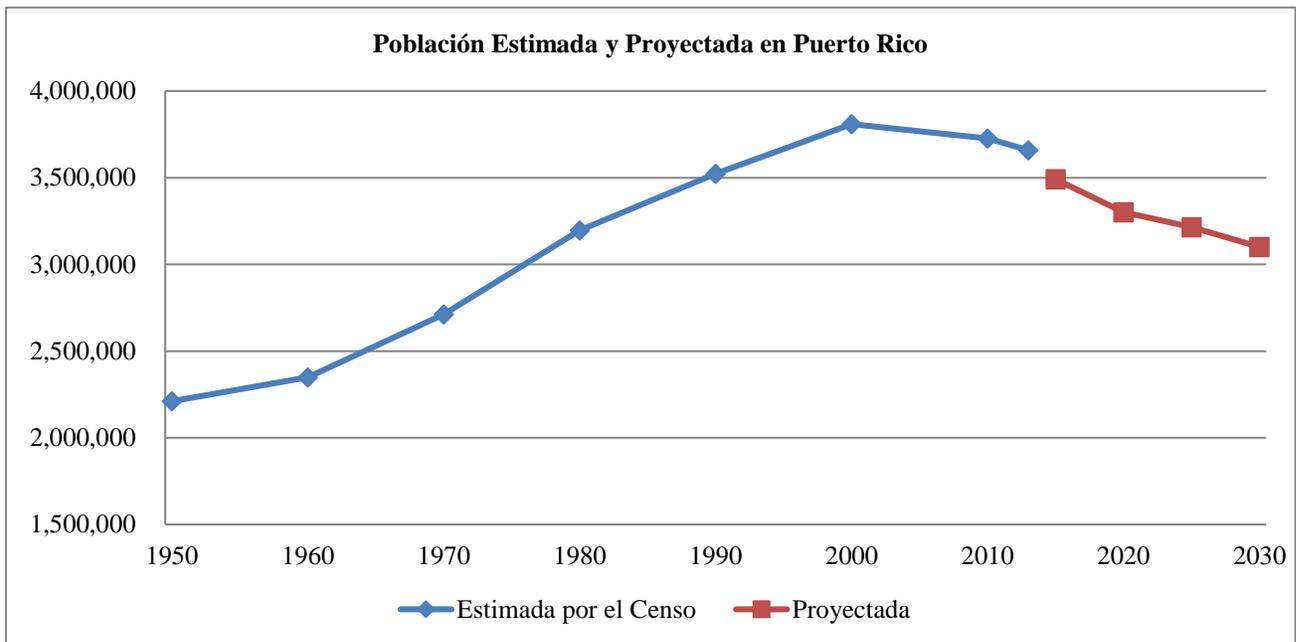
Población Estimada y Proyectada en Puerto Rico

Año	Número de Personas	% de Cambio
1950	2,210,703	18.30%
1960	2,349,544	6.30%
1970	2,712,033	15.40%
1980	3,196,520	17.90%
1990	3,522,037	10.20%
2000	3,808,610	8.10%
2010	3,725,789	-2.20%
2013	3,658,168	-1.80%
2015	3,491,337	-4.60%
2020	3,301,338	-5.40%
2025	3,215,242	-2.60%
2030	3,100,670	-3.60%

Fuente: Negociado del Censo federal, División de Población, Junta de Planificación, Oficina del Censo y DRNA, Oficina del Plan de Agua.

La literatura sobre la planificación de los recursos de agua en Puerto Rico invariablemente ha planteado un crecimiento continuo de la demanda de agua y ha proyectado incrementos sustanciales en la misma. Sin embargo, los pronósticos de reducción en el nivel poblacional y la experiencia reciente de disminución en el consumo, contradicen estos planteamientos, lo que impone la necesidad de realizar cambios en la estrategia respecto a la planificación del recurso.

² La Junta de Planificación suministró proyecciones de población para el periodo 2013 al 2020, los que fueron proyectados por el DRNA hasta el 2030 a base de las tendencias históricas de natalidad, mortalidad y migración.



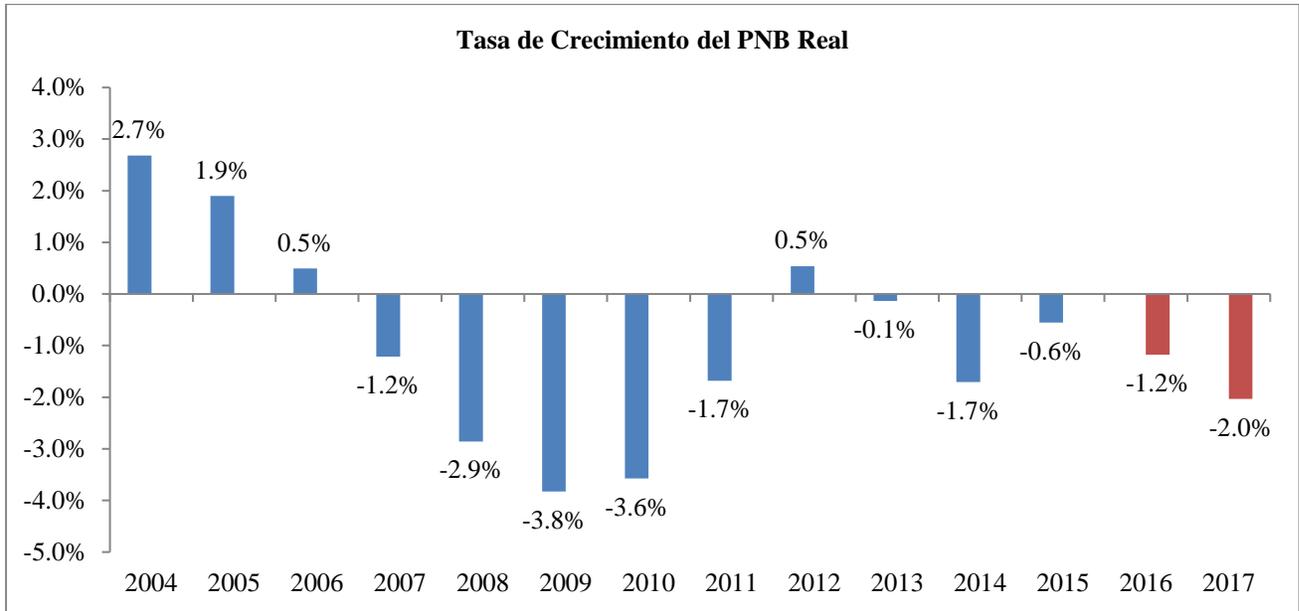
Gráfica 4.1 Población Estimada y Proyectada en Puerto Rico

Fuente: Negociado del Censo federal, División de Población, Junta de Planificación, Oficina del Censo y DRNA, Oficina del Plan de Agua.

4.1.2 Perspectivas Económicas de Puerto Rico

El nivel de actividad económica es otro de los componentes fundamentales en la planificación de los recursos de agua de un País. La demanda de agua de los sectores no residenciales tales como la industria, el comercio, la agricultura y la actividad turística, entre otros, están directamente relacionados con el desempeño económico. La proyección de la demanda de agua de estos sectores requerirá que se evalúen las perspectivas de crecimiento de cada uno de ellos.

Como se puede observar en la Gráfica 4.2, a partir del año fiscal 2006, la economía de Puerto Rico experimenta una tendencia decreciente en su nivel de actividad económica. La recesión experimentada durante el periodo que comprende los años fiscales 2006 al 2011 es la más larga y profunda de su historia reciente. Durante el año fiscal 2012, el Producto Nacional Bruto (PNB) presenta un valor positivo, del orden de 0.5%, para luego manifestarse un nuevo periodo recesionario en el que el PNB real se ha contraído en -2.38%. Recientemente, la Junta de Planificación de Puerto Rico presentó sus pronósticos económicos para los años fiscales 2016 y 2017, donde proyecta que el PNB real reflejará disminuciones de -1.2% y -2.0 %, respectivamente.



Gráfica 4.2 Tasa de Crecimiento del PNB Real

Fuente: Junta de Planificación de Puerto Rico

Ante el cuadro descrito anteriormente, existe un alto grado de incertidumbre respecto a las posibilidades de un proceso sostenido de recuperación de la economía de Puerto Rico. En estas condiciones, no podemos augurar grandes crecimientos en la demanda de agua de los sectores que tradicionalmente han sostenido el peso del crecimiento económico del País.

No obstante, existen elementos puntuales del Plan de Recuperación Económica, elaborado por el Gobierno del Estado Libre Asociado de Puerto Rico, y proyectos en progreso que habrá que considerar al momento de realizar la tarea de proyectar la demanda de agua de los sectores no residenciales. Entre estos podemos mencionar los siguientes:

1. La política pública de implantar un plan de incremento en las operaciones agronómicas que maximice el uso de los terrenos declarados como reservas agrícolas.
2. Las propuestas de utilización de la infraestructura disponible en las antiguas bases navales Ramey y Roosevelt Roads, así como del Puerto de las Américas en Ponce.
3. Los desarrollos relacionados con la industria aeronáutica en el noroeste del País.
4. Los planes de desarrollar una nueva zona industrial en el municipio de Dorado.

5. Las construcciones aprobadas o en progreso de centros comerciales y hoteleros en el municipio de San Juan.

4.1.3 Aumentos en Tarifas del Agua

El incremento en las tarifas, que entró en vigor el 15 de julio del 2013, representó un incremento de 52.1% en la tarifa promedio del sector residencial, un aumento de 97.8% en la del sector comercial y de 90.5% en el sector industrial. Estudios previos, realizados por del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, estimaron la elasticidad precio de la demanda de agua en -0.22, -0.26 y -0.36 en los sectores residencial, comercial e industrial, respectivamente. Ante un aumento de 52.1% en el precio del servicio de agua y alcantarillado, es de esperar que ocurra una disminución de 10.4% en la demanda residencial. En otros sectores, la disminución proporcional esperada es significativamente mayor. No obstante, decidimos utilizar un enfoque conservador, donde se presume una disminución de tan solo 5% en la demanda de agua, para proveer por el hecho de que los valores de demanda de agua residencial per cápita, de la mayoría de los municipios del País, son relativamente bajos y el nivel de la sensibilidad de la asociación ocurre sobre un nivel de consumo básico, ya que el carácter de recurso indispensable para la actividad humana se manifiesta en una relativa inelasticidad hasta cierto nivel de consumo.

La situación descrita sugiere la necesidad de desarrollar enfoques en la planificación del recurso que estén acordes con la situación prevaleciente y esperada en lo referente al balance entre disponibilidad y demanda, así como a la situación financiera del Gobierno del Estado Libre Asociado de Puerto Rico. Ante la experiencia de disminución en consumo y las oportunidades que presentan los proyectos dirigidos a mejorar la eficiencia y controlar las pérdidas del sistema de distribución, entendemos que las decisiones de desarrollar capacidad de abasto adicional deben ser reevaluadas. Por otra parte, ante la precaria situación fiscal por la que atraviesa el País, no abona al interés público malgastar recursos en obras de infraestructura innecesarias.

4.2. Los Usuarios del Recurso

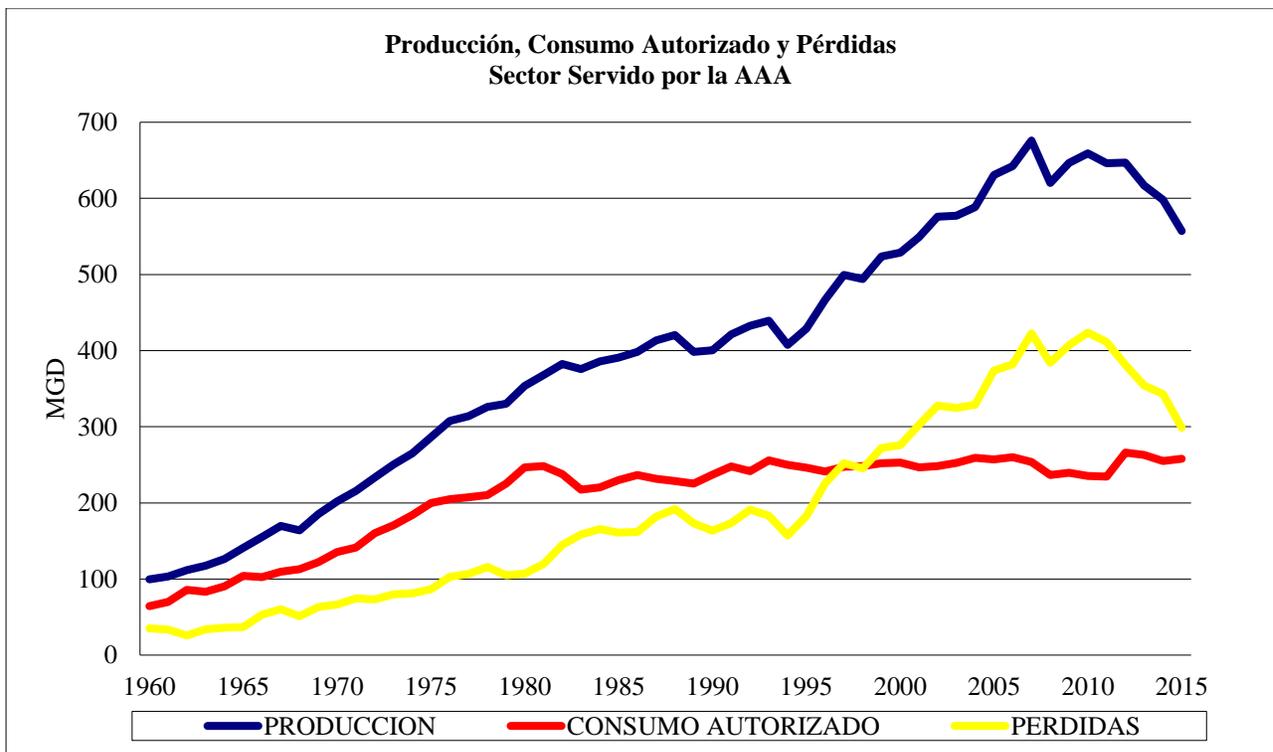
En Puerto Rico se configuran cuatro segmentos del mercado del agua, los que se describen a continuación.

4.2.1. Mercado del agua doméstica administrado por la AAA

La Autoridad de Acueductos y Alcantarillados extrae agua de pozos, represas y tomas superficiales y abastece la gran mayoría de los usuarios residenciales, industriales, comerciales, gubernamentales,

de construcción, servicios y turismo del País. En el 2014, la AAA opera un sistema de producción que consiste de 118 plantas de filtración y alrededor de 250 pozos.

La Gráfica 4.3 presenta el comportamiento histórico de la producción, el consumo autorizado y las pérdidas en el sistema de la AAA. Se observa un crecimiento de los tres indicadores hasta llegar a la década de los ochenta, cuando la producción sigue su patrón ascendente mientras que el consumo se mantiene relativamente estable.



Gráfica 4.3 Producción, Consumo Autorizado y Pérdidas Sector Servido por la AAA

Fuente: Datos provistos por la AAA

4.2.2. Sistemas Domésticos Comunitarios (Non-PRASA)

El sector residencial en Puerto Rico es servido, en su gran mayoría, por la AAA. La parte restante de su demanda es satisfecha por sistemas comunitarios independientes, conocidos como Non-PRASA y sistemas individuales de auto-abastecimiento. Para el año 2010, el USGS estimó la producción de los sistemas Non-PRASA en 7.0 MGD, de los cuales 2.72 MGD (38.6%) provenía de fuentes superficiales y 4.32 MGD (61.4%) de aguas subterráneas. Observamos que, en un período de 5 años, la producción de estos sistemas ha disminuido en 3.7 MGD, lo que representa una merma de 34.6% en la

producción de estos sistemas. La disminución registrada en la producción de los sistemas Non-PRASA, aparenta ser la continuidad de una tendencia que se viene registrando desde el 1980, donde la producción de estos sistemas se estimó en alrededor de 20.0 MGD.

4.2.3. Sistemas de Riego Administrados por la AEE

En Puerto Rico operan tres sistemas de riego administrados por la Autoridad de Energía Eléctrica (AEE). Los Distritos de Riego de la Costa Sur (Guayama y Juana Díaz) en el sur; el Distrito de Riego del Valle de Lajas en el suroeste y el Distrito de Riego de Isabela en el noroeste de Puerto Rico. Según los datos de despacho de agua provistos por la AEE, durante el año 2015, los sistemas de riego entregaron un total de 81.2 MGD para usos agrícolas, abasto doméstico y procesamiento de plantas termoeléctricas. Como se puede observar en la Tabla 4.2 el abasto doméstico se ha convertido en el principal uso que se da a esta fuente de abasto.

Tabla 4.2 Despacho de Agua Sistemas de Riego 2015

Sistema de Riego	Agricultura	Plantas Filtración AAA	Termoeléctricas
Valle de Lajas	13.8 MGD	10.15 MGD	0
Isabela	1.67 MGD	22.34 MGD	0
Costa Sur - Guayama	4.4 MGD	13.84 MGD	1.6 MGD
Costa Sur - Juana Díaz	13.4 MGD	0	0
Totales	33.27 MGD	46.33 MGD	1.6 MGD

Gran Total Despacho de Agua Sistema Riego = 81.2 MGD

Fuente: Datos provistos por la AEE.

La transformación ocurrida en la agricultura de Puerto Rico, donde se abandonó el cultivo de la caña de azúcar y se sustituyó por una precaria producción de cultivos variados, ha representado una merma sustancial en la producción y uso de agua de los sistemas de riego. Durante las últimas dos décadas se ha observado una tendencia a utilizar el agua de los canales de riego para usos domésticos, reduciéndose así la disponibilidad del recurso de agua para un posible proyecto de rescate de la agricultura y de recuperación de nuestros terrenos agrícolas.

No obstante, durante el periodo del 2010 al 2015, se observa un incremento sustancial en la utilización del agua de estos sistemas para riego agrícola. Como se puede apreciar en la Tabla 4.3, los despachos para el sector agrícola aumentan de 15.74 MGD a 33.27 MGD, lo que representa un incremento de 111.37% en el uso de agua de estas fuentes para fines agrícolas. Con la excepción del sistema Guayama, todos los demás sistemas de riego reflejan incrementos en el despacho de agua para fines agrícolas, durante este periodo.

La manifestación de esta tendencia es el resultado combinado de la implantación de un programa gubernamental de fortalecimiento del sector agrícola y de un proceso de sustitución de fuentes, por parte de los agricultores de estas zonas. Ante las limitaciones en la disponibilidad de aguas subterráneas, que ha ocurrido en la región sur de la Isla, los agricultores se han movido a utilizar las fuentes superficiales, entre ellas, los abastos de los sistemas de riego de la AEE.

Los agricultores servidos por estos sistemas pagan un cargo fijo por cuerda bajo riego. Se plantea que este sector es subsidiado ya que los agricultores no pagan el total del costo de llevar el agua hasta sus campos de siembra.

Tabla 4.3 Despacho de Agua Sistemas de Riego Agrícola - MGD

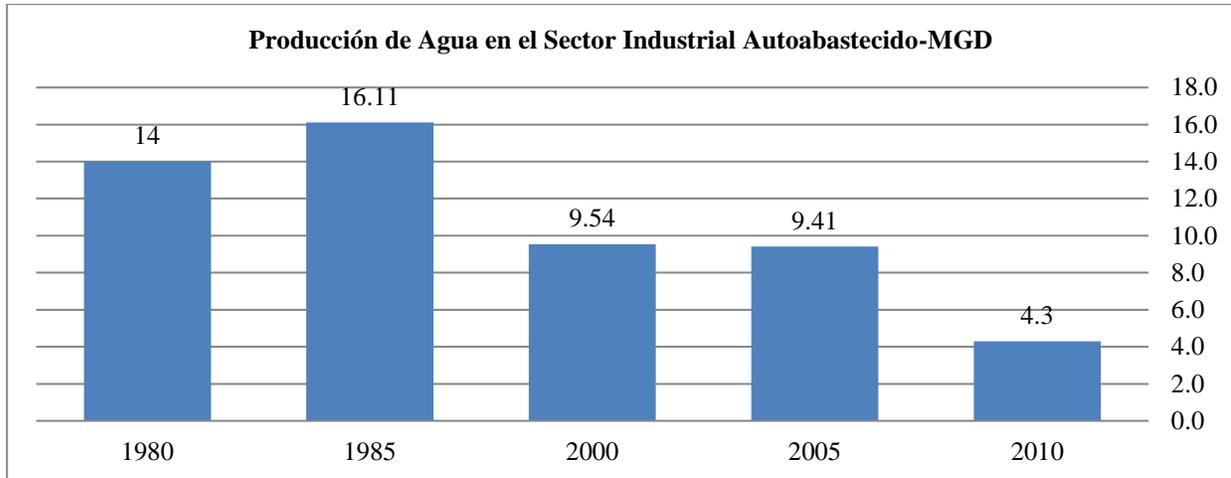
Sistema de Riego	2015	2010	Incremento
Valle de Lajas	13.8	5.05	8.75
Isabela	1.67	0.14	1.53
Costa Sur - Guayama	4.4	5.36	-0.96
Costa Sur - Juana Díaz	13.4	5.19	8.21
Totales	33.27	15.74	17.53

Fuente: Datos provistos por la AEE.

4.2.4 Autoabastecimiento

Este segmento del mercado consiste de pozos, tomas superficiales, cajas de agua y cisternas, entre otros, construidos por los propios usuarios. La industria pesada y la agricultura son los sectores que mayormente se abastecen de este mercado. Debido a causas relacionadas con la disminución de la actividad agrícola, la pérdida de dinamismo del sector manufacturero y el deterioro ocurrido en algunos de los acuíferos del País, este segmento del mercado es uno en descenso.

La producción del sector industrial autoabastecido se estimó, por el USGS en 4.3 MGD en el año 2010. La evaluación histórica de la producción de este segmento del mercado de autoabastecimiento refleja una tendencia decreciente que se manifiesta a partir de mediados de la década del 80, véase Gráfica 4.4.



Gráfica 4.4 Producción de Agua en el Sector Industrial Autoabastecido - MGD

Fuente: USGS, Water Use Inventory, 2010

4.3. Proyecciones de Demanda de Agua y Requerimientos de Producción

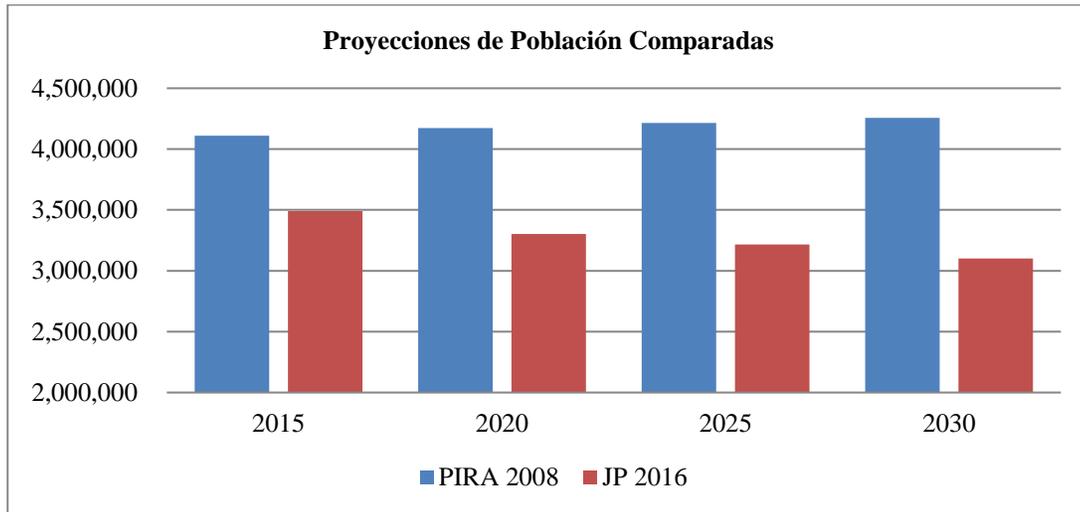
La demanda de agua se define como la cantidad del recurso que sería comprado o usado a un precio determinado. La determinación de la demanda debe ser visualizada al nivel de los sectores socio-económicos (residencial, industrial, comercial, gubernamental, agrícola y ambiental) ya que los factores que afectan la demanda, así como los precios que experimentan, difieren según el sector analizado.

La proyección de la demanda de agua es una tarea fundamental para la planificación de los recursos de agua de un País. A base de los niveles esperados de la demanda de agua es que se diseñan los sistemas de abasto de agua. Es indispensable que estos sistemas provean la cantidad del recurso que se necesita, sin embargo, si los mismos se construyen con una capacidad muy superior a lo necesario, se incurre en costos innecesarios e ineficiencias que serán pagadas por los usuarios. Ante la crisis fiscal que experimenta el Gobierno del Estado Libre Asociado de Puerto Rico, en la actualidad, es indispensable que la programación de obras que se diseñe sea una eficiente, fundamentada en la minimización de costos y que permita una estructura de financiamiento de la inversión que pueda ser afrontada por el Estado.

4.3.1 Demanda de Agua del Sector Residencial Servido por la AAA

Las proyecciones de población, elaboradas por la Junta de Planificación y el consumo residencial promedio per cápita por municipio, publicados por los ingenieros consultores de la AAA en el documento "PRASA Water & Wastewater Infrastructure Master Plan Water Demand Update Task 1, 2014" serán la base del modelo de proyección de demanda de agua del sector residencial servido

por la AAA. Al utilizar esta metodología estamos incorporando los resultados del trabajo realizado por la compañía CDM³ para el DRNA en el año 2004, ya que los datos publicados por los ingenieros consultores de la AAA en el 2014, son una actualización de los estimados y proyecciones realizados por CDM.



Gráfica 4.5 Proyecciones de Población Comparadas

Las proyecciones de población que se utilizan en este trabajo, Gráfica 4.5, son las cifras de proyecciones de población por municipio de Puerto Rico, elaboradas por la Junta de Planificación para el periodo de 2013 a 2025. Estas son las proyecciones de población más recientes que están disponibles y se caracterizan por ser decrecientes y sustancialmente menores a las anteriores. Para proyectar los valores correspondientes al año 2030, se extrapolaron las tendencias históricas de natalidad, mortalidad y migración a nivel Isla y se distribuyó la población por municipio a base de la misma proporción de cada municipio al total que resultara de las proyecciones de la Junta de Planificación para el año 2025.

La demanda promedio per cápita se proyecta bajo los siguientes supuestos:

1. El incremento de 52.1% en la tarifa promedio del sector residencial, decretado en julio del 2013, tendrá el efecto de disminuir la demanda per cápita residencial en 5%, durante el período del 2013 al 2015. A partir de este último año, el precio real del agua se mantendrá constante durante lo que resta del periodo de proyección.

³ CDM - Planning and Management Consultants LTD, Carbondale, [Illinois](#)

De haber utilizado el estimado de elasticidad precio de -0.22, la demanda per cápita residencial se hubiera reducido en 11.5%, en vez de 5%. No obstante, decidimos utilizar este enfoque conservador para proveer por el hecho de que los valores de demanda de agua residencial per cápita, de la mayoría de los municipios del País, son relativamente bajos. Según estableciéramos anteriormente, el nivel de la sensibilidad de la asociación ocurre sobre un nivel de consumo básico, ya que el carácter de recurso indispensable para la actividad humana se manifiesta en una relativa elasticidad hasta cierto nivel de consumo.

2. El ingreso personal disponible per cápita real se mantendrá constante durante la totalidad del período de proyección. La utilización de este supuesto es consistente con la evaluación realizada en la sección de Perspectivas Económicas.

De esta forma, el modelo de proyección se simplifica de forma tal que el único factor a considerar en el cómputo de la demanda per cápita es el incremento en precio del agua residencial decretado en julio del 2013. El valor promedio de la demanda de agua residencial per cápita para la Isla se reduce de 55.1 gpd en el 2013 a 52.3 gpd en el 2015. A partir de esta fecha se mantiene constante.

Las proyecciones de demanda de agua para el sector residencial de la población residente de la Isla se computan al multiplicar las proyecciones de demanda de agua residencial per cápita por las proyecciones de población por municipio. Los valores para el total de la Isla se reducen de 201.6 MGD en el 2013 a 149.7 MGD en el 2030, lo que representa una reducción de 25.7% durante el período de proyección.

Además de la población residente de un municipio, la AAA brinda servicio de suministro de agua potable, clasificado como residencial, a un número considerable de abonados cuyas propiedades son utilizadas por personas no residentes, que utilizan las mismas como segundos hogares o son alquiladas para propósitos de negocio o son vacacionales. Esta población flotante no está considerada en los estimados y proyecciones de población y por tanto en los estimados de demanda de agua residencial presentados con anterioridad.

Para compensar por la dinámica descrita, procedimos a desarrollar un estimado de demanda de agua de la población flotante para cada municipio, utilizando los datos de número de unidades de vivienda total y número de unidades de vivienda vacante, publicados en el Censo

del 2010⁴. El computo de la demanda de agua de la población flotante para toda la Isla en el 2013 es de 19.5 MGD.

La demanda residencial total, para el año 2013, se proyecta sumando la demanda de agua residencial total por municipio de la población residente y la demanda de agua de la población flotante de este mismo año. Para años posteriores, la demanda residencial total, de cada año, se estima sumando la demanda de agua residencial total por municipio de la población residente de dicho año a la demanda de agua de la población flotante del año 2013. La proyección de la población flotante se mantiene constante ya que se entiende que la misma no está sujeta a los cambios poblacionales ni es responsiva a aumentos moderados en el precio del agua. La proyección de demanda residencial total para la Isla se reduce de 221.1 MGD en el 2013 a 181.6 MGD en el 2030, lo que representa una disminución de 17.9% durante el período de proyección.

Al utilizar una metodología de proyección de la demanda de agua, fundamentada en la población total y la demanda per cápita, los resultados incluyen segmentos del mercado del agua no servidos por la AAA. En las proyecciones de la demanda de agua residencial total se incluye la demanda de la población servida por los sistemas comunitarios Non-PRASA y otros residentes que se suplen de sistemas propios. La demanda de los sistemas Non-PRASA para toda la Isla se estimó en 5.2 MGD y la autoabastecida en 2.1 MGD.

La demanda de agua del sector residencial servido por la AAA se estima restando la demanda de agua de la población servida por los sistemas comunitarios Non-PRASA y la de otros sistemas propios residenciales a la demanda de agua residencial total. En este ejercicio el valor de la demanda de agua de la población servida por los sistemas comunitarios Non-PRASA y los autoabastecidos residenciales se mantiene constante en su valor del 2013. La demanda del sector servido por la AAA, para toda la Isla, se reduce de 213.8 MGD en el 2013 a 174.2 MGD en el 2030, lo que representa una disminución de 18.5%.

4.3.2 Demanda de Agua del Sector No Residencial Servido por la AAA

La Demanda de Agua del Sector No Residencial Servido por la AAA se computa, para el año 2013, utilizando la misma metodología que los ingenieros consultores de la AAA en el documento “PRASA Water & Wastewater Infrastructure Master Plan Water Demand Update Task 1, 2014”. La misma

⁴ Para una descripción de la metodología utilizada y un detalle de los datos por municipio, refiérase al documento Evaluación Regional de la Disponibilidad de Recursos de Agua en Puerto Rico, incluida como anejo al Plan.

consiste en multiplicar la proporción de consumo de agua no residencial a residencial de cada municipio, estimada por la compañía CDM en su estudio del 2004, por la demanda de agua residencial total del 2013 del municipio correspondiente.

Para proyectar años posteriores decidimos variar la metodología utilizada por los ingenieros consultores de la AAA. Entendemos, que la demanda de agua de los sectores no residenciales va a estar determinada, en mayor medida, por el desempeño de la economía y no necesariamente por el cambio poblacional. En este sentido, ante una economía en estancamiento, la metodología aquí utilizada supone que la demanda de agua de los sectores no residenciales se mantendrá constante durante la totalidad del período de proyección. No obstante, para el año 2015, la proyección se disminuye en un 5%, para compensar por los incrementos en las tarifas decretadas por la AAA en julio del 2013. De aquí en adelante, se mantiene constante en el valor del 2015.

Por otra parte, se hacen ajustes a la demanda de agua no residencial de varios municipios para incorporar los requerimientos de agua de elementos puntuales de desarrollo, identificados en el Plan de Recuperación Económica citado, y proyectos de gran tamaño en progreso. Entre los proyectos considerados se encuentran los siguientes:

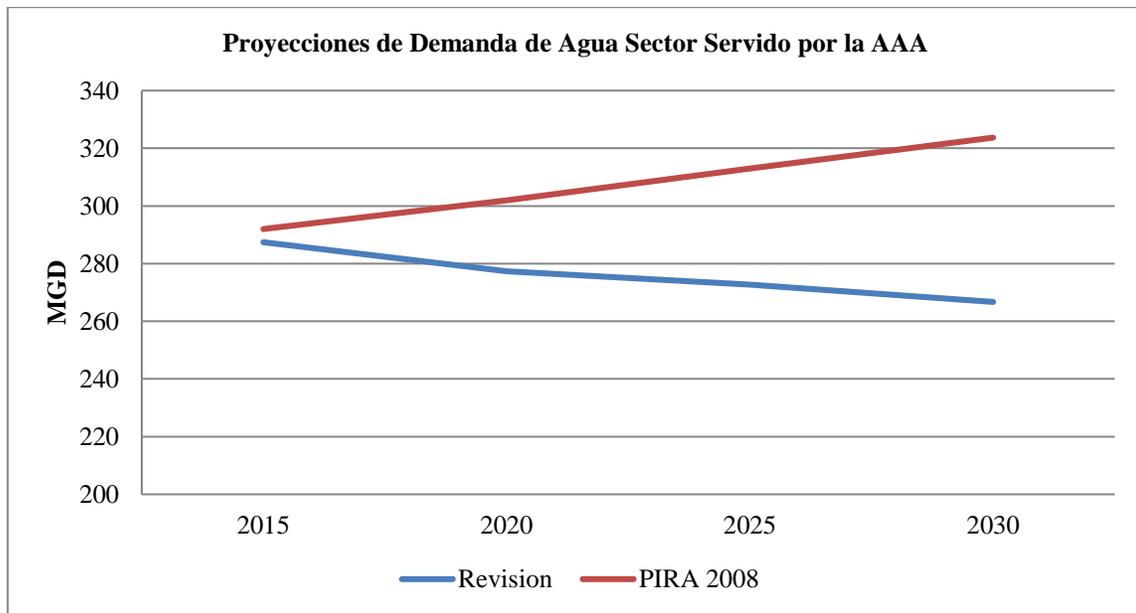
1. Las propuestas de utilización de la infraestructura disponible en las antiguas bases navales Ramey y Roosevelt Roads, así como del Puerto de las Américas en Ponce.
2. Los desarrollos relacionados con la industria aeronáutica en el noroeste del País.
3. Los planes de desarrollar una nueva zona industrial en el municipio de Dorado.
4. Las construcciones aprobadas o en progreso de centros comerciales y hoteleros en el municipio de San Juan.

Como consecuencia de utilizar la metodología de la compañía CDM, la proyección de demanda de agua no residencial incluye segmentos del mercado del agua no servidos por la AAA. Dicha metodología estima la demanda multiplicando el empleo por sector económico por un valor de consumo de agua por empleado en el sector económico correspondiente. De esta forma, en las proyecciones de la demanda de agua no residencial total se incluye la demanda de la industria autoabastecida que se sule de sistemas propios, por lo que restamos este valor para estimar la demanda no residencial servida por la AAA.

Nuestras proyecciones de demanda de agua para el sector no residencial servido por la AAA para toda la Isla, se reducen de 92.9 MGD en el 2013 a 92.5 MGD en el 2030, lo que representa una disminución de 0.4%. En la proyección de los sectores no residenciales, la merma esperada es sustancialmente menor que la de 24.3% computada para el sector residencial.

4.3.3 Proyección de Demanda de Agua para la Totalidad del Sector Servido por la AAA

Al agregar las proyecciones de demanda servida por la AAA residencial a la no residencial, obtenemos la proyección para la totalidad del sector servido por la AAA. Como se puede observar en la Gráfica 4.6, las proyecciones de demanda servida por la AAA disminuyen de 306.7 MGD en el 2013 a 266.7 MGD en el 2030, lo que representa una merma de 40.0 MGD (13.0%) durante el período de análisis. Además, resalta el hecho de que éstas son significativamente menores a las proyecciones del PIRA del 2008.



Gráfica 4.6 Proyecciones de Demanda de Agua Sector Servido por la AAA

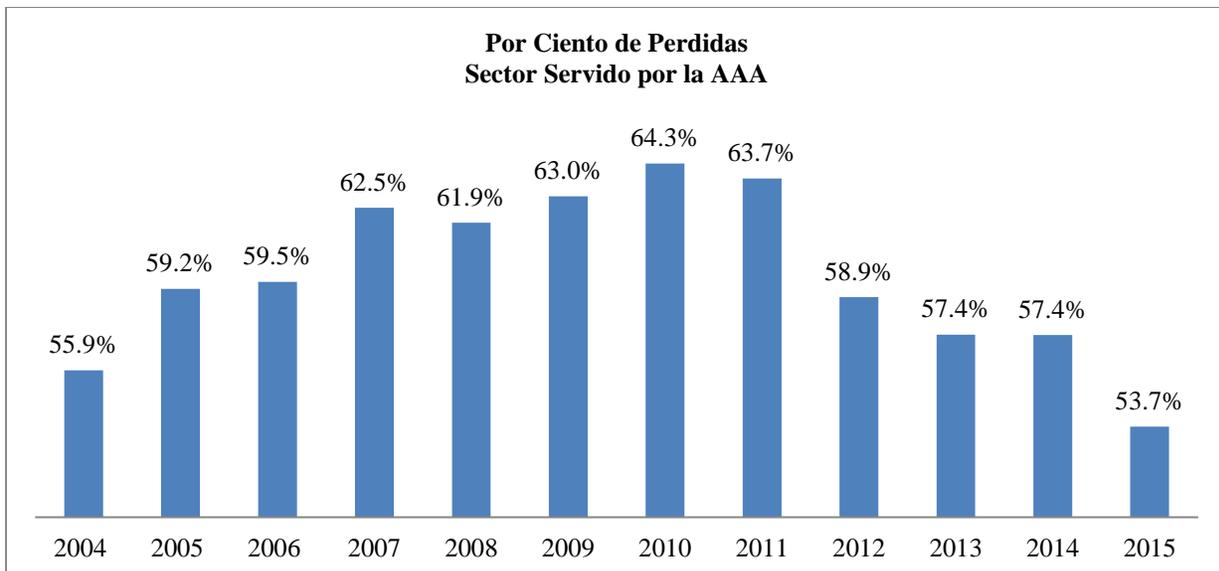
4.3.4. Requerimientos de Producción Sector Servido por la AAA

Los requerimientos de producción representan la cantidad del recurso que sería necesario extraer de las fuentes para satisfacer la demanda total. Las proyecciones de requerimientos de producción se computan a partir de las proyecciones de demanda de agua desarrolladas anteriormente. Las mismas se estiman para cada municipio y luego se agregan para cada una de las doce regiones de planificación que se definen más adelante en este documento.

La cantidad de agua que la AAA extrae de las fuentes (ríos, represas y pozos) se conoce como la producción. La demanda es la cantidad de agua que requieren a los abonados. La diferencia entre la producción y la demanda se denomina como agua no facturada. Estas incluyen aproximadamente un 4% de la producción total que utiliza la AAA para el lavado de filtros. La parte restante se debe a filtraciones de las líneas de distribución, desperfectos en la medición de tanto la producción como del consumo y el hurto de agua. Los niveles de agua no facturada son un indicador de la eficiencia del sistema de distribución.

La Gráfica 4.7 presenta los valores de pérdidas del sistema de la AAA por los pasados 10 años. A pesar de que el indicador se ha estabilizado y muestra una tendencia a disminuir a partir del año 2010, todavía su magnitud es extremadamente alta, al ser comparada con otras jurisdicciones. Reconocemos los esfuerzos que está haciendo la AAA para atacar este problema y recomendamos se intensifique el proceso para mejorar la eficiencia operacional de la Agencia.

Los altos niveles de pérdidas inciden de forma directa sobre la salud fiscal de la AAA. Mientras persista este problema, los esfuerzos que se realicen por aumentar la producción no se traducirán en incrementos correspondientes de ingresos por venta de agua y los costos promedios de prestar el servicio crecerán exponencialmente.



Gráfica 4.7 Por Ciento de Pérdidas Sector Servido por la AAA

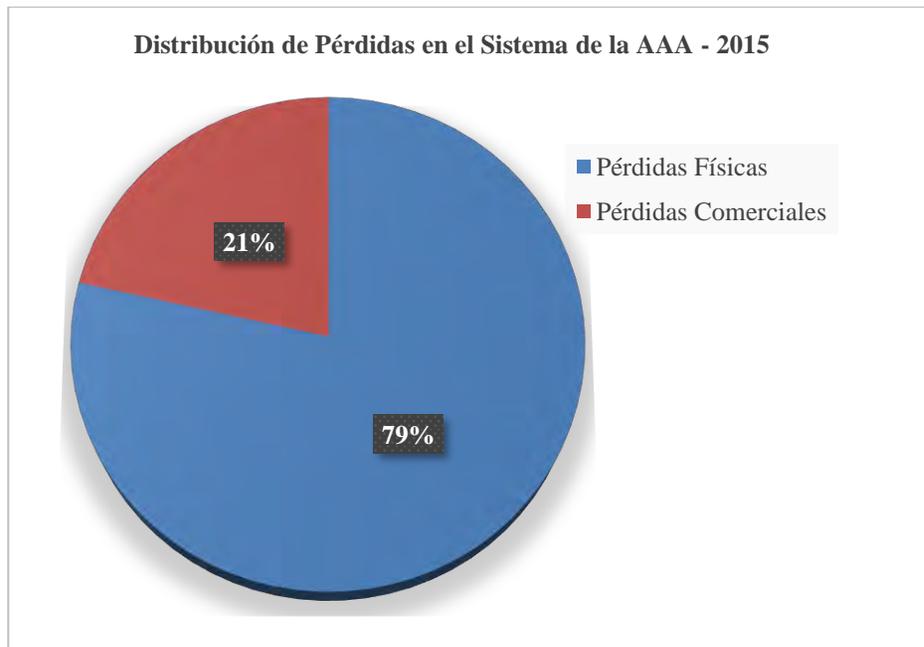
Fuente: AAA

De acuerdo a auditorías de uso de agua realizadas por la AAA en el año 2015, la mayor proporción de las pérdidas de su sistema, corresponden a pérdidas físicas relacionadas con filtraciones de tuberías y acometidas y desbordes de tanques de almacenaje. Según se observa en la Tabla 4.4 y la Gráfica 4.8, las pérdidas físicas durante el 2015, representaron el 42.2% de la producción y el 79% del total de pérdidas del sistema.

Tabla 4.4 Distribución de Pérdidas del Sistema de la AAA

	2015	
	MGD	% de la Producción
Pérdidas Físicas	235	42.20%
Pérdidas Comerciales	64	11.50%
TOTAL	299	53.70%

Fuente: AAA



Gráfica 4.8 Distribución de Pérdidas en el Sistema de la AAA - 2015

Fuente: AAA

Por su parte, las pérdidas comerciales, cuyos mayores componentes son el hurto de agua y los errores de medición de contadores, representaron el 21% del total de pérdidas y un, no despreciable, 11.5% de la producción total de la AAA en el 2015. La reducción de las pérdidas comerciales es de fundamental importancia para la salud fiscal de la AAA, ya que representan gastos que se incurren sin que ocurra generación alguna de ingresos.

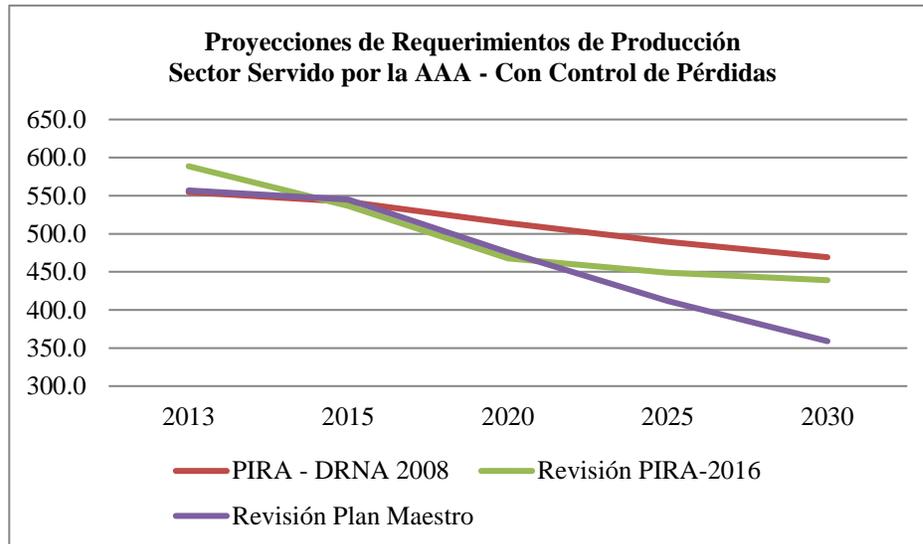
Debido a la naturaleza de la metodología utilizada para computar la demanda de agua del sector servido por la AAA, los componentes del agua no facturada relacionados con el hurto de agua y los errores de medición ya fueron incorporados a la misma. Esto es así ya que, al estimar la demanda a base de la población total y el empleo total por sector económico, ya se incluye cualquier residente o negocio que no haya sido captado a través de los datos del consumo medido. De esta forma, los componentes de la producción que están excluidos de las proyecciones de demanda de agua son las pérdidas físicas del sistema, el agua utilizada para el lavado de filtros y los errores en los datos de medición de la producción.

Para proyectar los requerimientos de producción, utilizaremos los estimados de pérdidas físicas desarrollados por la AAA, para cada una de sus regiones de planificación, según presentados en el documento "PRASA Water & Wastewater Infrastructure Master Plan Water Demand Update Task 1, 2014". Los datos del 2013 son el resultado de auditorías realizadas por la AAA. A cada municipio que comprenda una región, se le asignará el valor de pérdidas físicas computado para la región correspondiente.

Las proyecciones se realizan bajo el supuesto de que las pérdidas físicas se reducirán en 3% para el 2015, 15% para el 2020 y 18% para el 2025. Estos supuestos corresponden con las metas de la AAA en el documento de revisión del Plan Maestro del año 2014, el cual establece un programa realista y alcanzable de reducción de pérdidas físicas.

La Gráfica 4.9 presenta las proyecciones de requerimientos de producción del sector servido por la AAA. Como se puede observar, estos se reducen de 588.7 MGD en el 2013 a 439.0 MGD en el 2030, lo que representa una disminución de 149.7 MGD (25.4%) durante el período de análisis. Si comparamos los mismos con los estimados realizados en el PIRA del 2008, vemos que son

significativamente menores. No obstante, nuestros estimados son relativamente mayores a los realizados por la AAA en su actualización del Plan Maestro del año 2014.⁵



Gráfica 4.9 Proyecciones de Requerimientos de Producción Sector Servido por la AAA - Con Control de Pérdidas

Es importante destacar la diferencia que se refleja entre nuestros estimados de requerimientos de producción para el año 2013 (588.7 MGD) y la producción informada por la AAA para ese mismo año (617.0 MGD). Esta discrepancia también se manifiesta en el informe de los consultores de la AAA en la revisión Plan Maestro AAA del 2014, donde estiman una demanda de agua, incorporando las pérdidas físicas, de 556.5 MGD para el 2013. Esta situación se explica por el componente de errores de medición, que la AAA estima en el orden de un 7.5% de la producción. Es evidente la existencia de una tendencia a la sobre estimación de la producción de las plantas de filtración y pozos de la AAA.

4.3.5. Requerimientos de Producción Non-PRASA, Auto Abasto Residencial, Industrial y Termoeléctricas

Para propósitos de proyectar los requerimientos de producción de estos sectores, se presume que los sistemas se mantendrán operando separados de la AAA y su producción se mantendrá constante

⁵ Las proyecciones presentadas por la AAA en la Tarea 1 del Plan Maestro del 2014 disminuyen de 556.5 MGD en el 2013 a 427.5 MGD en el 2030. No obstante, las mismas no incorporan el efecto de la reducción esperadas en el nivel de pérdidas físicas, producto de su proyecto de reducción de las mismas. Para propósitos de nuestro trabajo, ajustamos las mismas aplicando las metas de reducción de pérdidas físicas establecidas por la propia AAA en tareas posteriores del Plan Maestro del 2014.

en su estimado del 2010. El uso de agua asociado al eventual crecimiento del sector de la industria pesada se incorpora al análisis a través de la proyección de las necesidades de producción del sector doméstico servido por la AAA. El potencial de aumento en la extracción de agua subterránea en los acuíferos del País es sumamente limitado. La naturaleza intensiva en uso de agua de este tipo de actividad plantea restricciones para expandir su práctica de autoabastecimiento. Cualquier aumento significativo que ocurra en el uso de agua de estos sectores debe ser satisfecho mediante la conexión al sistema de la AAA.

4.3.6. Requerimientos de Producción Sector Agrícola

A los fines de evaluar las implicaciones, en términos de la disponibilidad de recursos de agua, de la política pública de la actual Administración Gubernamental de establecer un **Programa de Seguridad Alimentaria** e implantar un plan de incremento en las operaciones agronómicas que maximice el uso de los terrenos declarados como reservas agrícolas, se determinó que era pertinente elaborar dos escenarios de demanda de agua para el sector agrícola en Puerto Rico.

A continuación, se describen los fundamentos de cada uno de ellos:

Escenario Base:

El escenario Base se fundamenta en el documento Estudio sobre el Uso de Agua Agrícola en Puerto Rico (2005)⁶ comisionado por el DRNA al Instituto sobre Recursos de Agua y el Ambiente de Puerto Rico. En este trabajo se cuantificó el nivel de actividad agrícola, por municipio y cuenca hidrográfica, durante el año 2005. Para cada uno de los renglones del sector se determinó su demanda de agua basado en metodologías que incorporan las necesidades fisiológicas de cada animal o cultivo y las condiciones hidrogeológicas y geológicas de las zonas geográficas en que ocurre la actividad. Posteriormente, el estudio pasa a proyectar las demandas agrícolas esperadas para el año 2025. Este ejercicio se realiza tomando en consideración el potencial que representan las áreas designadas como reservas agrícolas y las tendencias del mercado. Los estimados de requerimientos de producción se incorporan al análisis mediante la diferenciación entre los conceptos de demanda

⁶ El Departamento de Agricultura no tiene proyecciones de demanda de agua para la actividad agrícola del País, según lo reconoce en el Plan de Seguridad Alimentaria. Aunque recibimos unos datos sobre proyecciones de agua para uso de la agricultura, los cuales eran muy altos, en la vista pública del Plan de Agua de 29 de marzo de 2016, el representante del Departamento de Agricultura declararon que esos datos eran incorrectos por ser muy elevados. Por lo tanto, se revisaron los escenarios y se ajustaron a los datos disponibles y confiables del I Instituto sobre Recursos de Agua y el Ambiente de Puerto Rico

teórica y demanda real, donde la demanda de agua real, a diferencia de la demanda teórica, incluye las pérdidas en los sistemas de distribución y riego.

Escenario Potencial

El escenario potencial pretende reflejar los requerimientos de agua para riego que serían necesarios para lograr que la totalidad de los terrenos clasificados como reservas agrícolas sean cultivados. El cómputo de los requerimientos del recurso parte del estimado del área de terreno designado como reserva agrícola en cada municipio del País. Se presume la misma distribución de cultivos y método de irrigación por municipio que en el Escenario Base.

En el **Escenario Base** el área bajo cultivo aumenta de 200,003 cuerdas a 232,018, para un incremento de 32,015 cuerdas bajo cultivo (16.0%). Por su parte, el Escenario Potencial se fundamenta en una proyección del área bajo cultivo de 491,145 cuerdas en 2013, lo que representa un sustancial incremento del orden de 291,142 cuerdas (145.6%) bajo cultivo.

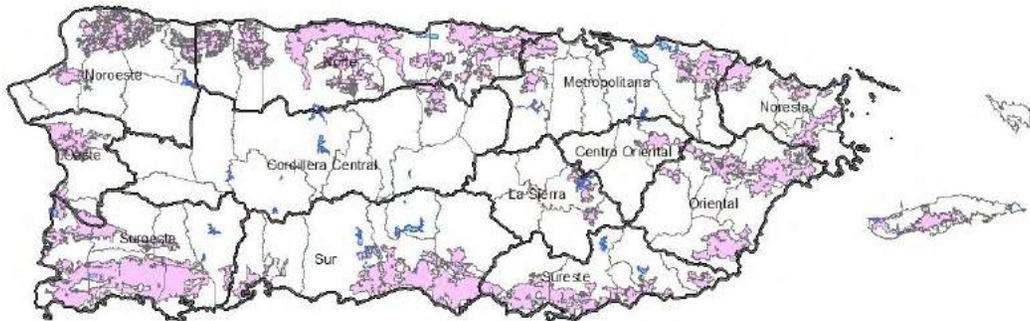


Ilustración 4.1 Terrenos Clasificados como Reservas Agrícolas

Fuente: Junta de Planificación de Puerto Rico

4.3.6.1. Operaciones Agronómicas

Las proyecciones de requerimientos de producción para las operaciones agronómicas del sector agrícola, en el Escenario Base, se computan a partir de las proyecciones de demanda de agua real desarrolladas por el Instituto de Recursos de Agua (IRA). En nuestra metodología, tomamos los valores de demanda real computados por el IRA para el 2005 como nuestro estimado de requerimientos de producción del 2013. Se realizaron ajustes en algunos municipios donde se pudo constatar que el uso de agua actual es mayor que el presentado por el IRA para el año 2005.

Posteriormente, anualizamos la tasa de crecimiento computada por el IRA para la demanda de agua real para el período 2005 a 2025. Dicha tasa anual se aplica, linealmente, al período 2013 a 2030.

La proyección de requerimientos de producción para las operaciones agronómicas del sector agrícola para el Escenario Base, a nivel Isla aumentan de 58.4 MGD en el 2013 a 68.4 MGD en el 2030, para un incremento de 10.0 MGD (17.1%) durante el período de análisis.

El Escenario Potencial presume que la totalidad de los terrenos clasificados como reservas agrícolas serán puestos en producción. La proyección de requerimientos de producción para las operaciones agronómicas del sector agrícola para el Escenario Potencial a nivel Isla aumentan de 58.4 MGD en el 2013 a 255.4 MGD en el 2030, para un marcado incremento de 187.0 MGD (337.3%) durante el período de análisis.

4.3.6.2. Operaciones Agropecuarias

Las proyecciones de demanda de agua y requerimientos de producción para las operaciones agropecuarias son iguales en ambos escenarios. Como se mencionó anteriormente, la demanda de agua y los requerimientos de producción para las operaciones agropecuarias se computan a partir de las proyecciones de demanda de agua real desarrolladas por el Instituto de Recursos de Agua. En este trabajo el IRA⁷ presume que no ocurrirá incremento alguno en el número de animales criados para propósitos pecuarios. Por tanto, no proyectan incrementos significativos en la demanda de agua de este sector.

Las proyecciones de requerimientos de producción para las operaciones pecuarias del sector agrícola aumentan de 10.0 MGD en el 2013 a 10.5 MGD en el 2030, para un incremento de 0.5 MGD (5.0%) durante el período de análisis.

4.3.7. Requerimientos de Producción Usos Extractivos

Al agregar las proyecciones de requerimientos de producción de los sectores servidos por la AAA, el residencial auto abastecido, el de las industrias autoabastecidas, el de las termoeléctricas y el sector agrícola, obtenemos las proyecciones de necesidades de producción para todos los usos de agua extractivos del País. Las Tablas 4.5 y 4.6 presentan un detalle de estas proyecciones a nivel Isla desglosadas sector.

⁷ Para el 2005 no existía una política agrícola como al presente.

PLAN INTEGRAL DE RECURSOS DE AGUA
JUNIO, 2016

Tabla 4.5 Proyecciones de Requerimientos de Producción Usos Extractivos

Sector	Escenario Base - MGD				
	2013	2015	2020	2025	2030
Servido por la AAA	588.7	536.7	467.6	448.9	439.0
Non Prasa	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
Auto Abasto Residencial	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
Industrial Autoabastecido	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3
Termoeléctricas	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
Operaciones Agronómicas	58.4	59.6	62.6	65.5	68.4
Operaciones Agropecuarias	10.0	10.1	10.2	10.4	10.5
Total	673.3	622.5	556.5	540.9	534.2

En el Escenario Base, los requerimientos de producción para usos extractivos se reducen de 673.3 MGD en el 2013 a 534.2 MGD en el 2030, lo que representa una disminución de 139.1 MGD (20.7%) durante el período de análisis. Mientras tanto, en el Escenario Potencial, los requerimientos aumentan de 673.3 MGD en el 2013 a 721.1 MGD en el 2030, lo que representa un incremento de del orden de 47.8 MGD (7.1%) durante el período de análisis.

En la actualidad, el sector servido por la AAA es el mayor usuario de agua del País. Su producción en el 2013 representa el 87.4% del total de usos extractivos. Le sigue en orden de magnitud de extracción el sector agrícola, el que en conjunto (operaciones pecuarias y agronómicas) extrae el 11.0% del total. Por otra parte, en la eventualidad de la materialización del Escenario Potencial, la distribución de los requerimientos de producción variaría significativamente. La proporción que representaría el sector servido por la AAA disminuiría a un 60%, mientras que la requerida por el sector agrícola aumentaría a hasta alrededor de un 36% del total.

Tabla 4.6 Proyecciones de Requerimientos de Producción Usos Extractivos

Sector	Escenario Potencial - MGD				
	2013	2015	2020	2025	2030
Servido por la AAA	588.7	536.7	467.6	448.9	439.0
Non Prasa	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
Auto Abasto Residencial	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
Industrial Autoabastecido	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3
Termoeléctricas	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
Operaciones Agronómicas	58.4	81.6	139.5	197.5	255.4
Operaciones Agropecuarias	10.0	10.1	10.2	10.4	10.5
Total	673.3	644.5	633.5	672.9	721.1

4.3.8. Requerimientos Recreativos, Estéticos y Ambientales

Los usos recreativos, estéticos y ambientales no son de naturaleza extractiva. No obstante, la satisfacción de su demanda está limitada por la tasa de extracción de agua para otros usos. La extracción de agua de fuentes superficiales debe proveer para mantener en el cauce de los ríos, embalses y estuarios una cantidad de agua con una calidad adecuada para sostener las funciones ambientales de estos ecosistemas acuáticos y para permitir actividades recreativas activas y de contemplación escénica.

Las demandas de agua recreativas, estéticas y ambientales se determinan a base de los caudales y niveles mínimos que se deben preservar en corrientes superficiales y embalses de agua para viabilizar dichos usos. La cuantificación de las mismas es un ejercicio que debe ser realizado para cada cuerpo de agua en función de las aspiraciones sociales y planes de desarrollo de cada región del País. Este ejercicio contable está fuera del alcance de este documento. No obstante, se analiza el tema de los caudales ambientales, y el rendimiento seguro de las fuentes de abastos desde una perspectiva de desarrollo sostenible. Se establece como política pública un límite a la extracción, en nuevas solicitudes de franquicias de agua, donde se requiere que como mínimo absoluto se mantenga el Q_{99} como el caudal ambiental. En el diseño de nuevos embalses se requiere mantener un flujo, aguas abajo de la presa, equivalente a la totalidad del Q_{99} del río y que el nivel de agua en el embalse no debe bajar del nivel que represente el 20% del volumen de almacenaje útil.

Por otra parte, el documento recomienda realizar una serie de proyectos estratégicos, entre los que se incluyen definir los criterios para determinar caudales ambientales y proyectos pilotos de planes de manejo de cuenca hidrográfica donde se cuantifique, de forma detallada, las demandas recreativas, estéticas y ambientales de cada cuenca que sea evaluada.

4.4. Balances de Disponibilidad Regional

El análisis de abasto de agua, corresponde a un balance entre la demanda y la oferta de agua. La demanda está determinada por las necesidades de los diversos sectores socioeconómicos del País, mientras que la oferta es función de la calidad y capacidad del abasto a ser aprovechado, así como de la infraestructura existente o con potencial de ser construida a un nivel de costos que puedan ser sufragados por los usuarios.

En su manifestación espacial los centros de demanda corresponden principalmente a los patrones de asentamientos urbanos y de desarrollo económico regional. De esta forma, la configuración geográfica de la demanda de agua se asocia a factores tales como la existencia de núcleos urbanos, la disponibilidad de terrenos aptos para la agricultura, la existencia de zonas industriales y comerciales y no necesariamente a los patrones naturales de la manifestación del recurso.

Al evaluar la disponibilidad de agua en su ámbito espacial es necesario configurar un esquema de análisis regional que permita identificar con claridad la relación entre la oferta y la demanda. En esta dirección hemos configurado un conjunto de regiones de planificación en las que se manifiesta la relación entre los usuarios que se suplen de una fuente de abasto en particular. La elaboración de presupuestos de agua a este nivel, permite identificar las limitaciones que presenta dicha fuente para cubrir las necesidades presentes y futuras de los usuarios.

El esquema de análisis por cuenca hidrográfica es de particular utilidad para evaluar problemas de condición del recurso y otros aspectos relacionados con la planificación del recurso agua. No obstante, en el ámbito del análisis del abasto de agua, el foco de atención es satisfacer las necesidades sociales del País que se manifiestan en patrones de desarrollo regional que no serían atendidos adecuadamente mediante el modelo de análisis de cuenca.

4.4.1 Regiones de Planificación

El Mapa 2 presenta la configuración de la estructura de las unidades de análisis regional a ser utilizada en las evaluaciones de disponibilidad del recurso. La Isla se dividió en doce regiones constituidas a base de la delimitación de grupos de municipios que, en su conjunto, presentan características similares en cuanto a sus fuentes de abasto, infraestructura de distribución y patrones de desarrollo socioeconómico, entre otros. El objetivo fundamental, al definir cada región en particular, fue el de evaluar un área geográfica en la que se pudieran identificar situaciones de deficiencias de abasto o conflictos de uso que requieren de intervenciones infraestructurales o del establecimiento de políticas públicas para su resolución. Para cada una de estas unidades de análisis regional se recomendarán diversas estrategias para el manejo y desarrollo de los recursos de agua que en ellas utilizan.



Ilustración 4.2 Mapa Regiones de Planificación

4.4.2 Distribución Regional de los Requerimientos de Producción

La Tabla 4.7 presenta nuestros estimados de requerimientos de producción, para todos los usos extractivos, agregados por región de planificación, para el Escenario Base. Podemos observar que la demanda de agua se concentra en aquellas regiones de mayor densidad urbana. La Región Metropolitana es por mucho la que refleja un mayor requerimiento del recurso agua durante la totalidad del período de análisis.

Al evaluar los resultados de las proyecciones al 2030 para el Escenario Potencial, ver Tabla 4.8, vemos que, aunque la región Metropolitana se mantiene como la de mayor demanda de agua, la región suroeste viene a convertirse en la segunda zona geográfica de mayor intensidad en requerimientos del recurso.

En la Tabla 4.9 se presenta los requerimientos de producción por región para los usos autoabastecidos y los sistemas Non-PRASA. Se observa que los sistemas comunitarios Non-PRASA

se concentran en las regiones Oriental, Centro Oriental y la Cordillera Central. Por otra parte, los sistemas de autoabasto residencial son más comunes en la regiones Noroeste y la Sierra, mientras que la región Norte se concentran los de uso industrial. Finalmente, el uso de agua para uso de centrales termoeléctricas solo ocurre en las regiones Sur y Sureste.

Tabla 4.7 Requerimientos de Producción Usos Extractivos

Región	Escenario Base - MGD				
	2013	2015	2020	2025	2030
Centro Oriental	35.02	31.52	28.21	27.44	26.88
Cordillera Central	28.37	25.33	22.39	21.80	21.36
La Sierra	23.22	21.10	19.11	18.70	18.40
Metropolitana	248.33	226.81	196.87	188.42	184.94
Noreste	19.74	19.65	17.36	16.75	16.45
Noroeste	41.56	38.46	34.22	33.15	32.58
Norte	69.19	63.15	56.16	54.76	54.14
Oeste	24.61	22.20	19.70	19.20	18.94
Oriental	39.08	35.74	32.26	31.52	30.98
Sur	66.18	64.55	59.98	59.14	59.09
Sureste	29.11	27.65	26.34	26.24	26.28
Suroeste	48.87	46.32	43.89	43.77	44.09
Total	673.27	622.49	556.48	540.89	534.14

Tabla 4.8 Requerimientos de Producción Usos Extractivos

Región	Escenario Potencial - MGD				
	2013	2015	2020	2025	2030
Centro Oriental	35.02	31.7	28.83	28.51	28.4
Cordillera Central	28.37	25.34	22.41	21.84	21.42
La Sierra	23.22	21.11	19.13	18.74	18.45
Metropolitana	248.33	227.69	199.96	193.73	192.46
Noreste	19.74	19.71	17.55	17.08	16.92
Noroeste	41.56	39.63	38.34	40.2	42.57
Norte	69.19	65.32	63.75	67.78	72.59
Oeste	24.61	22.25	19.86	19.48	19.32
Oriental	39.08	36.14	33.63	33.88	34.32
Sur	66.18	68.55	73.96	83.11	93.05
Sureste	29.11	30.45	36.15	43.06	50.1
Suroeste	48.87	56.6	79.88	105.47	131.49
Total	673.27	644.48	633.46	672.86	721.1

PLAN INTEGRAL DE RECURSOS DE AGUA
JUNIO, 2016

Tabla 4.9 Producción de Sistemas Non PRASA y de Auto Abasto No Agrícola, 2010 MGD

Región	Non PRASA	Residencial	Industrial	Termoeléctricas	Total
Centro Oriental	1.06	0.14	0.03	0.00	1.23
Cordillera Central	1.02	0.21	0.08	0.00	1.31
La Sierra	0.87	0.51	0.66	0.00	2.04
Metropolitana	0.58	0.19	0.59	0.00	1.36
Noreste	0.02	0.00	0.08	0.00	0.10
Noroeste	0.32	0.77	0.02	0.00	1.11
Norte	0.02	0.28	1.87	0.00	2.17
Oeste	0.12	0.20	0.00	0.00	0.32
Oriental	1.74	0.00	0.52	0.00	2.26
Sur	0.65	0.00	0.04	1.47	2.16
Sureste	0.36	0.00	0.41	0.96	1.73
Suroeste	0.28	0.12	0.00	0.00	0.40
Total	7.04	2.42	4.30	2.43	16.19

En términos del uso de agua del sector agropecuario, ver la Tabla 4.10, la región Norte es la que mayores requerimientos refleja, seguida por las regiones La Sierra y Sur. Finalmente, en las Tablas 4.11 y 4.12, se evidencia que el uso de agua para fines agronómicos es mayor en las tres regiones ubicadas en la Costa Sur.

Tabla 4.10 Proyecciones de Requerimientos de Producción Operaciones Agropecuarias

Región	Escenario Base - MGD				
	2013	2015	2020	2025	2030
Centro Oriental	0.37	0.37	0.38	0.38	0.39
Cordillera Central	0.85	0.85	0.87	0.88	0.89
La Sierra	1.24	1.24	1.25	1.26	1.27
Metropolitana	0.51	0.51	0.52	0.53	0.54
Noreste	0.21	0.21	0.22	0.23	0.23
Noroeste	0.99	1.00	1.02	1.04	1.05
Norte	2.91	2.93	2.98	3.02	3.07
Oeste	0.10	0.10	0.10	0.11	0.11
Oriental	0.87	0.87	0.89	0.91	0.93
Sur	1.09	1.10	1.11	1.12	1.13
Sureste	0.45	0.45	0.46	0.46	0.47
Suroeste	0.42	0.43	0.44	0.46	0.47
Total	10.02	10.08	10.23	10.38	10.54

PLAN INTEGRAL DE RECURSOS DE AGUA
JUNIO, 2016

Tabla 4.11 Proyecciones de Requerimientos de Producción Operaciones Agronómicas

Región	Escenario Base - MGD				
	2013	2015	2020	2025	2030
Centro Oriental	0.42	0.43	0.47	0.50	0.54
Cordillera Central	0.44	0.48	0.60	0.72	0.84
La Sierra	0.09	0.14	0.26	0.38	0.50
Metropolitana	1.27	1.30	1.37	1.44	1.51
Noreste	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04
Noroeste	2.77	2.81	2.91	3.01	3.12
Norte	3.23	3.40	3.82	4.24	4.66
Oeste	0.00	0.04	0.12	0.21	0.30
Oriental	0.87	0.91	1.00	1.10	1.19
Sur	17.83	18.13	18.88	19.63	20.38
Sureste	11.37	11.50	11.84	12.18	12.51
Suroeste	20.13	20.45	21.26	22.06	22.87
Total	58.43	59.61	62.55	65.50	68.44

Tabla 4.12 Proyecciones de Requerimientos de Producción Operaciones Agronómicas

Región	Escenario Potencial - MGD				
	2013	2015	2020	2025	2030
Centro Oriental	0.42	0.61	1.09	1.57	2.05
Cordillera Central	0.44	0.49	0.63	0.76	0.90
La Sierra	0.09	0.15	0.28	0.42	0.55
Metropolitana	1.27	2.19	4.47	6.75	9.03
Noreste	0.01	0.07	0.21	0.36	0.50
Noroeste	2.77	3.98	7.02	10.06	13.10
Norte	3.23	5.57	11.42	17.26	23.11
Oeste	0.00	0.08	0.28	0.49	0.69
Oriental	0.87	1.30	2.38	3.45	4.53
Sur	17.83	22.13	32.86	43.60	54.33
Sureste	11.37	14.31	21.65	28.99	36.34
Suroeste	20.13	30.74	57.24	83.75	110.26
Total	58.43	81.60	139.54	197.47	255.40

4.4.3 Metodología

Los balances de disponibilidad para cada región de planificación se computan al comparar los requerimientos de producción estimados y proyectados contra el rendimiento seguro de las fuentes de abasto y contra la capacidad de tratamiento de las instalaciones existentes. Estos presupuestos de agua, en cada una de las regiones de planificación, serán la base para identificar las áreas geográficas donde se proyectan problemas de deficiencias en la disponibilidad del recurso y para elaborar estrategias de desarrollo y conservación del recurso.

Criterios de diseño de sistemas de abasto de agua potable

Debido a los impactos económicos adversos y disloques sociales ocasionados por la falta del agua, los sistemas de abasto doméstico e industriales deben proveer un alto nivel de confianza para evitar tener que interrumpir el servicio, aún en períodos de sequía. El estándar de diseño para abastos domésticos e industriales es de un 99 por ciento de confianza. El cumplimiento con este criterio conlleva proveer un servicio donde no haya racionamiento en más de 36 días en cada década.

El rendimiento seguro de una fuente de abasto se define como la cantidad de agua que puede ser extraída de forma confiable durante períodos de sequía. En el caso de tomas de ríos y otras corrientes superficiales, por norma general, el mismo se computa ordenando una serie histórica de datos de flujo promedio diario para estimar el valor que excede el 99 por ciento del conjunto de datos (Q99). No obstante, el flujo disponible para abasto de agua será aquel que excede las necesidades ambientales del ecosistema acuático (caudal ecológico), el que, dependiendo de las condiciones del lugar, podrá ser mayor al Q99. Sin embargo, hay muchos sitios en la Isla donde las tomas y los embalses desvían la totalidad del flujo, sin mantener un flujo ambiental aguas abajo.

El rendimiento seguro de los embalses se define como la razón de extracción que puede sostenerse durante un evento histórico de sequía extrema, sin que sea necesario racionar el agua por más de un por ciento (1%) de los días. Los valores de rendimiento seguro de embalses deberían considerar mantener un caudal ambiental, aguas abajo de la presa con el objetivo de preservar los ecosistemas acuáticos. La mayoría de los embalses al presente no mantienen un flujo ambiental aguas abajo.

El rendimiento seguro de un acuífero se define como la cantidad de agua que puede ser extraída, sin que se produzca un deterioro a largo plazo en la calidad y caudal del mismo. Su valor está determinado por las características físicas particulares de las formaciones geológicas que lo componen y las fuentes de recarga que lo alimentan. En los acuíferos costeros el caudal disponible

está muy relacionado a la configuración y operación del sistema de extracción del agua. La explotación sostenible del agua subterránea siempre requiere una razón de bombeo inferior a la totalidad de la recarga, pero en los acuíferos costeros, los cuales contienen agua salobre en adición al agua dulce, la tasa de extracción sostenible es menor que la recarga porque siempre tiene que mantener flujo hacia el mar para evitar el proceso de la intrusión salina.

Para propósitos de este análisis, la disponibilidad de agua potable está limitada por los siguientes factores:

1. El rendimiento seguro de las fuentes de abasto (ríos, embalses y acuíferos) es la cantidad del recurso que podría ser extraído durante una sequía extrema. Algunos usuarios extraen una cantidad de agua muy superior al rendimiento seguro de sus fuentes. Esto puede tener el efecto de dificultades para abastecerse de agua durante una sequía, aún de intensidad mediana.
2. La capacidad de tratamiento y distribución de los sistemas existentes cuya fuente de abasto cuenta con agua suficiente pero la capacidad del sistema no provee para aprovechar la misma. En estos casos, la ampliación de la instalación es una opción para atender limitaciones de abasto. Algunas plantas producen una cantidad de agua que supera la capacidad de diseño de la misma. En estos casos, sólo se considera como disponibilidad la capacidad de diseño ya que la producción sobre esta cantidad plantea un posible deterioro de la calidad del agua tratada.
3. La disponibilidad regional que aporta una fuente de abasto en particular, será ajustada por las transferencias interregionales estructurales definidas por la AAA en su Plan Maestro del 2014. Las mismas se resumen en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13 Transferencias Estructurales entre Regiones de Planificación Definidas por la AAA

Procedencia	Región		Volumen (MGD)	
	Receptora	Planta de Filtración	2013	2015-2030
Noreste	Metropolitana	El Yunque	0.6	0.6
Metropolitana	Centro Oriental	Guaynabo	8.0	15.4
Metropolitana	Oriental	Guaynabo	3.2	0.0
Norte	Metropolitana	Superacueducto	66.2	63.8
Suroeste	La Sierra	Farallon (Carite)	7.0	7.0

Fuente: Plan Maestro AAA 2014

Producción máxima vs. Producción promedio

El diseño de los sistemas de abasto requiere evaluar el patrón de uso del agua durante las distintas horas del día. Los sistemas de abasto domésticos experimentan una demanda pico en las horas de la mañana y la tarde. En áreas con una capacidad inadecuada de almacenaje, el diseño de los sistemas de abasto se realiza a base de la demanda pico, mientras que en áreas con buena capacidad de almacenaje el diseño responde a la demanda promedio.

No obstante, para propósitos de análisis de disponibilidad del recurso la variable a evaluar es la producción promedio. Independientemente de los picos de producción requeridos para satisfacer las necesidades en momentos específicos al final del día, la cantidad total del recurso extraída de la fuente (Q) será equivalente a la demanda promedio. En sistemas que se alimentan de embalses, acuíferos o tomas superficiales que alimentan un tanque, la diferencia entre los requerimientos de producción pico y producción promedio no afectan el análisis de disponibilidad. En sistemas que se alimentan de tomas superficiales sin que medie el beneficio de un tanque de almacenaje, el requerimiento de producción pico es el parámetro a comparar contra el rendimiento seguro de la fuente para asegurar que no se afecte el uso ambiental del recurso agua.

4.4.4 Estrategias Recomendadas

La configuración de estrategias para el desarrollo de los recursos de agua se fundamenta en los siguientes principios rectores:

1. Lograr un uso y aprovechamiento eficiente del recurso.
 - a. En esta dirección se recomiendan estrategias dirigidas a:
 - b. Reducir las pérdidas que experimentan los sistemas de producción y distribución del recurso a niveles aceptables por la comunidad científica internacional.
 - c. Diseño de programas de manejo de demanda en los que se disminuyan la presión de desarrollo adicional del recurso.
2. Gerencia eficiente de los activos físicos, administrados por los diversos actores sociales que intervienen en el proceso de manejo de los recursos de agua, asegurando que se provea y de prioridad a la reparación y mantenimiento de los mismos.

- a. Diseño de métodos eficientes de distribución del recurso en los que se garantice una capacidad de almacenaje de al menos 24 horas de uso.
 - b. Asegurar la optimización de infraestructura existente antes de proponer el desarrollo de nuevas fuentes de abasto.
3. Asegurar el rendimiento e integridad de las fuentes del recurso evitando la degradación de las fuentes de abasto que sostienen la disponibilidad actual.
- a. Se recomiendan acciones dirigidas a:
 - b. Identificar los caudales ambientales necesarios para preservar la integridad de los ecosistemas y asegurar su mantenimiento.
 - c. Evitar que se continúen deteriorando los acuíferos del sur que están en situación crítica.
4. Proveer para cubrir con confiabilidad los requerimientos de producción de todos los sectores de usuarios del recurso.
- a. Respecto a este principio proponemos:
 - b. Atender los déficits en la disponibilidad del recurso en zonas particulares, tomado en consideración las existentes limitaciones para el desarrollo de nuevas fuentes de abasto.
 - c. Diseñar una programación de obras eficiente, fundamentada en la reducción de costos, que permita una estructura de financiamiento de la inversión que sea asumible por el Gobierno del Estado Libre Asociado de Puerto Rico en estos momentos.

4.5. Conclusiones y Recomendaciones

Luego de realizar el análisis de disponibilidad para cada una de las Regiones de planificación hemos identificado las siguientes situaciones que requieren de intervención y desarrollo de política pública por parte de las agencias encargadas del manejo de los recursos de agua en Puerto Rico:

4.5.1 Manejo Ineficiente del Recurso

El aprovechamiento eficiente del recurso reduce la necesidad de desarrollo de nuevas fuentes de abasto, evitando los costos sociales y ambientales asociados a proyectos de aumento en producción (extracción). El manejo ineficiente del recurso se evidencia en indicadores como el alto nivel de agua no facturada en los sistemas de distribución de la AAA, los canales de riego, el deterioro de pozos y sistemas de extracción en desuso, la improvisación y problemas de diseño en los sistemas de distribución.

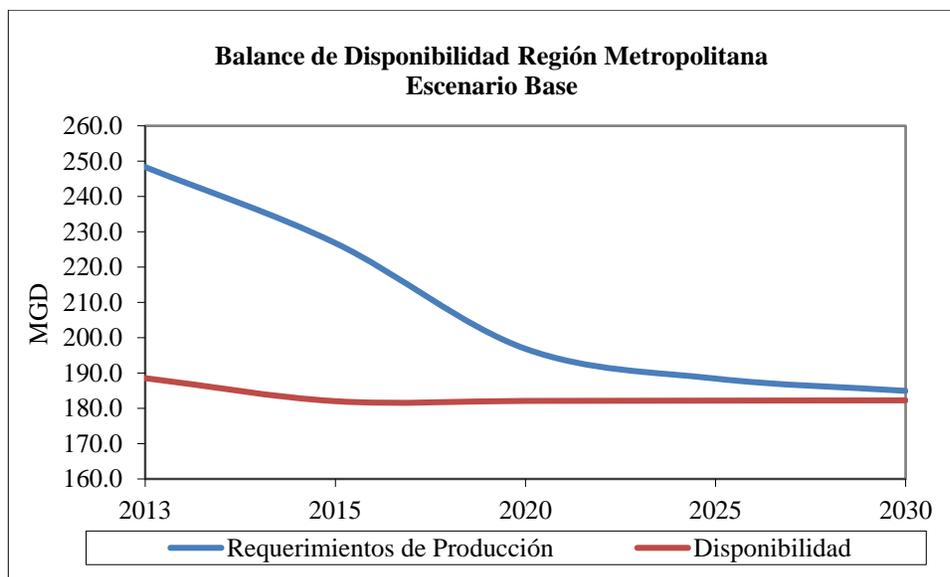
Para atender estos asuntos, se recomiendan una serie de estrategias transversales a ser implantadas en todas las Regiones de Planificación. Entre estas podemos mencionar las siguientes:

1. Reducir las pérdidas que experimentan los sistemas de producción y distribución del recurso a niveles aceptables por la comunidad científica internacional.
2. Diseño de programas de manejo de demanda en los que se disminuyan la presión de desarrollo adicional del recurso.
3. Gerencia eficiente de los activos físicos, administrados por los diversos actores sociales que intervienen en el proceso de manejo de los recursos de agua, asegurando que se provea y se asigne prioridad a la reparación y mantenimiento de los mismos.
4. Diseño de métodos eficientes de distribución del recurso en los que se garantice una capacidad de almacenaje de al menos 24 horas de uso.
5. Asegurar la optimización de la infraestructura existente antes de proponer el desarrollo de nuevas fuentes de abasto.
6. Desarrollar un Plan de Manejo de Sequía a nivel nacional, dando énfasis a las regiones donde se proyecta un déficit en la disponibilidad de agua, siendo éstas la Metropolitana, la Centro Oriental, y las regiones donde se encuentran municipios donde la única fuente de agua potable son los acuíferos, siendo estas la Sur y Sureste.

4.5.2 Deficiencias en la Disponibilidad del Recurso

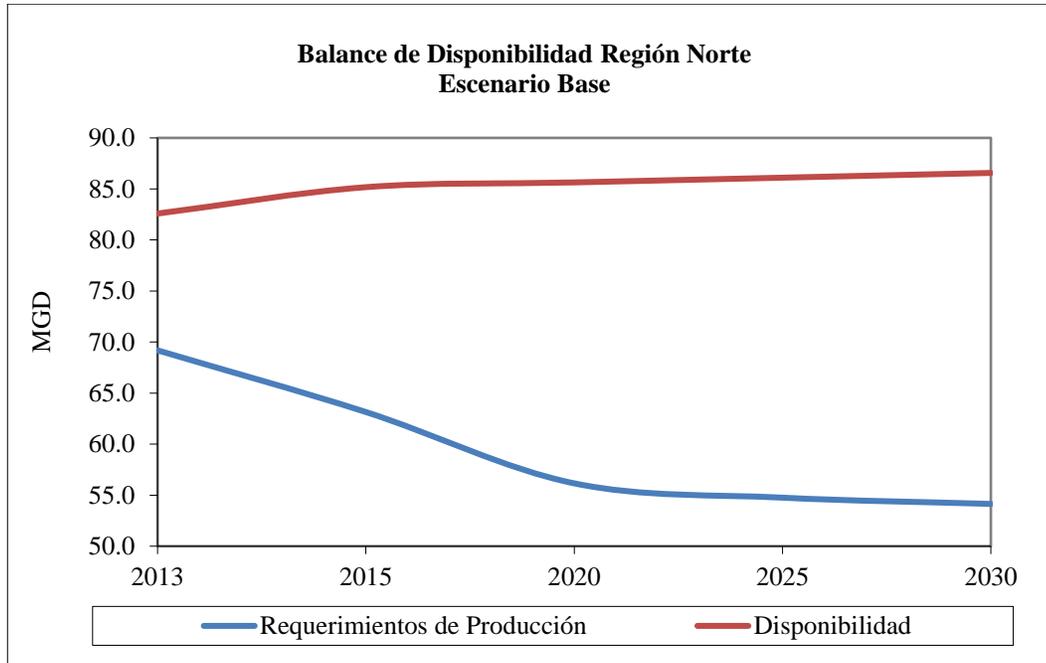
4.5.2.1 Regiones Metropolitana, Norte, Noreste, Oriental y La Sierra

La Región Metropolitana es la que presenta una situación más crítica, en términos de deficiencias en disponibilidad del recurso. En ellas se registran deficiencias de abasto que perduran durante la totalidad del período de análisis, a pesar de la disminución esperada en el nivel poblacional y la implantación de un programa de reducción de pérdidas, vease Gráfica 4.10. No obstante, las regiones Norte, Noreste, Oriental y La Sierra, Gráficas 4.11, 4.12, 4.13 y 4.14, reflejan superávit en disponibilidad que podrían ser utilizados para cubrir deficiencias en regiones aledañas.

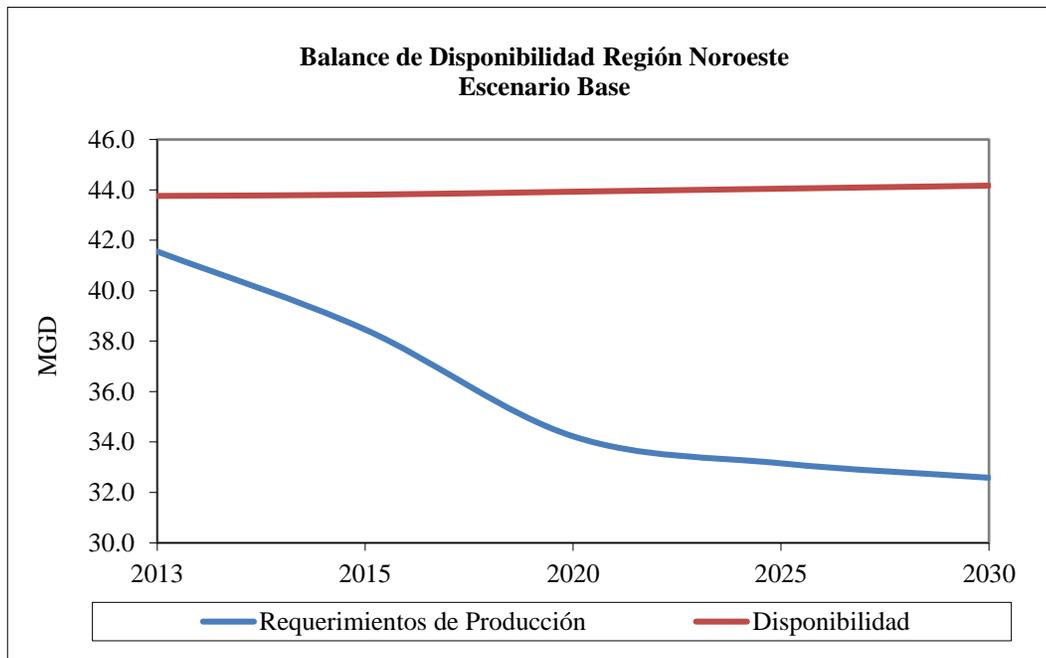


Gráfica 4.10 Balance de Disponibilidad Región Metropolitana Escenario Base

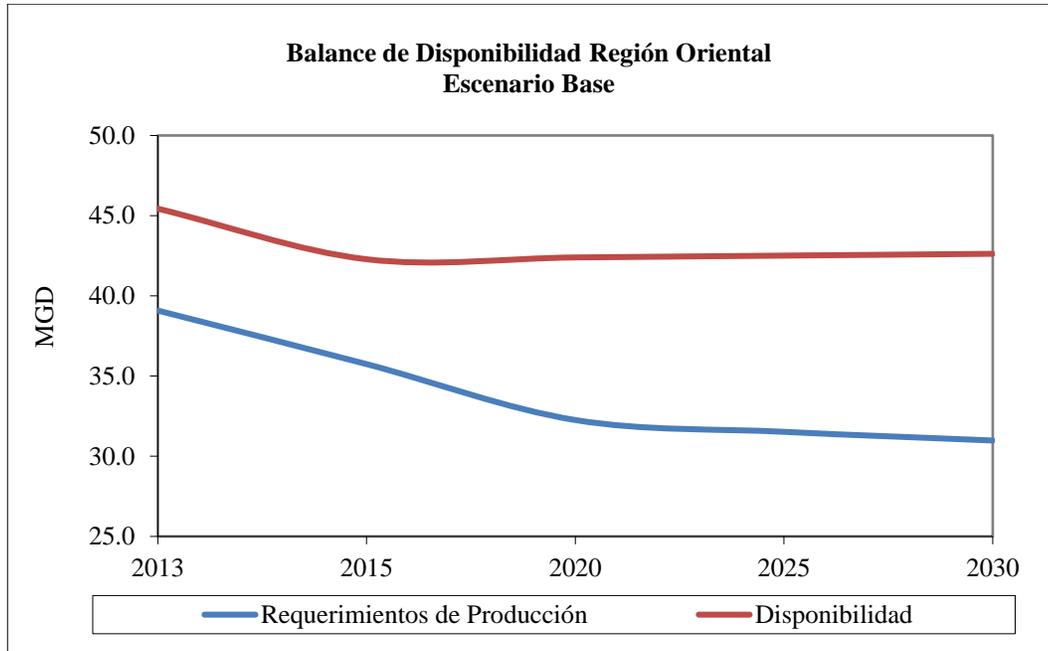
Los exedentes de las regiones Norte y Noreste pueden ser transferidos a la región Metropolitana. Sin embargo, habría que asegurar la existencia de conexiones hidráulicas efectivas entre ellas. Para que los exedentes de la Región Oriental puedan ser utilizados para cubrir el déficit de la Región Centro Oriental habría que extender un tramo de la tubería de distribución que actualmente lleva agua desde el SACN hasta el área de Juncos para llegue hasta el embalse Blanco y pueda ser utilizado para dirigir aguas de ese embalse hacia la Región Centro Oriental. Las transferencias de los exedentes de la Región La Sierra son más limitadas y se deben circunscribir a atender situaciones en sectores aislados de regiones aledañas. La alimentación de barrios altos de Caguas desde la planta de filtración Farrallón es un ejemplo.



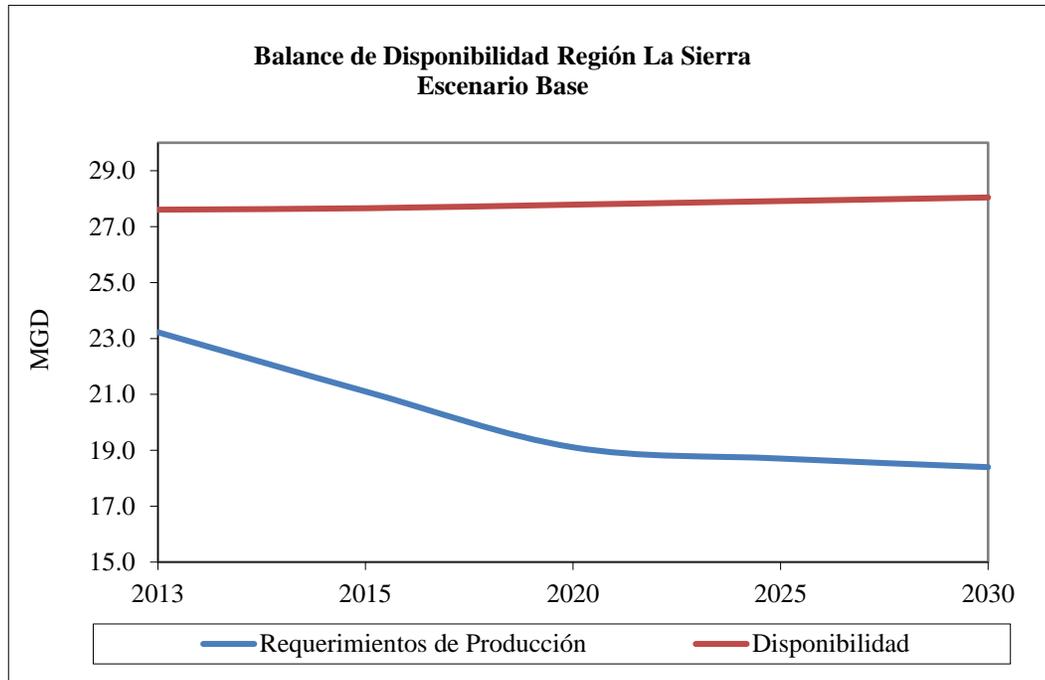
Gráfica 4.11 Balance de Disponibilidad Región Norte Escenario Base



Gráfica 4.12 Balance de Disponibilidad Región Noreste Escenario Base



Gráfica 4.13 Balance de Disponibilidad Región Oriental Escenario Base



Gráfica 4.14 Balance de Disponibilidad Región La Sierra Escenario Base

Del análisis anterior se desprenden las siguientes conclusiones y recomendaciones para la Región Metropolitana:

1. Dar prioridad y tratar de acelerar la implantación del programa de reducción de pérdidas en esta Región.
2. Evaluar el potencial de extracción de aguas subterráneas adicionales en los acuíferos aluviales de la Región Metropolitana, Centro Oriental así como del acuífero cárstico de la Costa Norte.
3. Asegurar la transferencia de cualquier aumento en la producción del SACN para satisfacer las necesidades de agua de la Región Metropolitana ante un cuadro de sequía extrema.
4. Establecer los mecanismos para que los superávits en disponibilidad de la Región Noreste y Norte sean transferidos a la Región Metropolitana.
5. Buscar alternativas para cubrir las deficiencias en disponibilidad de la Región Centro Oriental que actualmente se cubren mediante las transferencias de las plantas de Los Filtros y del SACN.
6. Elaborar un Plan de Manejo de Sequía para la Región y establecer un programa de mantenimiento a los pozos de emergencia de la AAA que asegure su disponibilidad en la eventualidad de una sequía extrema.

La situación de déficit en la disponibilidad del recurso en la Región Metropolitana, bajo condiciones de sequía, fue reconocido por la AAA en el documento “PRASA’s Metro Region Water Resources Management Plan”, donde estiman el mismo en -61.1 MGD. Para atender el mismo, evaluaron una serie de escenarios, para aumentar el abasto, en las regiones Metro, Norte y Este y hacerlas disponibles para cubrir el déficit en la Región Metropolitana. La alternativa que se entiende provee el abasto necesario para cubrir el déficit proyectado, al menor costo, es una que incluye los siguientes componentes, desglosados en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14 Alternativa Propuesta por la AAA para cubrir Deficit Proyectado en la Región Metro

Descripción del Componente	Abasto Adicional MGD	Costo de Inversión Millones
Extracción de agua subterránea adicional		
Región Este	1.70	0.00
Región Metro	5.28	0.15
Región Norte	10.00	0.71
Subtotal agua subterránea	16.98	0.86
Utilización efluentes de planta sanitaria Enrique Ortega		
	5.00	6.24
Reducción de perdidas		
Región Este	5.80	3.87
Región Metro	37.40	26.00
Subtotal reducción de perdidas	43.20	29.87
Mejoras a sistemas de transmisión		
Rehabilitación de tuberías de 48" y 66"	N/A	42.63
Rehabilitación de estación de bombeo de Puerto Nuevo	N/A	63.20
Totales	65.18	142.80

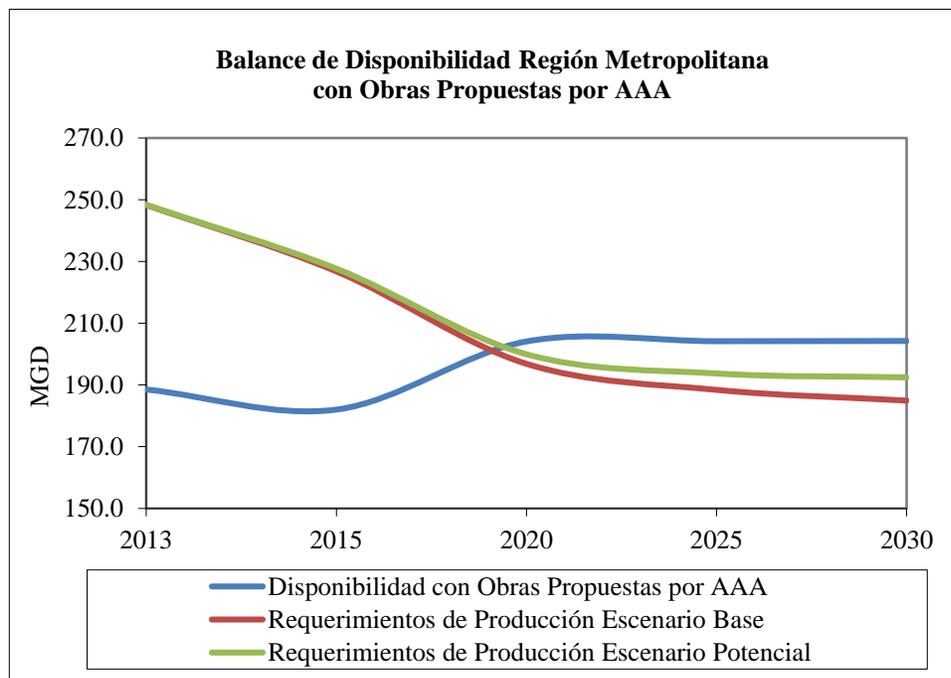
Fuente: PRASA Metro Region Water Resources Management Plan

En el contexto de nuestro análisis de disponibilidad, las obras propuestas por la AAA proveerían 17 MGD de abasto adicional de aguas subterráneas y 5 MGD por en el incremento en el rendimiento seguro del embalse La Plata. Se estima que estas obras podrían estar disponibles para el año 2020.

Como se puede observar en la Tabla 4.15 y la Gráfica 4.15, de materializarse la alternativa de obras propuestas por la AAA, los déficits en la disponibilidad del recurso, para tanto el escenario base como el potencial, serían superados en el año 2020.

Tabla 4.15 Balance de Disponibilidad Región Metropolitana con Obras Propuestas por AAA

	2013	2015	2020	2025	2030
Disponibilidad	188.55	182.02	204.1	204.18	204.26
Requerimientos de Producción Escenario Base	248.33	226.81	196.87	188.42	184.94
Requerimientos de Producción Escenario Potencial	248.33	227.69	199.96	193.73	192.46
Superávit/Déficit Escenario Base	-59.78	-44.79	7.23	15.76	19.31
Superávit/Déficit Escenario Potencial	-59.78	-45.67	4.14	10.45	11.79



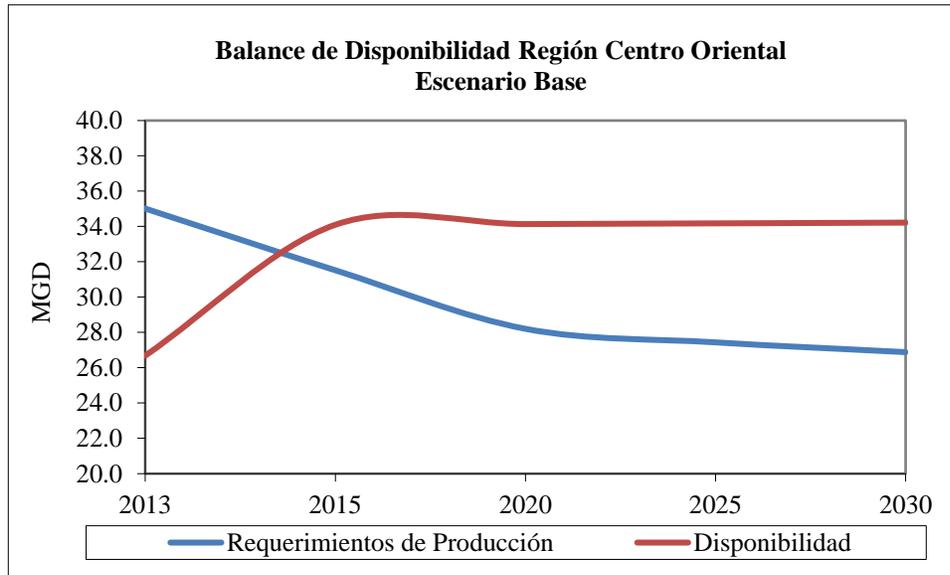
Gráfica 4.15 Balance de Disponibilidad Región Metropolitana con Obras Propuestas por AAA

Finalmente, las regiones Metropolitana y Centro Oriental requerirán de intervenciones más agresivas en la implantación de las estrategias transversales de los proyectos de control de pérdidas, elaboración de planes de sequía, desarrollo de almacenaje en tanques y manejo eficiente de activos físicos.

4.5.2.2 Región Centro Oriental

La Región Centro Oriental, Gráfica 4.16, durante el año 2013, recibió una transferencia de 8 MGD desde la Región Metropolitana. A partir del 2015, la AAA planifica aumentar dicha transferencia

hasta 15.4 MGD. Bajo las premisas de este escenario, la Región Centro Oriental, presenta una situación deficitaria, a corto plazo, que se subsana, a partir del 2015, al aumentarse la transferencia que recibe de la Región Metropolitana. De no ser por estas transferencias, la Región Centro Oriental experimentaría un déficit estructural, que perduraría por la totalidad del periodo de análisis.



Gráfica 4.16 Balance de Disponibilidad Región Centro Oriental Escenario Base

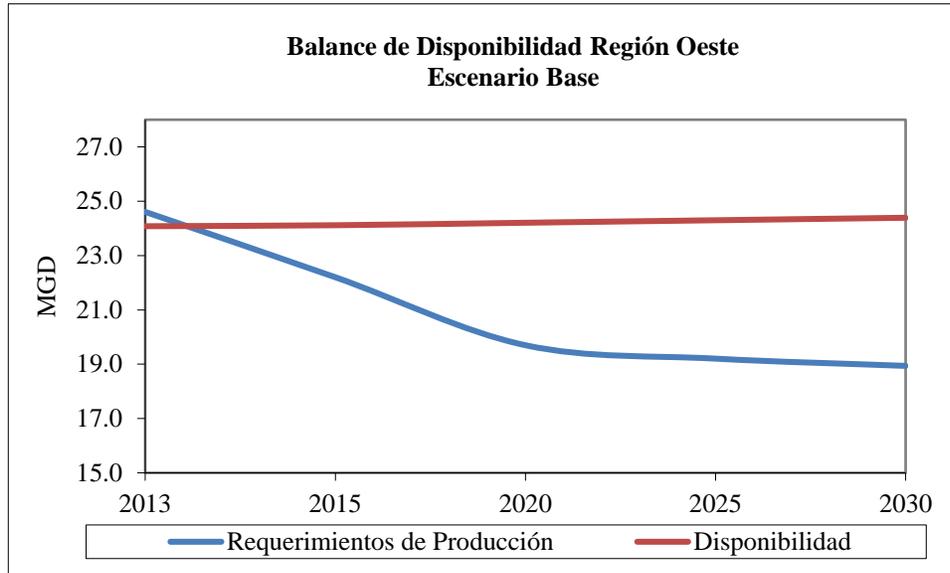
Es importante destacar que el amplio déficit que enfrenta la Región Centro Oriental, en épocas de sequía, no permite garantizar las transferencias de la Planta Los Filtros y del Superacueducto de la Costa Norte que actualmente se realizan hacia las Regiones Centro Oriental y Oriental.

Del análisis anterior se desprenden las siguientes conclusiones y recomendaciones para la Región Centro Oriental:

1. Dar prioridad y tratar de acelerar la implantación del programa de reducción de pérdidas en esta Región.
2. Establecer los mecanismos para que los superávits en disponibilidad de la Región Oriental sean transferidos a la Región Centro Oriental.
3. Elaborar un Plan de Manejo de Sequía para la Región Centro Oriental y establecer un programa de mantenimiento a los pozos de emergencia de la AAA que asegure su disponibilidad en la eventualidad de una sequía extrema.
4. Evaluar el potencial de extracción de agua subterránea adicional en la Región.

4.5.2.3 Regiones Oeste y Cordillera Central

Por su parte, las regiones Oeste y la Cordillera, Gráficas 4.17 y 4.18, se registran déficits a corto plazo que se resuelven materializándose la merma poblacional y por la implantación de un programa conservador de control de pérdidas.

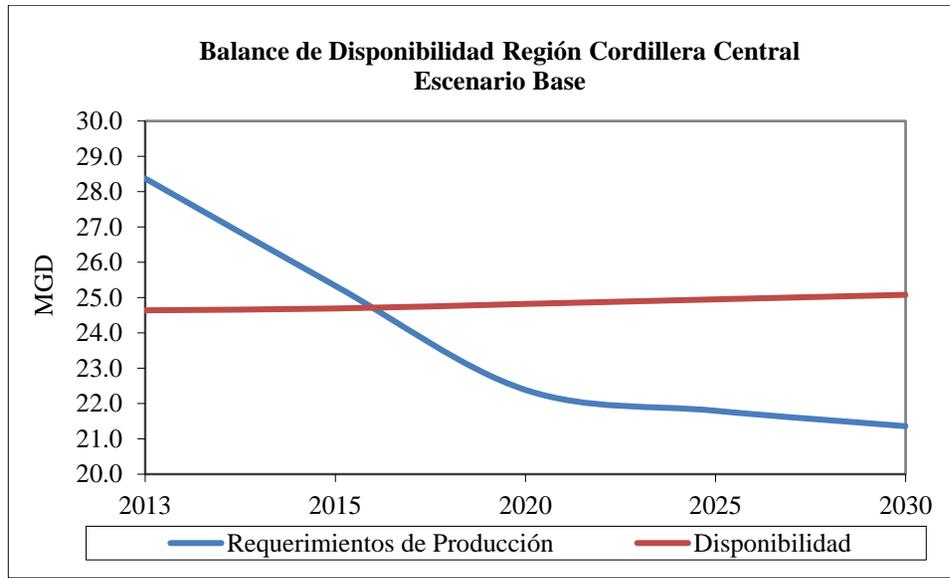


Gráfica 4.17 Balance de Disponibilidad Región Oeste Escenario Base

Existe un conflicto potencial entre el uso de agua de los sectores domésticos y agrícolas con los requerimientos estéticos y ambientales en el Río Grande de Añasco, en la región Oeste. La franquicia de extracción otorgada por el DRNA para la toma en el Río Grande de Añasco que alimenta la planta Miradero, establece que la misma está condicionada a que se mantenga un caudal en el río de 20 MGD, en todo momento, para salvaguardar las funciones ambientales del ecosistema. El rendimiento seguro (Q99) del río en este punto fue estimado en 42.4 MGD, lo que implica que, bajo condiciones de sequía, la extracción máxima permitida en este punto del Río Grande de Añasco no podrá ser mayor de 22.2 MGD. Lo que arroja un incremento neto en la disponibilidad en condiciones de sequía de tan solo 2.2 MGD.

La Región de la Cordillera Central se ubica en el interior montañoso del País. La zona es una de altos niveles de precipitación y de difícil acceso. Cubrir las deficiencias de abasto proyectadas para la Región, mediante el desarrollo de nuevas fuentes superficiales, implicaría grandes inversiones de fondos en múltiples sistemas de poca capacidad de producción.

Para atender los posibles déficit en disponibilidad de esta Región se recomienda promover la utilización de cisternas para recoger la lluvia de los techos como una alternativa para complementar el abasto de la AAA. Este acercamiento se limita a ser implantado en las áreas húmedas de Puerto Rico, particularmente en las zonas rurales. Estos sistemas han sido utilizados y ha demostrado ser efectivo por siglos en islas secas, como son las Islas Vírgenes.

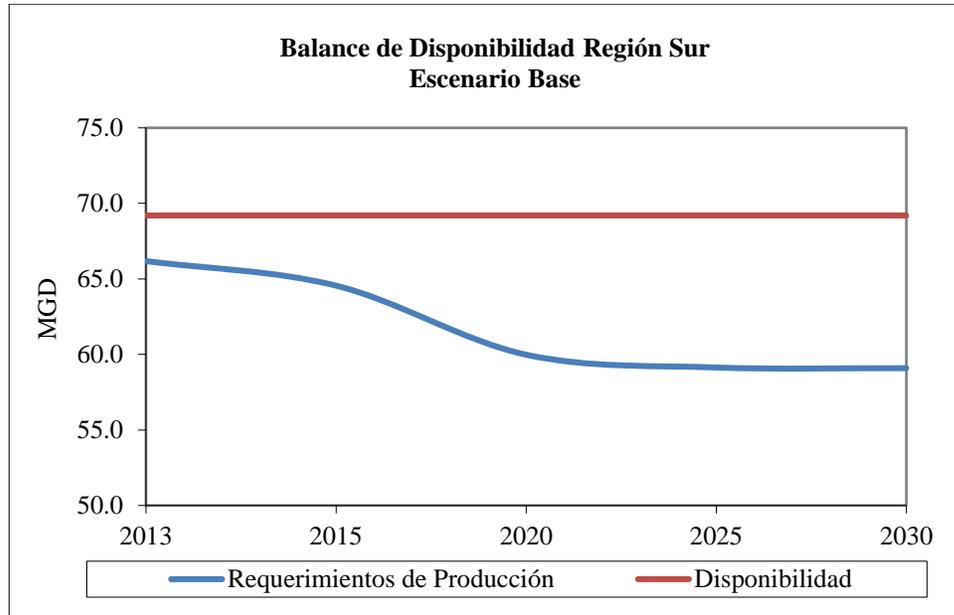


Gráfica 4.18 Balance de Disponibilidad Región Cordillera Central Escenario Base

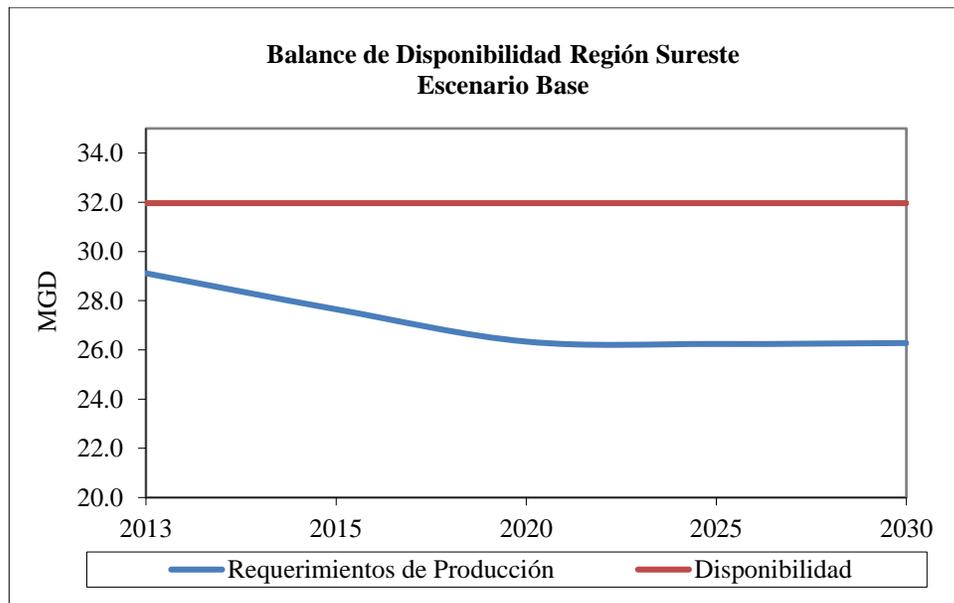
4.5.2.4 Regiones Sur y Sureste

Las regiones Sur y Sureste, Gráficas 4.19 y 4.20, presentan balances de disponibilidad regionales con superavits bajo el escenario base. No obstante, en estas regiones se observan situaciones deficitarias que se limitan a áreas de servicio particulares, que son servidas exclusivamente de pozos y no están conectadas a los sistemas de abasto regional. En los análisis de disponibilidad de cada una de estas regiones se incluyen estrategias dirigidas a la recuperación de los acuíferos de la zona (ver sección 5.4.2 del apéndice 3 de disponibilidad regional) entre las que se encuentran:

1. Limitar la extracción de aguas subterráneas al 73% de su ritmo actual.
2. Desarrollar proyectos de recarga artificial en los acuíferos de la zona.



Gráfica 4.19 Balance de Disponibilidad Región Sur Escenario Base



Gráfica 4.20 Balance de Disponibilidad Región Sureste Escenario Base

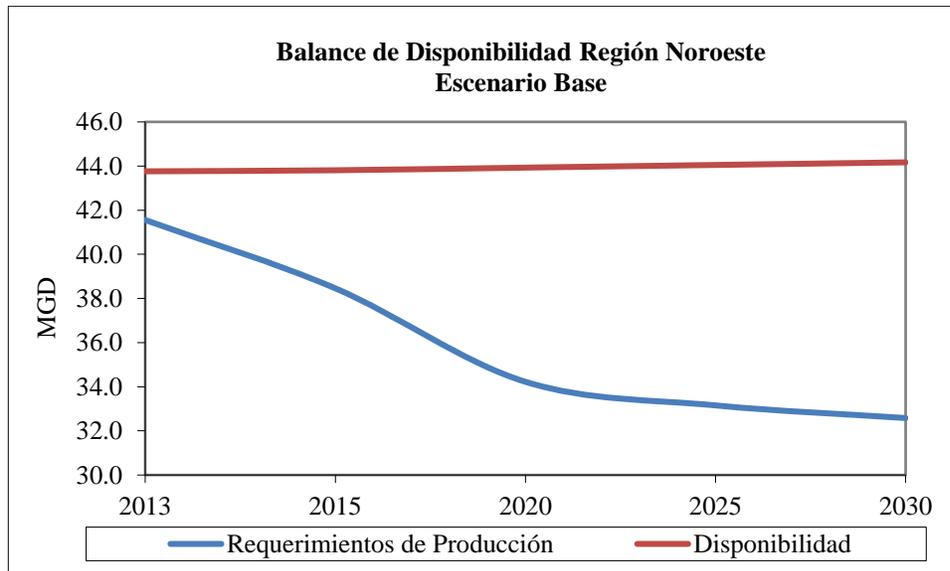
4.5.3 Limitaciones para Aprovechar el Potencial Agrícola

Aunque las regiones Noroeste, Suroeste, Sur y Sureste presentan balances positivos bajo el Escenario Base, al evaluarse bajo el Escenario Potencial, se registran deficiencias significativas en las que se configuran posibles conflictos de uso entre los sectores doméstico y agrícola.

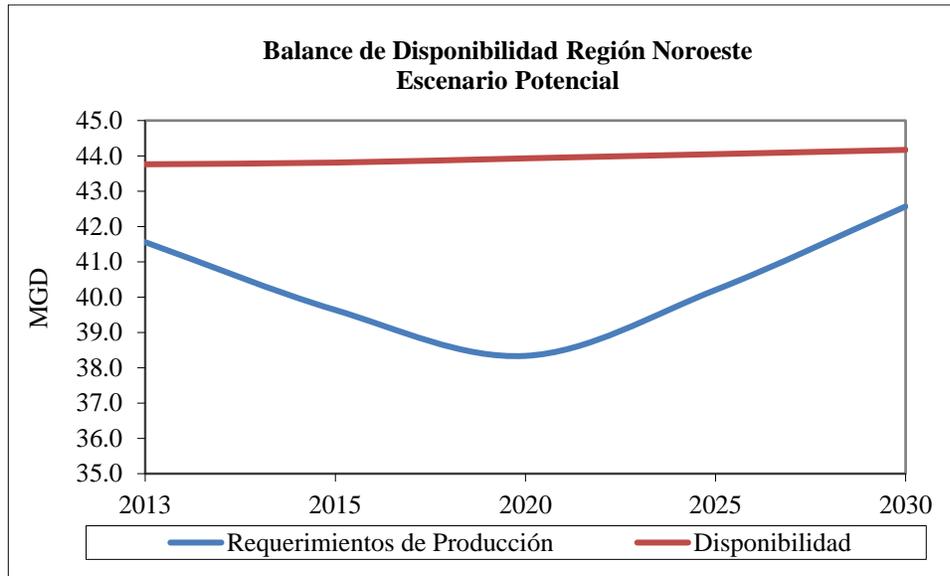
4.5.3.1 Región Noroeste

Del análisis de disponibilidad en la Región Noroeste, Gráficas 4.21 y 4.22, se desprenden las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1. De no atenderse el asunto del mantenimiento de los canales del sistema de riego de Isabela y corregir las pérdidas en el sistema de distribución de la AAA, se vislumbran conflictos de usos entre los sectores agrícola y municipal en la región. De no lograrse estas mejoras, la cantidad disponible del recurso podría no ser suficiente para satisfacer las necesidades totales de ambas actividades durante épocas de sequía extrema.
2. Por otra parte, existe un conflicto potencial entre el uso de agua de los sectores domésticos y agrícolas con los requerimientos estéticos y ambientales en el río Culebrinas. La franquicia de extracción otorgada por el DRNA para el río Culebrinas establece que la misma está condicionada a que se mantenga un caudal en el río de 17 MGD, en todo momento, para salvaguardar las funciones ambientales del ecosistema. El rendimiento seguro (Q99) del río en este punto fue estimado en 17.1 MGD por el DRNA, lo que implica que, bajo condiciones de sequía, la extracción máxima permitida en el río Culebrinas no podrá ser mayor de 0.1 MGD.



Gráfica 4.21 Balance de Disponibilidad Región Noroeste Escenario Base



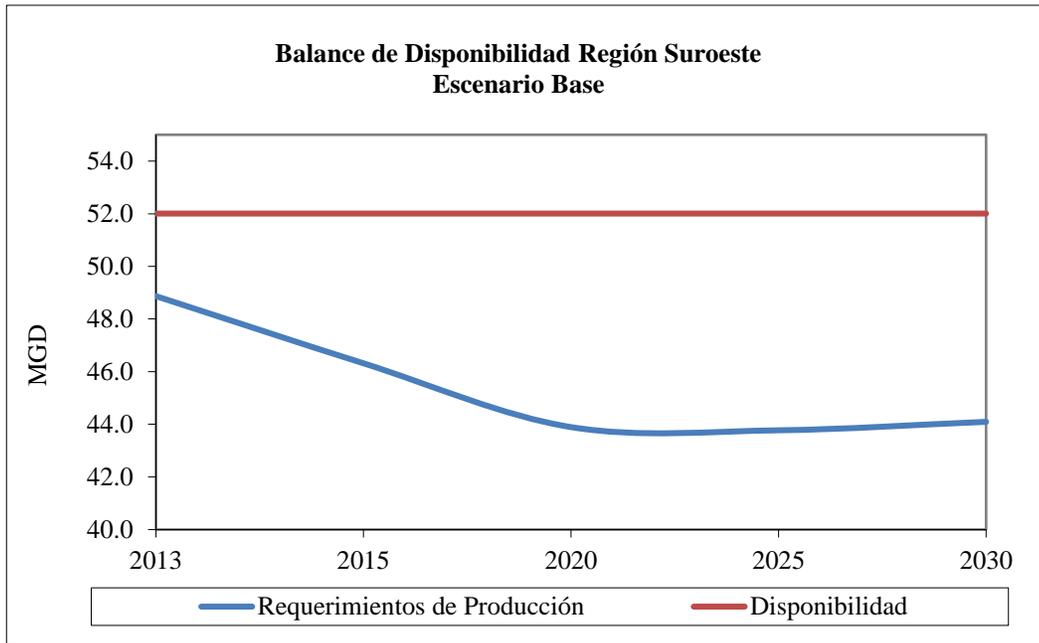
Gráfica 4.22 Balance de Disponibilidad Región Noroeste Escenario Potencial

4.5.3.2 Región Suroeste

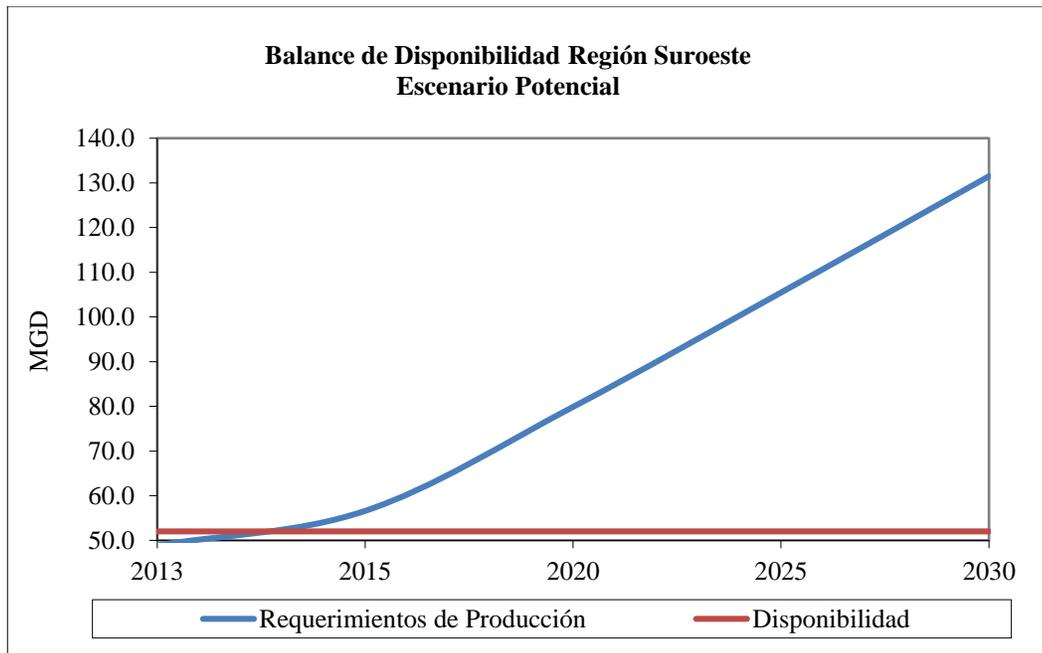
Los siguientes proyectos han sido identificados para aumentar la disponibilidad del recurso de la Región Suroeste, Gráficas 4.23 y 4.24:

1. Dragado de los embalses Yahuecas y Prieto.
2. Optimización de la operación del SRVL para maximizar la producción de agua mediante la creación de un lago de almacenaje al norte del canal de riego, según propuesto por la AAA.
3. Dar prioridad a la implantación de un programa de reducción de pérdidas en esta Región.

Estos proyectos aumentarán el rendimiento seguro del SRVL de 34.5 MGD a 43.8 MGD, lo que implica un incremento de 9.3 MGD en el mismo conforme a los estudios de la AAA. El desarrollo de estas obras podría ser utilizado para satisfacer la demanda agrícola de agua presente y futura en la Región, cumplir con los requerimientos de caudales mínimos ambientales de la Laguna Cartagena y aprovechar la totalidad de la capacidad de diseño de las plantas de filtración operadas por la AAA.



Gráfica 4.23 Balance de Disponibilidad Región Suroeste Escenario Base



Gráfica 4.24 Balance de Disponibilidad Región Suroeste Escenario Potencial

Para esta Región también se recomienda la elaboración de un Plan de Manejo de Sequía que incluya estrategias para el cultivo de plantas que puedan adaptarse rápidamente a períodos de sequía frecuentes e intensos, típicos de la zona.

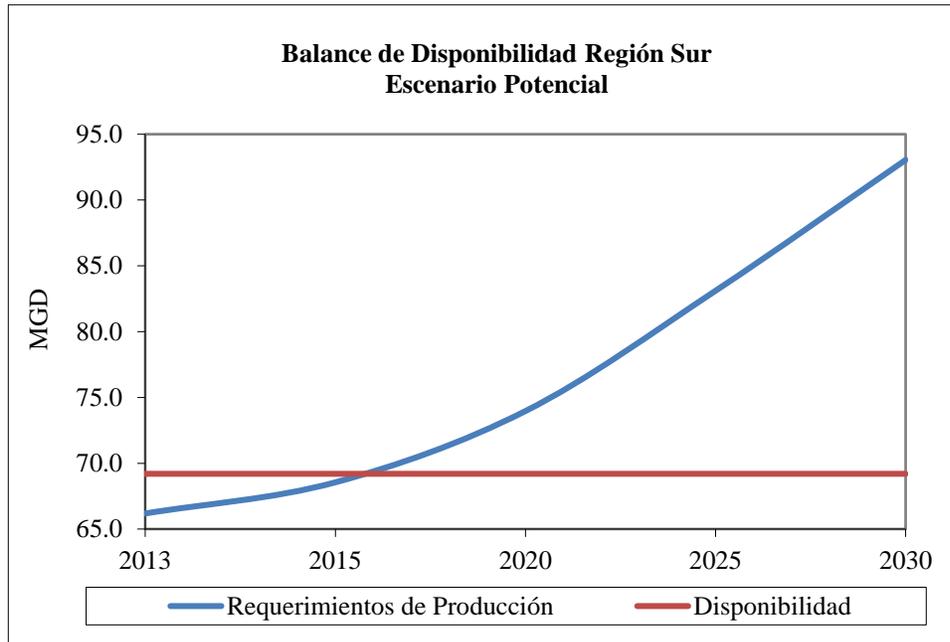
4.5.3.3 Región Sur

De no tomarse medidas, en la Región Sur, Gráfica 4.25, para limitar la producción de los pozos a un nivel que no supere el rendimiento seguro de la fuente, es de esperar que se profundice el proceso de degradación de los acuíferos del área, hasta llegar a un punto en el que colapse el sistema y el agua que se extraiga no sea apta para el consumo humano ni para ser utilizada en actividades agrícolas. De materializarse el colapso del sistema de acuíferos de la zona, la única manera de poder satisfacer las demandas de agua proyectadas, para los diversos usuarios del recurso, sería mediante la construcción de un costoso sistema de obras de infraestructura de alcance regional. El mismo implicaría recurrir a transferencias de agua de fuentes lejanas y el desarrollo de un extenso sistema de transmisión de aguas para servir a la agricultura y los demás sectores.

Para atender las limitaciones en disponibilidad para cubrir las expectativas de crecimiento del sector agrícola, así como para atender los requerimientos del sector doméstico cuya única fuente de abasto son los pozos de la AAA, se proponen las siguientes acciones en esta región:

1. Desarrollar un proyecto de recarga artificial del acuífero del área de Santa Isabel a partir del agua disponible en el embalse Coamo. Este proyecto utilizará tramos de un antiguo canal de riego que en la actualidad está en desuso. Además, incorporará elementos que permitan canalizar parte de la expansión proyectada para el sector agrícola de la zona.
2. Diseñar un programa de incentivos y apoyo técnico a los agricultores de Juana Díaz y Santa Isabel para fomentar la disminución en el uso de agua subterránea y lograr que realicen los ajustes necesarios para cambiar su fuente de abasto a fuentes superficiales
3. Elaborar un Plan de Manejo de Sequía para la Región el cual incluya estrategias de cultivos que puedan adaptarse rápidamente a cambios climáticos “normales” como las sequías. El sector agrícola debe desarrollar sistemas (“dual”) que puedan aprovechar aguas del sistema de riego y aguas de los acuíferos y aprovechar al máximo las aguas superficiales en épocas de abundancia (que sabemos que su disponibilidad en épocas de abundancia es superior al rendimiento seguro) y dejar que los acuíferos se recarguen para cuando llega la época de sequía, en la que se aprovecharían esos recursos subterráneos almacenados.

4. La AAA debe asignar prioridad a la implantación de un programa de reducción de pérdidas en esta Región debido a la real escasez del recurso agua en la zona y lo degradado que se encuentra a consecuencia de la sobreexplotación de éste por los usuarios principales: la AAA y los agricultores.



Gráfica 4.25 Balance de Disponibilidad Región Sur Escenario Potencial

4.5.3.4 Región Sureste

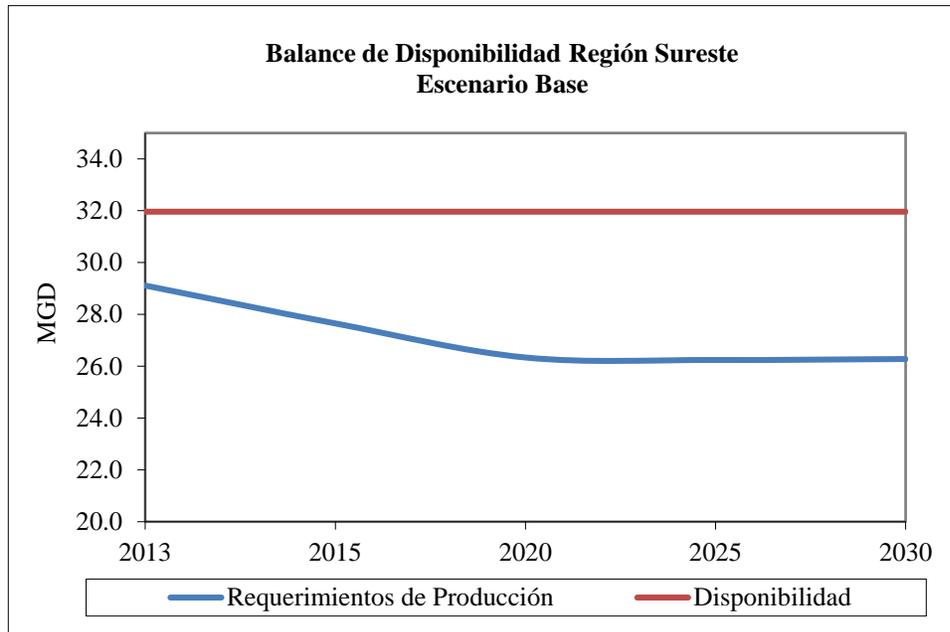
El análisis de disponibilidad para la región Sureste, Gráfica 4.26, plantea la configuración de un conflicto de uso entre el sector servido por la AAA y las expectativas de crecimiento del sector agrícola en la región Patillas – Salinas a partir del año 2015.

Para solucionar el conflicto de uso planteado en esta región, recomendamos las siguientes estrategias para el desarrollo de los recursos de agua de la región:

1. Utilizar el exceso de agua disponible en el sistema de riego de Patillas-Guamaní, para desarrollar varios proyectos de recarga artificial de acuíferos en áreas estratégicas para la recarga del acuífero de Salinas.
2. Desarrollar un proyecto de uso conjunto de aguas subterráneas y superficiales que permita aumentar la producción de agua de las plantas de filtración de Patillas y Guayama (ambas

servidas de los embalses Patillas y Carite respectivamente) durante periodos húmedos, conservando opción de aumentar la extracción de aguas subterráneas en épocas de sequía.

3. Desarrollar un proyecto para la optimización de la operación del complejo de embalses Patillas – Carite para maximizar su producción de agua.



Gráfica 4.26 Balance de Disponibilidad Región Sureste Escenario Base

La implantación efectiva de estas estrategias podría evitar comprometer los recursos de agua que requiere el sector agrícola para usos domésticos de forma permanente. Además, daría tiempo para evaluar si la expansión de la planta de filtración Patillas es realmente necesaria.

Para esta Región también se recomienda elaborar un Plan de Manejo de Sequía para la misma, aunado con las estrategias para solucionar el conflicto de uso planteado en la región, para evitar la sobreexplotación a la que actualmente se someten los acuíferos de la zona.

A pesar de estas medidas, es muy probable que la disponibilidad del recurso no sea suficiente para cubrir los requerimientos del Escenario Potencial en las regiones Sur, Sureste, Suroeste y Noreste de la Isla. En este caso, habrá que diseñar una estrategia de siembra que se concentre en cultivos de menor requerimiento de riego. Además, habrá que invertir en sistemas de riego innovadores que minimicen el uso del recurso.

4.5.4 Conflictos con el ambiente

4.5.4.1 Plantas operando en exceso del rendimiento seguro

En términos de conflictos con el ambiente, observamos extracciones en exceso del rendimiento seguro de sus fuentes de abasto en la mayoría de las plantas de filtración pequeñas, que opera la AAA en los municipios del interior montañoso del País. Esta situación se manifiesta en mayor magnitud en el análisis de disponibilidad realizado para la región de la Cordillera Central. Existen limitaciones presupuestarias para cubrir las deficiencias de abasto proyectadas para la Región, mediante el desarrollo de nuevas fuentes superficiales, debido a sus altos costos y limitada producción. Para atender los déficit en disponibilidad de estas zonas se recomienda promover la utilización de cisternas para recoger la lluvia de los techos como una alternativa que complemente el abasto de la AAA.

Por otra parte, existen fuertes presiones para aumentar los niveles de producción en plantas de filtración de mayor tamaño como las de Culebrinas, El Yunque y Miradero, entre otras. En estos casos, el DRNA ha establecido el mecanismo de franquicias variables, donde se establece un caudal mínimo que debe fluir en el río en todo momento. En épocas de mayor flujo se permite extraer cantidades que exceden este límite. Es necesario establecer mecanismos que garanticen el cumplimiento con los requisitos de estas franquicias.

4.5.4.2 Sobre explotación de los Acuíferos del Sur

La demanda de agua y los requerimientos de producción, de los diversos sectores que utilizan aguas subterráneas en las regiones Sur y Sureste, son satisfechos mediante la sobre explotación de los acuíferos de la zona. De no tomarse medidas para limitar la producción de los pozos a un nivel que no supere el rendimiento seguro de la fuente, es de esperar que se profundice el proceso de degradación de los acuíferos del área, hasta llegar a un punto en el que colapse y el agua que se extraiga no sea apta para el consumo humano ni para ser utilizada en actividades agrícolas. De ocurrir este proceso de deterioro en los acuíferos de la zona, se experimentarían grandes pérdidas económicas y ambientales. De materializarse el colapso del sistema de acuíferos de la zona, la única manera de poder satisfacer las demandas de agua proyectadas, para los diversos usuarios del recurso, sería mediante la construcción de un costoso sistema de obras de infraestructura de alcance regional. El mismo implicaría recurrir a transferencias de agua de fuentes lejanas y el desarrollo de un extenso sistema de transmisión de aguas crudas y tratadas.

4.5.5 Impacto del cambio climático sobre disponibilidad de agua potable

Entre los efectos más notables del calentamiento global se encuentran cambios climáticos donde:

1. Aumenta el nivel promedio del mar, provocando erosión costanera y un movimiento de la zona marítimo terrestre hacia el interior.
2. Se agudizan los extremos del ciclo hidrológico, por lo que se espera que se registren sequías recurrentes más intensas y prolongadas, así como un incremento en eventos de alta precipitación con potencial de causar daños catastróficos.

El impacto combinado de estas transformaciones climáticas se traducirá en una disminución en el potencial de extracción sustentable de agua en todas las fuentes del recurso.

1. El rendimiento seguro de ríos y quebradas se reducirá al registrarse sequías más intensas que disminuyen el flujo base que discurre en las corrientes superficiales, disminuyéndose así los niveles de caudales mínimos disponible para abasto de agua en estos eventos.
2. El rendimiento seguro de los embalses también se verá afectado por el impacto combinado de una disminución en la entrada de agua durante épocas de sequía y el efecto de la pérdida de capacidad de almacenaje, que se espera ocurra al acelerarse el proceso de sedimentación de embalses, debido a mayores tasas de erosión de terrenos durante los eventos de alta precipitación magnificados por el cambio climático.
3. En el caso de las aguas subterráneas, se espera una disminución en el rendimiento seguro de los acuíferos costaneros debido a la interacción de los siguientes factores:
 - a. Una merma en la recarga debido a la disminución de precipitación en épocas húmedas y menor aun en los periodos de sequías.
 - b. Una menor infiltración de escorrentías superficiales, en zonas de recarga de acuíferos, durante periodos de alta precipitación, producto de las mayores velocidades de flujo que se generan al aumentar la intensidad de estos eventos.
 - c. Una disminución en la extensión productiva del acuífero al reducirse su capacidad por motivo del movimiento esperado en la cuña de agua salina que se producirá al desplazarse la línea de costa hacia el interior de la Isla.

4.5.5.1 Retos para la planificación y administración del recurso agua

El aumento en la escasez relativa del abasto de agua, que está ocurriendo por motivo de los impactos del calentamiento global, impone una serie de retos sociales que deben ser enfrentados de forma ingeniosa por todos los sectores afectados. Las soluciones propuestas no deben verse como una agenda a largo plazo para atender problemas que podrían ocurrir en un futuro lejano. Todo lo contrario, representan acciones urgentes que deben ser trabajadas con premura. Estas son medidas dirigidas a atender problemas existentes que se espera se agudicen con el avance del proceso del calentamiento global y podrían representar la única oportunidad para garantizar el disfrute de nuestros recursos de agua a las generaciones futuras.

Entre los desafíos que se nos plantean se encuentran los siguientes:

4.5.5.1.1 Implantar programas continuos de investigación científica en el área de recursos de agua

Ante las perspectivas planteadas por el calentamiento global, se torna prioritario el diseño y manejo adecuado de los sistemas y fuentes de abasto del recurso para asegurar el servicio durante sequías extremas. A estos efectos, se requiere información actualizada de una serie de parámetros hídricos, ambientales y socioeconómicos. Además, existen serias limitaciones en cuanto a la disponibilidad de datos esenciales para el análisis hidrogeológico, especialmente en el área de las aguas subterráneas, lo que plantea la necesidad de desarrollar trabajo de campo para levantar datos pertinentes al análisis. Por otra parte, la planificación y toma de decisiones respecto al recurso, debe estar apoyada por la capacidad de realizar análisis y estudios e investigaciones técnicas complejas. En esta tarea es imprescindible incorporar los adelantos en la tecnología de informática, particularmente los desarrollos ocurridos en los sistemas de información geográfica y las capacidades de modelaje hidrológico.

En esta dirección se recomiendan las siguientes actividades:

1. Fortalecer los trabajos del Banco de Datos Hidrológicos del DRNA.
2. Ampliar la red de pozos de monitoria de niveles y calidad de agua subterránea.
3. Desarrollar y mantener modelos matemáticos de simulación hidrológica para apoyar investigaciones, diseños y la administración del recurso, entre los que se encuentran los siguientes:

- a. Modelos operacionales de explotación de agua subterránea
- b. Modelos de optimización de producción de sistemas multiobjetivos
- c. Desarrollo de Planes de manejo de sequía basados en criterios hidrológicos

4.5.5.1.2 Instaurar innovaciones tecnológicas y mejorar la eficiencia operacional de las agencias encargadas de la planificación y administración del recurso

El aumento en la escasez impone retos para aumentar la eficiencia, implantar adelantos tecnológicos y ser riguroso en el diseño y operación de sistemas de abasto. No hay margen para la improvisación, se requiere implantar medidas novedosas e ingeniosas.

Entre las estrategias a implantar se encuentran:

1. Atender de forma proactiva el problema del agua no contabilizada y minimizar las pérdidas de sistema de distribución.
2. Optimización de sistemas de distribución de agua potable mediante técnicas de regulación de presiones, sectorización y utilización de equipos de telemetría.
3. Implantar sistemas computadorizados de manejo y mantenimiento de facilidades basados en modelos de optimización de redes utilizando sistemas geográficos de información.
4. Elaborar planes operacionales para el uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas de forma que se maximice el rendimiento de las fuentes.
5. Evaluar opciones de interconexión de sistemas regionales para aumentar el rendimiento en épocas de sequía.

4.5.5.1.3 Atender la agudización de conflictos de uso del recurso

Otro reto que plantea el aumento en la escasez, sobre la planificación y manejo de recursos de agua, es la agudización de conflictos por el uso del agua. A continuación, se discuten implicaciones para los principales sectores usuarios del recurso:

Sector Ambiental vs. Usos Extractivos

En Puerto Rico el principal conflicto respecto al uso de los recursos de agua, ocurre entre el abasto doméstico y las necesidades para usos recreativos, estéticos y ambientales. La disponibilidad de agua para estos usos ha disminuido debido a la creciente extracción para suplir sistemas de abasto doméstico. Esta situación se manifiesta en problemas tales como:

1. Intrusión salina en acuíferos costaneros
2. Caudales ambientales inadecuados
3. Deterioro de la integridad de los ecosistemas ribereños
4. Impedimentos a los procesos de migración de las especies acuáticas
5. Aumento en la concentración de contaminantes

Entre los proyectos que recomendados para atender este asunto podemos señalar los siguientes:

1. Modelar los requerimientos de caudales ambientales en las principales cuencas y desarrollar estrategias para asegurar el flujo ecológico y la protección de rutas migratorias de especies nativas.
2. Desarrollar programas de educación ambiental, centrados en el concepto de manejo de cuenca, que genere cambios de actitudes en las comunidades sobre la forma de valorar los servicios que proveen los recursos de agua y los ecosistemas asociados a éstos y que las comunidades creen conciencia sobre la necesidad de movilizarse para conservarlos.
3. Desarrollar proyectos dirigidos a la configuración de corredores riparios y la creación de corredores biológicos que integren las diversas reservas naturales/forestales/refugios de vida silvestre del País.
4. Diseñar e implantar medidas estructurales y no estructurales para la protección de las áreas de recarga de acuíferos.

Sector Agrícola vs. Doméstico

La disminución histórica en el uso de agua para propósitos agrícolas ha generado un margen de disponibilidad que ha sido aprovechado para propósitos domésticos. Al presente, el agua disponible

es suficiente para satisfacer las demandas de ambos sectores. No obstante, de haber un aumento en la actividad agrícola, que aproveche el potencial total de las tierras disponibles, se puede desarrollar un conflicto entre usuarios que compiten por la misma fuente del recurso ya que la AAA se ha conectado a los Sistemas de Riego de Agrícola del País los cuales están comprometidos para abasto doméstico en hasta el 95% de las descargas como es el caso del Sistema de Riego de Isabela. Las áreas que pueden presentar conflictos de uso en el futuro son las asociadas a los distritos de riego del Sur y del Valle de Lajas.

Para atender la situación ya recomendamos varias estrategias y proyectos que deberán ser implantados con celeridad.

4.5.5.1.4 Desarrollo de nuevas fuentes de abasto con características sustentables

En el desarrollo de nuevas fuentes de abasto, resulta crítico asegurar que su diseño permita minimizar los problemas que limitan su sostenibilidad.

Aguas Subterráneas

El diseño y operación de pozos debe responder a un plan de manejo de aguas subterráneas donde no se afecte la integridad del acuífero. La operación de los mismos debe estar basada en los resultados de modelos hidrológicos.

La extracción de agua subterránea debe configurarse a base de baterías de pozos de un relativo poco caudal, localizados alejados de la costa y a poca profundidad. La explotación de los pozos grandes debe ser sustituida por dos o más pozos de menor caudal, mejorando así la distribución de la extracción dentro del acuífero.

Tomas Superficiales

Las tomas superficiales, incluyendo los embalses, deben asegurar caudales ambientales que incluyan un flujo mínimo para mantener las funciones ambientales aguas debajo de las presas y represas. Su diseño debe minimizar el impacto sobre los hábitats y patrones migratorios de especies, así como reducir el efecto sobre el transporte de sedimentos gruesos, las arenas y gravas necesarios para mantener el lecho del río, y el equilibrio dinámico de los llanos y el litoral costero.

Referencias

- American Society of Civil Engineers. (1971). Urban Water Resources Management. Denver, Colorado.
- Autoridad de Acueductos y Alcantarillados. (2014). 4. Plan Estratégico 2014 – 2018. San Juan, Puerto Rico.
- _____. (2012 al 2015). Consulting Engineer's Reports.
- _____. (2013 y 2014). PRASA Audited Financial Statements.
- _____. (1946 al 2013). Bancos de Datos de Producción, Consumo y Facturación.
- _____. (2011). DIA, Acueducto del Sur. San Juan, Puerto Rico.
- _____. (1982). Water Supply Plan: North Coast Area. San Juan, Puerto Rico.
- _____. (1983). Island Wide Water Supply Implementation Plan. San Juan, PR. Santiago Vázquez Flaherty Giavara.
- _____. (1984). Public Water Supplies in Puerto Rico, 1983. San Juan, Puerto Rico.
- _____. (1984). Informe Anual Área de Operaciones. San Juan, PR.
- _____. (1991). Project Planning and Contract Management. San Juan, Puerto Rico.
- _____. (Junio, 2003). Plan maestro de recursos hídricos. San Juan, PR: ONDEO de Puerto Rico.
- _____. (1996). Estudio de Necesidad de Producción de Agua para Puerto Rico Hasta el Año 2050. San Juan, Puerto Rico.
- _____. (Diciembre, 2003). Plan maestro de acueductos. Tomos I-IV. San Juan, PR: ONDEO de Puerto Rico.
- _____. (Diciembre, 2003). Plan maestro de alcantarillados. San Juan, PR: ONDEO de Puerto Rico.
- _____. (2006). Plan de mejoras capitales a mediano plazo de la AAA. San Juan, PR. Área de Planificación.

_____. (2005). Viabilidad de aumentar el abasto de agua para usos domésticos y agrícolas en el Valle de Lajas. San Juan, PR. CSA Group.

Autoridad para el Financiamiento de la Infraestructura de Puerto Rico. (1984). Declaración de Impacto Ambiental Acueducto Regional del Noreste. San Juan, Puerto Rico.

_____. (2000). Water Audit & Conservation Pilot Study. San Juan, Puerto Rico.

_____. (2003). Acueducto Costa Norte. San Juan, Puerto Rico.

_____, (2005). Analysis of Potential Reservoirs in Puerto Rico (Draft). San Juan, PR. GLM & Associates.

Black & Veatch Engineers. (1977) Water supply study for entire Island of Puerto Rico except for Ponce region. Report to US Army Corps of Engineers, Jacksonville.

CDM Caribbean Engineers. (2004). PRASA Water Use Characteristics and Water Demand Model Calibration. Carbondale, Illinois.

_____. (2004). Technical Memorandum on Demographic Projections for PRASA Water Demand Forecast. Carbondale, Illinois.

Centro de Estudios Energéticos y Ambientales. (1987). Nueva estrategia para el desarrollo de los recursos de agua en Puerto Rico. San Juan, Puerto Rico.

_____. (1988). Evaluación de los recursos de agua disponibles para irrigación en el área del Proyecto de Biomasa de Aguirre. San Juan, Puerto Rico.

CSA, (2005). Viabilidad para Aumentar el Abasto de Agua para usos Domésticos y Agrícolas en el Valle de Lajas. San Juan, PR.

Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. (1980). Island Wide Water Supply Study for Puerto Rico. San Juan, PR.

Departamento de Agricultura. (2013). Plan de Seguridad Alimentaria. San Juan, PR.

Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. (1973). Water Resources Assessment for Puerto Rico. San Juan, PR: Área de Planificación de Recursos, División de Recursos de Agua.

_____. (1984). Plan de Recursos de Agua de Puerto Rico. (Borrador) San Juan, PR: Área de Planificación de Recursos, División de Recursos de Agua.

_____. (1986). Proyecciones de Demanda y Necesidades de Producción de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados. San Juan, PR: Área de Planificación de Recursos, División de Recursos de Agua.

_____. (1986). Proyección de la Demanda en la Planificación de los Recursos de Agua: Resumen Ejecutivo. San Juan, Puerto Rico.

_____. (1986). Estimación de la Demanda de Agua Municipal. San Juan, PR: Área de Planificación de Recursos, División de Recursos de Agua.

_____. (1986). Proyecciones de Demanda y Necesidades de Producción de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados. San Juan, Puerto Rico.

_____. (1987). Situación y perspectiva de la demanda y oferta de agua en Puerto Rico servida por la AAA (Borrador). San Juan, PR: Área de Planificación de Recursos, División de Recursos de Agua.

_____. (1988). Informe al gobernador sobre la situación y perspectiva de la demanda y oferta de agua en Puerto Rico servida por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados. San Juan, PR: Área de Planificación de Recursos, División de Recursos de Agua.

_____. (1996). Plan integral de conservación, uso y desarrollo de los recursos de agua de Puerto Rico. San Juan, PR: Oficina del Secretario.

_____. (2004). Inventario de recursos de agua de Puerto Rico (Borrador). San Juan, PR. Oficina del Plan de Aguas.

_____. (2004). Update of Puerto Rico Water Demand Forecast, Final Report. San Juan, Puerto Rico. CDM Caribbean Engineers P.S.C..

_____. (2004). Plan integral de los recursos de agua de Puerto Rico (Borrador). San Juan, PR. Oficina del Plan de Aguas.

Ebers, Randall W. (1990). Public Infrastructure and Regional Economic Development. Cleveland, Ohio.

Economic Development Administration U.S. Department of Commerce. (1997). Public Works Program Performance Evaluation. New Jersey.

Harty, Harry P. (1984). Guide to Setting Priorities for Capital Investment. The Urban Institute Press. Washington, DC.

Hill, S. (1996). Integrated Resource Planning and Management. Washington DC: Island Press.

Jeffcoate, Philip. (1987). The Reduction and Control of Unaccounted-for Water. The World Bank. Washington, D.C.

Junta de Planificación de Puerto Rico. (2015). Plan de Uso de Terrenos, San Juan, Puerto Rico.

_____. (2014). Informe Económico al Gobernador. San Juan, Puerto Rico.

_____. (2014). Proyecciones Económicas 2015 y 2016.

_____. (2013). Proyecciones de Población por Municipio para el periodo 2013 al 2030.

_____. (2013). Banco de Datos de Consultas de Ubicación. San Juan, Puerto Rico.

_____. (1980). Introducción a la Técnica de Beneficio-Costo. San Juan, Puerto Rico.

_____. (1995). Objetivos y Políticas del Plan de Usos de Terrenos de Puerto Rico. San Juan, PR: Área de Planificación Física.

_____. (2006). Borrador del Plan de Uso de Terrenos. San Juan, PR: Oficina del Plan de Uso de Terrenos de Puerto Rico.

López, T. del M., T. M Aide, & J. Thomlinson. (2001). Urban expansion and the loss of prime agricultural lands in Puerto Rico. Ambio 30: 49-54.

Maddaus, William O. (2001). Water Demand Management Within the Integrated Resource Planning Process. Sacramento, California.

Ministerio de Medio Ambiente. (2000). Programa Integrado de Gestión de la Demanda de Agua. Alicante, España.

Municipio de Rincón. (2002). Improvements to the Water Supply System of Jagüey, Atalaya and Calvache Barrios. Rincón, Puerto Rico.

Oficina del Gobernador. (2014). Plan de Recuperación Económica de Cuatro Años. San Juan, Puerto Rico.

ONU. (2005). Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo

Puerto Rico Aqueduct and Sewer Authority. General Statistics Information Bank 1946-1983. San Juan, Puerto Rico.

Puig, J.C., & Rodríguez, J.M., 1993, Ground-water resources of the Caguas-Juncos valley, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 91-4079, 52 p.

_____. (1994). Ponencia sobre proyecto de control de pérdidas. Revista del Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico, Segundo Trimestre 1994. San Juan, Puerto Rico.

Soler-López, Luis. 2007. "Sedimentation History of Lago Dos Bocas, Puerto Rico, 1942-2005." Scientific Investigations Report 2007-5053, USGS, San Juan.

Taller de Formación Política. (1996). El Agua en Puerto Rico: ¿Crisis de la naturaleza o crisis social? Centro Gráfico Grafito. Vega Alta, Puerto Rico.

Technical Consulting Group. (2004). Actualización del Inventario de Acueductos Independientes ("NON PRASA") en Puerto Rico. San Juan, Puerto Rico.

U.S. Army Corps of Engineers. (1980). Puerto Rico Islandwide Water Supply Study. San Juan, Puerto Rico.

_____. (1983). Prototypal Application of a Drought Management Optimization Procedure to an Urban Water Supply System. Springfield, Illinois.

United States Geological Survey. (1995 al 2010). Water Use Inventory. Guaynabo, Puerto Rico.

_____. (2014). Groundwater quality conditions of the South Coast Aquifer of Puerto Rico, Guaynabo, Puerto Rico.

- _____. (1968). Water Resources of the Juana Díaz Area, Puerto Rico. Guaynabo, Puerto Rico.
- _____. (1972). Water Resources of the Jobos Area, Puerto Rico. Guaynabo, Puerto Rico.
- _____. (1971). Water Resources of the Coamo Area, Puerto Rico. Guaynabo, Puerto Rico.
- _____. (1979). Water Budget and Hydraulic Aspects of Artificial Recharge, South Coast of Puerto Rico. Guaynabo, Puerto Rico.
- _____. (1987). Puerto Rico Ground-Water Quality. Guaynabo, Puerto Rico.
- _____. (1987). Planning Report for the Caribbean Islands Regional Aquifer-System Analysis Project. Guaynabo, Puerto Rico.
- _____. (2005). Estimate Water Use in Puerto Rico, 2000. San Juan, Puerto Rico.
- _____. (2005). Sedimentation Survey Results of the Principal Water-Supply Reservoirs of Puerto Rico. San Juan, Puerto Rico.
- United States Census Bureau. (2000). Censos del 1950 al 2010.
- _____. (2007). Censo de Agricultura de Puerto Rico.
- Universidad de Puerto Rico Recinto de Mayagüez. (2004). Estudio sobre el uso de agua agrícola en Puerto Rico. Mayagüez, PR. Instituto de Investigaciones sobre Recursos de Agua y el Ambiente de Puerto Rico.



PLAN INTEGRAL DE RECURSOS DE AGUA

CAPÍTULO 5

DIAGNÓSTICO DE PROBLEMAS Y OPCIONES DE MANEJO

RESUMEN

Este capítulo presenta un diagnóstico sobre la condición en que se encuentra el recurso agua en Puerto Rico. En éste también se presentan proyectos costo-efectivos para resolver los problemas prioritarios de manera sostenible.

TABLA DE CONTENIDO

5.1	Introducción	1
5.2	Abasto confiable del sector municipal	2
5.2.1	Racionamiento: frecuencia y severidad	2
5.2.2	Las causas del racionamiento	4
5.2.3	Relación volumen-rendimiento	7
5.2.4	La relación entre las pérdidas de agua y el racionamiento.....	9
5.2.5	Agua no-contabilizada en el sistema de la AAA	13
5.2.6	Recomendaciones – control de pérdidas AAA	14
5.2.7	Operación combinada para aumentar el rendimiento seguro	15
5.2.8	Desarrollo de nuevas fuentes de abasto de agua superficial	18
5.2.9	Pérdidas en los canales de riego	19
5.2.10	Recomendaciones – canales de riego	22
5.3	Sostenibilidad de los embalses existentes	23
5.3.1	Sedimentación y Rendimiento Seguro	23
5.3.2	Características de la sedimentación	23
5.3.3	Alternativas para el manejo de la sedimentación	28
5.3.4	Reducir el aporte de sedimentos	29
5.3.5	Alternativas para minimizar el depósito de sedimentos	34
5.3.6	Recuperar o aumentar el volumen del embalse.....	37
5.3.7	Remoción de sedimentos por dragado	37
5.3.8	Adaptación a la sedimentación.....	39
5.3.9	Prioridades de manejo de sedimentos.....	40
5.3.10	Recomendaciones	44

5.4 Aguas Subterráneas	45
5.4.1 Características de los acuíferos principales.....	45
5.4.2 La intrusión salina	47
5.4.3 Cambio en el balance de agua en la costa sur	49
5.4.4 Restauración del acuífero de Salinas.....	57
5.4.5 Restauración del acuífero de Santa Isabel	66
5.4.6 Monitoreo y manejo de los acuíferos	72
5.4.7 Contaminación del agua subterránea	74
5.5 Sostenibilidad de ecosistemas acuáticos	77
5.5.1 Fuentes de datos	77
5.5.2 Caudal ambiental	78
5.5.3 Sostener rutas migratorias	79
5.5.4 Sobrepesca y especies exóticas	83
5.6 Estabilidad de los cauces	85
5.6.1 Extracción en los cauces.....	85
5.6.2 Limpieza de cauces naturales	87
5.6.3 Recomendaciones	88
5.7 Contaminación de las aguas superficiales	88
5.7.1 Fuentes de datos	88
5.7.2 Calidad de las aguas	88
5.7.3 Fuentes de contaminación dispersas	92
5.7.4 Contaminación por fuentes puntuales	93
5.7.5 Recomendación.....	95
5.8 Uso y aprovechamiento eficiente del recurso	95
5.8.1 Conservación de agua por los consumidores residenciales	95
5.8.2 Indicador de uso del agua.....	96

5.9 Fuentes de agua no-convencionales	98
5.9.1 Reutilización de las aguas usadas municipales	98
5.9.2 Desalinización de aguas salinas y salobres	100
5.9.3 Cisternas para recoger agua de lluvia.....	102
5.10 Solución de conflictos de usos existentes y potenciales	104
5.11 Uso del terreno.....	104
5.12 Riesgos de inundaciones.....	106
5.12.1 Naturaleza de las inundaciones.....	106
5.12.2 Causas de las inundaciones	107
5.12.3 Estrategias para el control de las inundaciones.....	109
5.13 Referencias.....	111

5.1 Introducción

El propósito de este capítulo es identificar las deficiencias relacionadas con el manejo del recurso agua y las estrategias sostenibles para atender las mismas. En ese sentido, se persigue proteger y mejorar el ambiente a la vez que se toma en consideración la condición socioeconómica de Puerto Rico.

El diagnóstico que se presenta a continuación analiza los problemas principales que afectan el recurso agua en Puerto Rico y cuya atención se considera prioritaria. Para cada uno de ellos se identifican posibles acciones que los atienden, y en el Capítulo 6 se presentan las políticas públicas y objetivos para resolver cada uno de los problemas identificados. El proceso de identificación de problemas se fundamenta en el ámbito legal y conceptual descrito en el Capítulo 1. Del análisis realizado se pueden identificar tres problemas principales:

1. Manejo inadecuado de los sistemas de abastos de agua. El alto nivel de pérdidas de agua en los sistemas de distribución de agua potable de la AAA es el problema más relevante, ya que no permite suplir un abasto confiable del agua al País. Un ejemplo reciente que dramatiza esto fue el racionamiento de agua en el Área Metropolitana de San Juan (AMSJ) en el 2015 por más de 130 días. Este racionamiento ocurrió a pesar de haber hecho una inversión de casi \$600 millones entre el dragado del embalse Loíza y el proyecto del Superacueducto de la Costa Norte (SACN) a finales del siglo XX para tener redundancia en los sistemas de abasto de agua potable para el AMSJ. El proyecto del SACN aumentó la oferta de agua potable en 100 mgd. Ambos proyectos fueron desarrollados a raíz de la sequía del 1994 y su propósito fue eliminar los problemas de racionamiento en el AMSJ durante futuras sequías. Sin embargo, en el 2015 ocurrió el racionamiento más severo en la historia de la AAA, a pesar de tener el proyecto de SACN en operación. Por ende, el primer tema que trata este capítulo es presentar una estrategia práctica para resolver el problema de abasto doméstico para satisfacer la demanda de agua potable al AMSJ de forma confiable.
2. Explotación, subutilización y falta de información adecuada para el manejo de los acuíferos. Debido a la combinación de una reducción en la recarga junto con el aumento en la extracción por pozos del acuífero de la costa sur, los municipios de Santa Isabel y Salinas han sido declaradas como zonas de emergencia a consecuencia

- de la reducción en los niveles de agua en el acuífero, el avance de la intrusión salina y la contaminación por nitratos. Para la protección del acuífero, el DRNA ha requerido una reducción de 33% en el ritmo de extracción (bombeo) de los pozos activos de la AAA. En el caso de Salinas, el racionamiento impuesto en julio de 2015 a raíz de la reducción en bombeo persistió hasta abril de 2016. En contraste, los acuíferos de la costa norte se pueden caracterizar como sub-utilizados, a raíz del cierre de muchos pozos industriales y de los operados por la AAA una vez comenzó a operar el SACN. Es necesario implantar medidas de operación que optimicen el uso y aprovechamiento de las aguas subterráneas para aumentar la confiabilidad de las fuentes de abasto de agua potable en Puerto Rico.
3. Sedimentación de los embalses. Los embalses continúan perdiendo capacidad debido al problema de sedimentación. Hasta el momento no se ha implantado ninguna estrategia que se pueda considerar como una solución sostenible al problema. A pesar de que el embalse Loíza fue dragado en 1997, cuando se removieron 6 Mm³ de sedimento a un costo de \$60 millones, actualmente se ha perdido casi todo el volumen recuperado debido a la sedimentación acumulada. El dragado no se considera una medida sostenible para manejar la sedimentación por su alto costo y la falta de sitios para disponer de material de dragado. Con la tasa de sedimentación actual¹ en el embalse Loíza, sería necesario dragarlo cada 20 años para mantener su volumen estable. A pesar de que la sedimentación afecta todos los embalses de Puerto Rico, el problema es más severo en los embalses Loíza, Dos Bocas y así como en las represas aguas arriba al embalse Dos Bocas que aportan agua al SACN.

5.2 Abasto confiable del sector municipal

5.2.1 Racionamiento: frecuencia y severidad

La interrupción del suministro de agua municipal presenta consecuencias socioeconómicas muy adversas, afectando tanto los ingresos de la AAA como los usuarios. La AAA informó un aumento en los gastos de \$12-\$14 millones/mes durante la sequía para el acarreo de agua a los “oasis” y otras actividades relacionadas. Los usuarios se vieron obligados a comprar agua

¹ La tasa de sedimentación en el embalse Loíza es elevada debido a que: 1) el lago es pequeño en comparación a su influjo, y 2) por la alta carga de sedimentos que arrastran la mayoría de los ríos en Puerto Rico, incluyendo el río Grande de Loíza.

embotellada y cisternas para almacenar agua en sus negocios y residencias. Esto afectó la calidad de vida de la gente.

Debido al alto costo social y económico que representa la interrupción en el abasto del agua municipal, los sistemas de abasto se diseñan con un alto nivel de confiabilidad, frecuentemente con el objetivo de suplir agua el 99% del tiempo. Cuando el caudal de diseño no está disponible se implanta una reducción en la utilización del agua (racionamiento), pero siempre se mantiene el sistema de distribución presurizado. Por ejemplo, en el 2015 el estado de California ya estaba en su cuarto año de sequía severa y en respuesta, las áreas urbanas habían bajado su consumo de agua en un promedio de 27%, comparado con el año anterior². Sin embargo, en ningún momento se suspendió el servicio de agua a los usuarios domésticos. En contraste, la respuesta de la AAA a problemas de sequía es implantar niveles de racionamiento severos (véase la

Tabla 5.1). Los abonados que se sirven del embalse Loíza llegaron a la Fase de racionamiento #3 y los abonados del embalse De La Plata llegaron a la Fase #2.

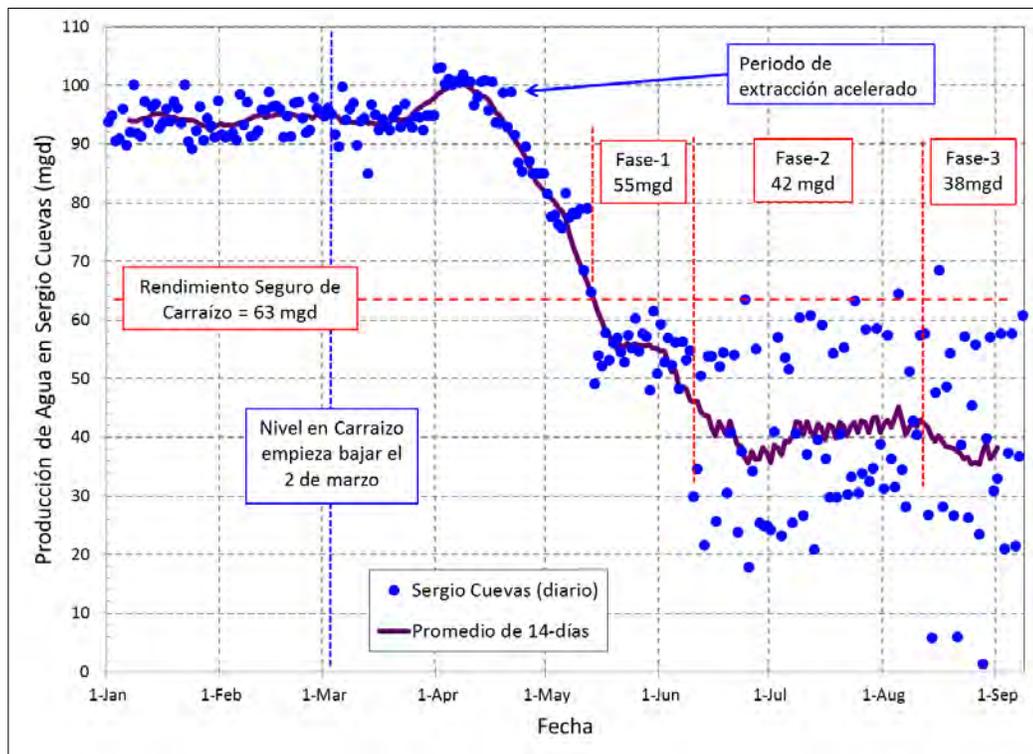
Los sistemas de abasto fallan en suplir su caudal de diseño cuando ocurren dos cosas: (1) ocurre una sequía más fuerte que el evento de diseño, o (2) se opera el sistema fuera de sus parámetros de diseño, por ejemplo, al mantener una tasa de extracción superior al rendimiento seguro de las fuentes de abasto. El racionamiento en el AMSJ en el 2015 fue atribuible al segundo problema – operación de los sistemas de abasto fuera de sus normas de diseño.

Tabla 5.1 Protocolos de Racionamiento de la AAA.

Fase de Racionamiento	Descripción
1	Un día sin agua, un día con agua (servicio en días alternos)
2	Dos días sin agua, un día con agua
3	Dos o 3 días sin agua, un día con agua (servicio de agua 2 días la semana)
4	Cuatro días sin agua, un día con agua
5	Al agotar todo el almacenaje, servir agua a la razón del caudal (“inflow”) hacia el embalse

² www.ca.gov/drouhght/accessed Obtenido el 15 de diciembre de 2015.

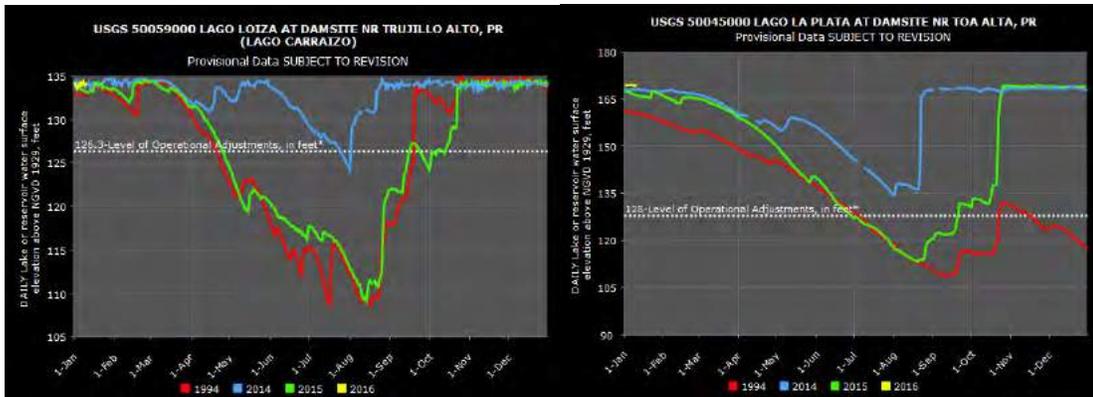
Los análisis de rendimiento seguro de los embalses en Puerto Rico, desarrollados por el DRNA, utilizan los siguientes criterios: (1) que el racionamiento no exceda el 1% de los días, y (2) en los días con racionamiento el consumo de agua se debe reducir un 30%, pero nunca se debe suspender el servicio. Según esta metodología, el rendimiento seguro del embalse Loíza fue calculado en 63 mgd. Sin embargo, la producción de agua durante el 2015 en la planta Sergio Cuevas, suplida por la toma en la presa Carraízo en el embalse Loíza, fue generalmente de 95 mgd, muy superior al rendimiento seguro. Peor aún, la producción de agua aumentó a 100 mgd al principio de la sequía, acelerando así la tasa de reducción en el nivel del embalse (véase la Gráfica 5.1). En la última fase del racionamiento, en septiembre, los abonados del embalse Loíza habían sufrido una reducción de 68% en su abasto de agua.



Gráfica 5.1 Producción en la planta de filtración Sergio Cuevas (suplida por embalse Loíza) durante el racionamiento en el 2015 a consecuencia de la sequía.

5.2.2 Las causas del racionamiento

Al examinar los embalses Loíza y La Plata (Gráfica 5.2), es evidente que su comportamiento en el 2015 fue casi idéntico a la sequía de 1994, a pesar de que el proyecto del SACN ya estaba en operación y aportando 100 mgd adicionales.



Gráfica 5.2 Variación en los niveles de los embalses Loíza y La Plata durante años secos, señalando que el patrón del 2015 (línea verde) es casi idéntico al patrón del 1994 (línea roja)

Fuente: (USGS, hasta enero de 2016).

Para atender exitosamente y resolver el problema del racionamiento, es esencial identificar la raíz del problema. La AAA cuenta con los abastos necesarios para suplir a todos sus abonados en el AMSJ durante condiciones de sequía. El racionamiento no es una consecuencia de la sequía, sino el resultado de no mantener el sistema de distribución a un nivel de operación aceptable con respecto al problema de pérdidas de agua.

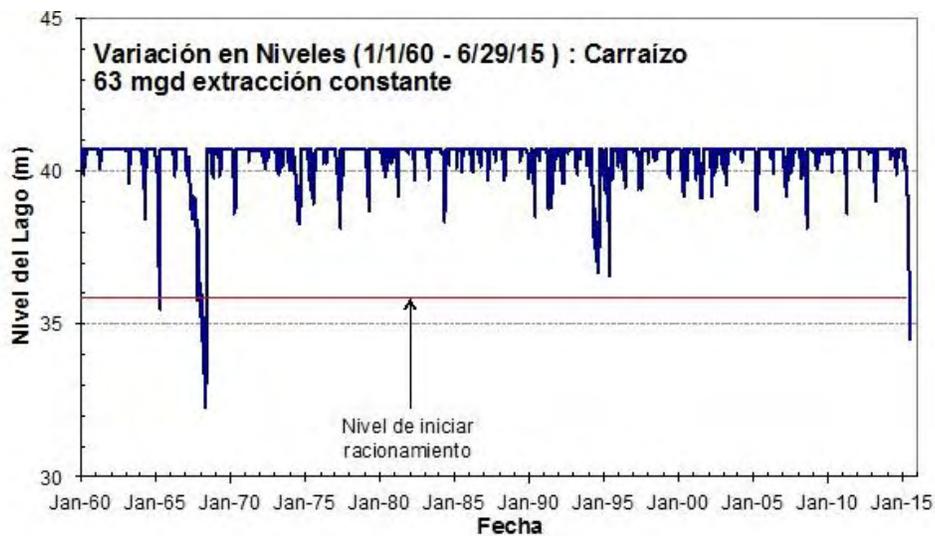
Rendimiento seguro

El *rendimiento seguro* se define como el caudal máximo que una fuente de agua puede suplir de manera sostenible a largo plazo, a un nivel específico de confiabilidad. El concepto de rendimiento seguro es aplicable tanto a las fuentes superficiales como a las fuentes subterráneas. En ambos sistemas, el insumo de agua proveniente de la lluvia y la escorrentía es irregular, pero la demanda de agua que es casi constante a través del año. El flujo irregular se convierte en uno constante mediante la provisión de almacenaje. Los embalses almacenan el flujo de los ríos en épocas de crecidas para hacer entregas durante periodos secos. Los acuíferos representan el sistema de almacenaje del agua subterránea y reciben recarga de diversas fuentes, incluyendo: la lluvia, los ríos, la infiltración de tuberías rotas, canales y sistemas de riego, los pozos sépticos y los sistemas de recarga artificial. El agua almacenada se extrae por pozos y el nivel del agua subterránea fluctúa según varía el volumen de agua en el acuífero.

En los embalses, el rendimiento seguro se calcula mediante la construcción de un balance de agua diario, añadiendo en cada día el influjo del río, restando la tasa de extracción, calculando el aumento o la reducción en almacenaje y el desborde río abajo del volumen excedido en el

embalse. Utilizando la hidrología histórica de los ríos afluentes al embalse, se puede simular el comportamiento del embalse sujeto a diferentes tasas de extracción, para así calcular el número de días con racionamiento que corresponde a cada tasa de extracción y regla operacional. La Gráfica 5.3 señala el comportamiento histórico del nivel de agua en embalse Loíza con una extracción de 63 mgd. Con este ritmo de extracción ocurre un racionamiento en el 1% de los días durante el periodo de simulación. La regla operacional utilizada inicia el racionamiento cuando se reduce el nivel en el embalse a un 30% de su capacidad.

Para tener una fuente de agua confiable, es necesario limitar la tasa de extracción para que no se sobrepase del rendimiento seguro del embalse. Por ende, para evitar el racionamiento en el futuro se requiere: (1) reducir la tasa de extracción al valor del rendimiento seguro, o (2) aumentar el rendimiento seguro. A continuación, se presentan estrategias para alcanzar ambos objetivos.



Gráfica 5.3 Simulación del nivel diario del embalse Loíza desde 1960 hasta el presente con una tasa de extracción de 63 mgd.

El SACN, con un costo de construcción de \$527 millones (sin incluir los costos de financiamiento y operación), entró en operación en el año 2001 y ahora provee 100 mgd de agua. Su propósito fue evitar racionamiento en el AMSJ en periodos de sequía:

“El Superacueducto solucionaría, a largo plazo, los problemas de abastos de agua en esa área, particularmente en la zona metropolitana.” Dr. Emilio Colón (El Nuevo Día, 29 de julio de 1994)

“This [superaqueduct] would satisfy water demand until the year 2050, and we wouldn't have to worry any more about droughts - that's the importance of this project right now”. Ing. Pérez-Arroyo, Director Proyecto Superacueducto (San Juan Star, 27 de agosto de 1994)

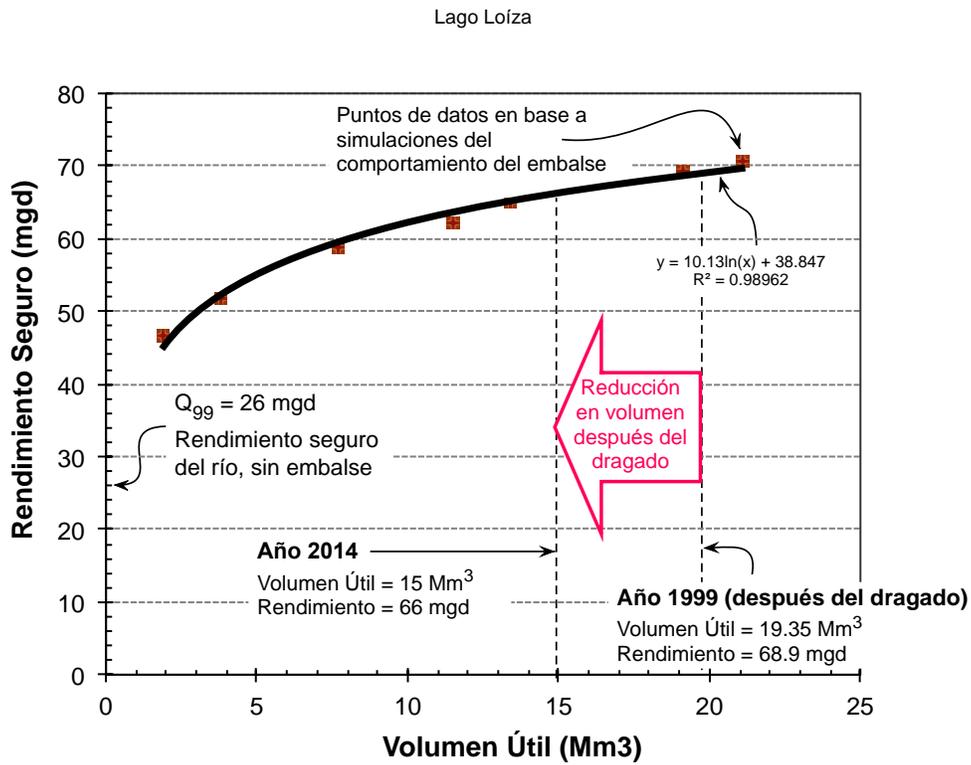
Sin embargo, esto no se logró porque el abasto de agua del SACN no fue utilizado para reducir la tasa de extracción en los embalses Loíza y La Plata, sino que se utilizó para:

- Suplir agua a varios municipios a lo largo de la costa norte incluyendo Arecibo, Manatí, Vega Baja, Vega Alta, Toa Alta y Dorado. Esta agua reemplazó pozos, los cuales fueron abandonados;
- Suplir agua a Caguas y Juncos mediante una línea de 30” y la estación de bombeo La Muda; y
- Aumentó el volumen de las pérdidas de agua debido a las fugas.

Por lo tanto, al añadir el SACN al sistema de la AAA no resolvió el problema de sobre extracción en los embalses Loíza y La Plata, al contrario, se continúa extrayendo agua a una tasa superior al rendimiento seguro.

5.2.3 Relación volumen-rendimiento

El rendimiento seguro de un embalse aumenta según incrementa su volumen para almacenar agua. El modelo de simulación hidrológico del balance diario también se puede utilizar para determinar la relación entre el volumen del embalse y su rendimiento seguro, para así construir la curva de “volumen-rendimiento”. Esta curva (Gráfica 5.4) se construye para determinar el rendimiento seguro que corresponde a diferentes volúmenes de almacenaje y su reducción o aumento en el tiempo. Al examinar la gráfica 5.4, se puede apreciar que la curva volumen-rendimiento del embalse Loíza es relativamente llana en su capacidad actual. Un proyecto de dragado que remueva 6 Mm³ de sedimentos, aumentaría su rendimiento seguro en tan solo 3.4 mgd (de 66.3 mgd a 69.7 mgd). Estos números demuestran que el dragado no es una manera costo-efectiva para aumentar el rendimiento seguro en el embalse Loíza ya que se estima que este el beneficio se perdería en un periodo de 20 años.



Gráfica 5.4 Curva de volumen-rendimiento para el embalse Loíza.

En los embalses es fácil observar y medir la variación en el volumen de agua en almacenaje, y monitorear directamente el flujo del río que entra al embalse. En contraste, en los sistemas de aguas subterráneas es mucho más complicado estimar los componentes del balance de agua y determinar la tasa de extracción permisible. El rendimiento sostenible del acuífero también depende mucho del diseño de los campos de pozos y del monitoreo del comportamiento del acuífero. Además, en el caso de los acuíferos costeros, como son los acuíferos principales en Puerto Rico, el factor limitante no es la presencia del agua, sino su calidad. Tanto en la costa norte como la costa sur la sobreexplotación del acuífero permite la entrada del agua salina del mar hacia el acuífero, resultando en la salinización progresiva de los pozos. A diferencia de los embalses, los procesos en los acuíferos ocurren mucho más lentos, al igual que su recuperación, especialmente en casos de contaminación.

5.2.4 La relación entre las pérdidas de agua y el racionamiento

La peor sequía ocurrida en Puerto Rico, según el registro hidrológico, fue la de 1967-1968, que se extendió por dos años consecutivos. Hasta el presente, las sequías que afectan los embalses siempre han iniciado con la falta de lluvia durante el periodo lluvioso, entre los meses de mayo y junio. En todos los años secos, con la excepción de 1967, la sequía termina con las lluvias de septiembre durante la época de huracanes. Por el contrario, en 1967 no llegaron ni los huracanes ni las lluvias y tampoco llegó la lluvia en mayo y junio de 1968. El embalse Loíza no se pudo llenar hasta que llegaron lluvias fuertes en junio del 1968, después de año y medio de sequía. En contraste, durante la sequía de 2015 el embalse Loíza empezó el descenso en su nivel durante la primera semana de marzo y se llenó a finales de octubre. En el 2015 los caudales en varios ríos registraron sus récords mínimos. El Monitor de Sequía, registró la sequía como una extrema y no llegó a clasificarla como una de intensidad excepcional.

El sistema de agua potable debe tener la capacidad de suplir la cantidad normal de agua durante las sequías “normales” que duran aproximadamente 6 meses. También debe tener la capacidad de suministrar agua con un nivel razonable de racionamiento (ej. 30% de reducción) en el caso de que la sequía se extienda, como ocurrió durante 1967-68.

La opción de bajar la tasa de extracción de los embalses Loíza y La Plata a su rendimiento seguro se puede lograr al reducir la tasa de pérdidas en el sistema de distribución de la AAA. El agua no-contabilizada representa la diferencia entre el volumen de agua producida y el volumen registrado por los contadores de los abonados (volumen facturado como consumo). En Puerto Rico el componente principal del Agua No Contabilizada consiste en las pérdidas físicas (fugas). Los datos de la AAA del año 2014 indicaron que el 59% del agua fue no-contabilizada, y el 48% de su producción se perdió por causa de las fugas (Ilustración 5.1).

PLAN INTEGRAL DE RECURSOS DE AGUA
JUNIO, 2016

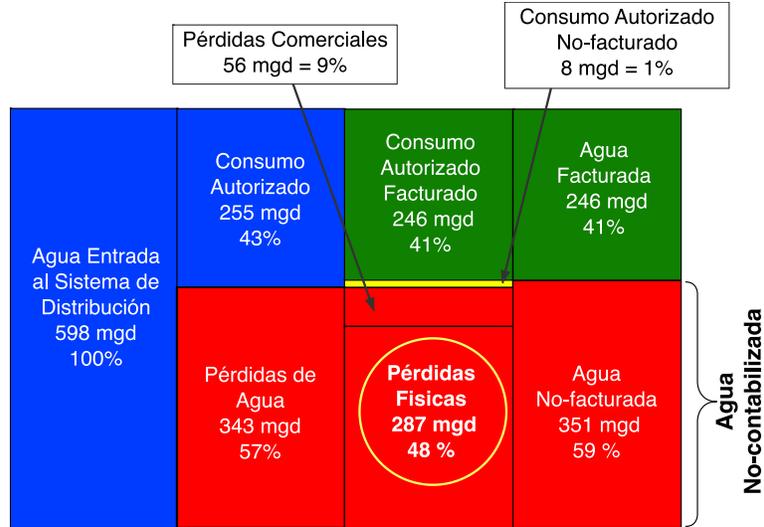
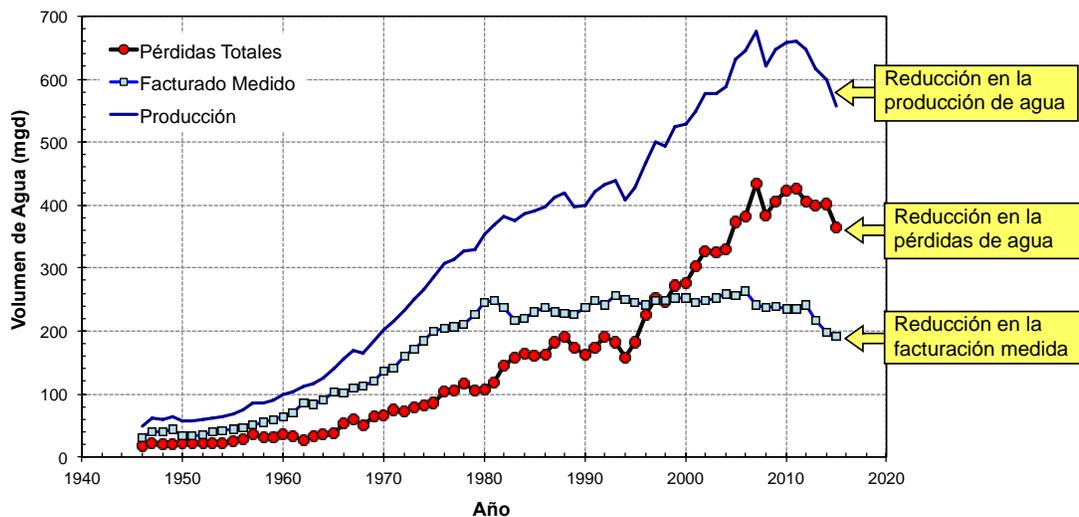


Ilustración 5.1 Balance del agua para el sistema de la AAA para el año 2014.

El historial presentado en la Gráfica 5.5 demuestra que el volumen de agua no-contabilizada llegó a componer hasta el 64% del agua potabilizada por la Autoridad en los años 2010, 2011 y 2012. En el 2015 este valor se ha reducido en aproximadamente 54%, principalmente debido a una estrategia de mejorar la contabilización del sistema de medición y facturación, más que en la reparación de fugas. Todos los abonados cuentan con contadores por lo que el volumen no-contabilizado no debería sobrepasar de un 10-15% de la producción, si hubiera un control adecuado de las fugas. Este valor está muy distante de los valores en exceso del 50% que ha caracterizado el sistema de la AAA a partir del año 1997.



Gráfica 5.5 Tendencias en la producción y destino del agua de la AAA desde 1947 al 2014.

La AAA ha mejorado sustancialmente la eficiencia en la reparación de los salideros informados. Sin embargo, la tasa de pérdida física aún es extremadamente alta. Esto se debe a dos factores: (1) la mayoría de las fugas no son visibles y (2) no todas las fugas visibles son informadas.

Las fugas no-visibles se pueden detectar utilizando equipo de audio para identificar el sonido que hace el agua al salir de un tubo bajo presión. El procedimiento es evaluar un área e identificar las fugas, arreglarlas y repetir la búsqueda una o más veces para encontrar aquellas cuyo sonido estuvo oculto por el de los salideros más ruidosos. Los tubos de hierro son excelentes conductores del sonido lo que facilita la búsqueda de fugas. Sin embargo, tubos de PVC, que constituyen la mayoría de la red de distribución de la AAA son pobres transmisores de sonido. Por ende, un programa de detección de fugas puede cubrir un área, detectar algunos de los salideros, pero pueden quedar fugas grandes no-detectadas.

Para contabilizar las fugas en un área, y asegurar que todas las fugas e incidencias de robo están identificadas y corregidas, se requiere que se divida el sistema en sectores (sectorización) y que se prepare una auditoría o balance del agua para cada sector. El balance se calcula al medir el volumen del agua que entra a un sector y compararlo con el volumen del agua que se contabiliza en los contadores de los usuarios, según se registra en el sistema de facturación. Esta diferencia presenta el total de las pérdidas del agua, lo cual incluye las pérdidas físicas (fugas) y las pérdidas comerciales (agua utilizada pero no facturada o autorizada).

El volumen de las fugas se puede detectar midiendo el flujo del agua que entra al sector durante un mínimo de 24 horas. Se deben identificar las mismas entre la media noche y las 4:00 AM, ya que en casi todo el sistema de la AAA el consumo de agua en este periodo es muy cercano a cero. La Gráfica 5.6 señala la situación en un barrio con problemas severos de fugas, con un flujo muy alto después de la medianoche: el flujo de las fugas. Existían 149 gpm de filtraciones previo a la intervención de detección de fugas. Se pudo detectar 87 gpm de fugas, mientras que el restante quedó sin identificar. Esto hace necesario sub-dividir en sectores más pequeños el sistema para mejorar la medición del flujo. De otra forma se dificulta el identificar y corregir las fugas que no generan ruido detectable fácilmente. En la situación del ejemplo fue necesario seguir repitiendo las búsquedas para localizar todas las fugas. La AAA ha informado que no ha implantado esta metodología de sectorización debido a su costo, pero que es algo que no está descartado.

Aunque es costoso buscar y reparar las fugas no-visibles, sin este trabajo las fugas irán en aumento (véase Gráfica 5.5). Por otro lado, es mucho menos costoso la reparación de salideros que la construcción de proyectos nuevos que se convierten en fuentes para alimentar las fugas, por lo que las pérdidas de agua aumentan continuamente con el tiempo, como ya ha ocurrido en el sistema de la AAA. Reconociendo esta realidad, el plan de mejoras para el área metropolitana, publicado en 2015, por primera vez da énfasis en el control de las fugas en vez de la construcción de nuevos proyectos de abasto.

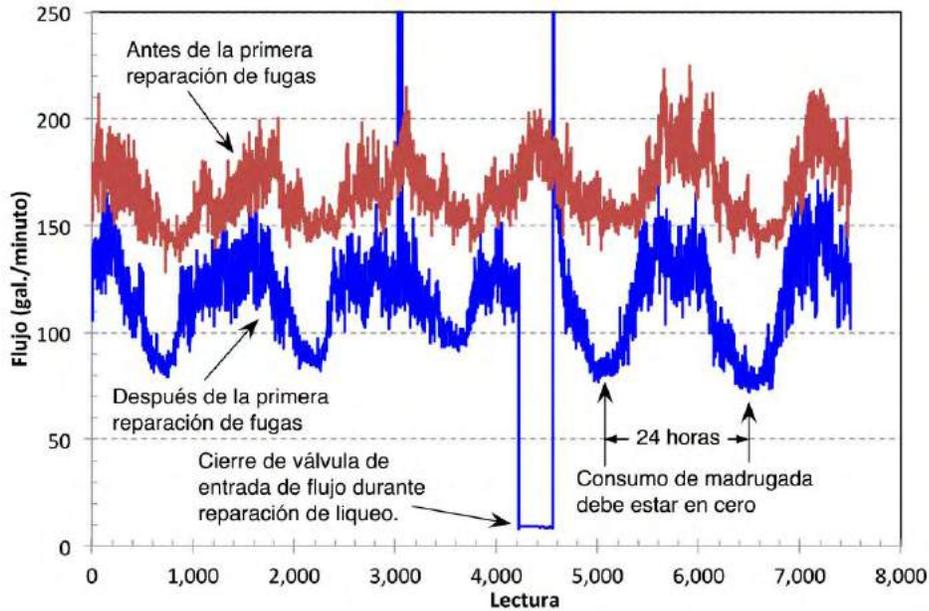
Al ritmo que se disminuyen las pérdidas físicas, se disminuye la tasa de extracción necesaria para proveer agua a los abonados. Esta relación se calcula en la Tabla 5.2. Si se logra reducir la tasa de pérdidas físicas al 33%, el valor que la AAA informó en 1990, la tasa de extracción del embalse Loíza sería muy cercana a su rendimiento seguro y en el embalse De La Plata sería inferior a su rendimiento seguro.

La falta de mantenimiento al sistema de distribución y el aumento dramático en las pérdidas de agua, son las causas principales del racionamiento. Los beneficios del aumento de 100 mgd en abasto a consecuencia del SACN (\$527 millones el costo de construcción) y el dragado del embalse Loíza fueron anulados debido al aumento en el volumen de agua no-contabilizada de 163 a 343 mgd entre 1990 y 2014. En resumen, la AAA cuenta con sistemas de abasto suficientes para evitar el racionamiento. El racionamiento no ocurre por insuficiencia en la infraestructura, es el resultado de la falta en el control de fugas.

A nivel Isla el volumen de agua no-contabilizada aumentó por 242 mgd entre 1995 y 2011, un volumen 2.4 veces el caudal suplido por el SACN. No tenemos datos para las pérdidas en la AMSJ, pero no hay razón para indicar que sea muy distinto de la situación a nivel Isla.

Tabla 5.2 Relación Entre Pérdidas Físicas y la Tasa de Extracción Necesaria para Suplir Usuarios.

Pérdidas Físicas, %	Extracción, mgd		Uso por Abonados, mgd		Notas
	Carraízo	La Plata	Carraízo	La Plata	
48	95	65	45.6	31.2	Condición actual
33	68	47	45.6	31.2	Promedio de pérdidas año 1990
15	54	37	45.6	31.2	Valor de “pérdidas permisibles”, EE. UU.



Gráfica 5.6 Patrón de flujo diario en una parcela con problemas severos de fugas de agua. Había 149 gpm de filtraciones previo a la intervención de detección de fugas, pero se pudieron encontrar solamente 87 gpm de fugas, resultando en otro 62 gpm de fugas luego del trabajo de detección y reparación de fugas. (Figs Land May 2009.ppt).

5.2.5 Agua no-contabilizada en el sistema de la AAA

La solución tradicional que se ha seguido en Puerto Rico para atender situaciones de deficiencias en el abasto de agua potable, ha sido aumentar la producción por medio de obras nuevas. Esto ha encarecido el costo del servicio sin atender el problema de las pérdidas.

El agua no-contabilizada representa la diferencia entre el volumen informado como producción en las plantas de filtración y los pozos, y el volumen cuya entrega se contabiliza mediante los metros de los consumidores o por consumo estimado. En un sistema con manejo adecuado, el agua no-contabilizada no debe exceder aproximadamente el 15 por ciento de la producción. Entre los diversos elementos que contribuyen al aumento del agua no-contabilizada se encuentran los siguientes:

Agua entregada pero no-contabilizada: Hay varias condiciones bajo las cuales la AAA puede entregar agua a los consumidores sin contabilizar las mismas. Éstas incluyen: metros averiados que reflejan lecturas menores a la servida; conexiones desconocidas y sin metros; y el hurto del agua. La Ilustración 5.2 muestra un “*pillo de agua*” instalado en una acometida residencial.



Foto cortesía de Gregory L. Morris

Ilustración 5.2 Un “pillo de agua” instalado en servicio residencial.

Otro problema relacionado al agua no-contabilizada es la subestimación del consumo. La AAA cuenta con muchos contadores instalados hace más de diez años, propensos a errores de medición. Esta situación ha sido reconocida por la AAA y se ha implantado un programa de sustitución de contadores (metros) de consumo de agua por abonados. Como parte de este programa se reemplazaron un total de 52,497 contadores durante el año fiscal 2014-2015.

Sobre-estimación de la producción: La sobre-estimación de la producción al igual que la sub-estimación del consumo produce el mismo resultado, un volumen mayor de agua no-contabilizada. Muchas plantas de filtración tienen metros con problemas conocidos de medición, incluyendo plantas sin metros.

Pérdidas físicas: Las filtraciones de los tubos de transmisión y distribución y el desborde de los tanques son pérdidas físicas del agua, que en el 2014 se estimaron en 48% de la producción total (Ilustración 5.1). Las causas para la rotura de tuberías y la consecuente filtración incluyen exceso de presión en las líneas, prácticas de construcción inadecuadas, tuberías deterioradas, golpes de ariete, mantenimiento inadecuado, válvulas inoperantes en tanques y la falta de un enfoque de ingeniería en el análisis del problema. Las pérdidas físicas son particularmente problemáticas en áreas de construcción informal (ej. parcelas) y en zonas rurales.

5.2.6 Recomendaciones – control de pérdidas AAA

Se recomienda que la AAA inicie un programa de sectorización de su sistema, para monitorear el balance de agua sector por sector. En cada uno habría que informar el volumen de agua

entrando, el volumen contabilizado en los contadores de los consumidores y un estimado de cualquier otro uso (ej. limpieza por hidrantes), para así calcular las fugas por diferencia. Este balance se debe revisar cada dos meses, a base de la lectura bi-mensual de los contadores. Esta es la única manera confiable de monitorear la magnitud de las pérdidas y encontrar y arreglar las fugas. Estos datos también identifican los sectores de mayor prioridad y pueden indicar si hay problemas en el sistema que resulten en un crecimiento rápido en las pérdidas luego de las reparaciones. De esta manera, se podría identificar la necesidad de intervención de ingeniería, tal y como el control de presión y el reemplazo de tubería.

Al final, el enfoque debe ser uno dirigido a prevenir las filtraciones y no solamente a reparar. Es necesario visualizar el problema como uno de ingeniería que requiere determinar las causas de las roturas frecuentes e implantar las acciones necesarias para prevenir su repetición.

5.2.7 Operación combinada para aumentar el rendimiento seguro

De las opciones para aumentar el rendimiento seguro, la más costo-efectiva es la utilización combinada de agua superficial y agua subterránea. Esta estrategia consiste en maximizar la utilización del agua de los embalses de la costa norte cuando hay un amplio abasto de agua superficial y sus niveles están altos. Tan pronto los niveles de los embalses descendan, se reduce la tasa de extracción y se inicia el bombeo de pozos. Cuando empieza a llover nuevamente y los niveles en los embalses suben, se sacan de servicio los pozos. Es decir, para poder suplir un caudal constante, se debe operar ambas fuentes en tasas de extracción variable, haciendo un uso combinado de éstas, garantizando así el rendimiento seguro. La extracción adicional de agua en los pozos de la costa norte se considera viable debido a que los niveles en estos acuíferos han estado en aumento durante los últimos años, como resultado de la reducción en el bombeo debido al cierre de pozos de la AAA e industrias.

El comportamiento del embalse Loíza fue simulado bajo esta regla, utilizando los parámetros presentados en la Tabla 5.3. Bajo esta regla, los pozos con una capacidad de bombeo combinada de 25 mgd se utilizan aproximadamente 2 meses al año, resultando en una tasa de bombeo promedio anual de solamente 5 mgd. Es decir, una tasa de extracción promedio de tan solo 5 mgd del acuífero produce un aumento de 25 mgd en el rendimiento seguro del sistema, simplemente por el hecho de poder aprovechar el agua subterránea en los

momentos de mayor necesidad. El resto del tiempo, con una abundancia del agua superficial, los pozos están en descanso y el acuífero se recupera. Esta situación se presenta esquemáticamente en la Ilustración 5.3 y el itinerario de la entrega del agua de cada una de las dos fuentes, día por día, se presenta en la Gráfica 5.7.

De haberse utilizado esta opción de manejo, no hubiese sido necesario el racionamiento de agua durante la sequía de 1994 y la intensidad y duración del racionamiento de 2015 hubiese sido mucho menor. Bajo esta regla los pozos hubiesen seguido en operación aun cuando los embalses estuvieran bajo reglas de racionamiento, reduciendo la severidad del mismo y en un 22% la disminución en la oferta de agua. Sin embargo, la realidad fue que, durante el 2015, los abonados en el área de servicio del embalse Loíza sufrieron una reducción de 68% en la oferta de agua.

Estas simulaciones son preliminares y demuestran claramente el beneficio de manejar las fuentes de aguas superficiales y subterráneas como un sistema integrado, aprovechando las características de almacenaje y recarga de ambas fuentes para maximizar el rendimiento del sistema de manera costo efectiva. La razón de esto es que la AAA ya cuenta con una capacidad de más de 10 mgd en pozos que, aunque están en estado de abandono, están conectados a la red de distribución y se pueden rehabilitar a un costo mínimo.

Durante una sequía prolongada, como la sequía de 1967-68, los pozos pueden funcionar continuamente por más de un año. En un año húmedo los pozos trabajarían solo unos pocos días al año. Las simulaciones demuestran que en la mayoría de los años los pozos funcionan por lo menos algunos días, manteniendo así el sistema en funcionamiento. Esta estrategia ha sido analizada para otros embalses en la costa norte, con resultados similares.

Esta estrategia requiere que el sistema de transmisión de la AAA sea modificado lo suficiente para suministrar agua de los pozos a las áreas de servicio del embalse Loíza. Por ejemplo, en el área de servicio del embalse La Plata hay pozos fuera de operación, los cuales pueden ser restaurados al igual que la planta abandonada de filtración La Virgencita, con capacidad para 6 mgd.

Tabla 5.3 Parámetros Operacionales en la Simulación de Uso Conjunto del Embalse Loíza y Pozos.

Volumen del Embalse	Extracción del Embalse, mgd	Bombeo de Pozos, mgd	Caudal Total	
			mgd	% de Normal
Más del 90% de capacidad	90	0	90	100%
Menos del 90% de capacidad	65	25	90	100%
Menos del 35% de capacidad (racionamiento)	45	25	70	78%

De todas las opciones disponibles para aumentar el abasto de agua en el sistema interconectado de la costa norte, que se extiende desde Arecibo hasta Juncos, la operación de los embalses en conjunto con pozos representa la opción de mayor rendimiento, menor costo, menor impacto ambiental y más rápida de implantar.

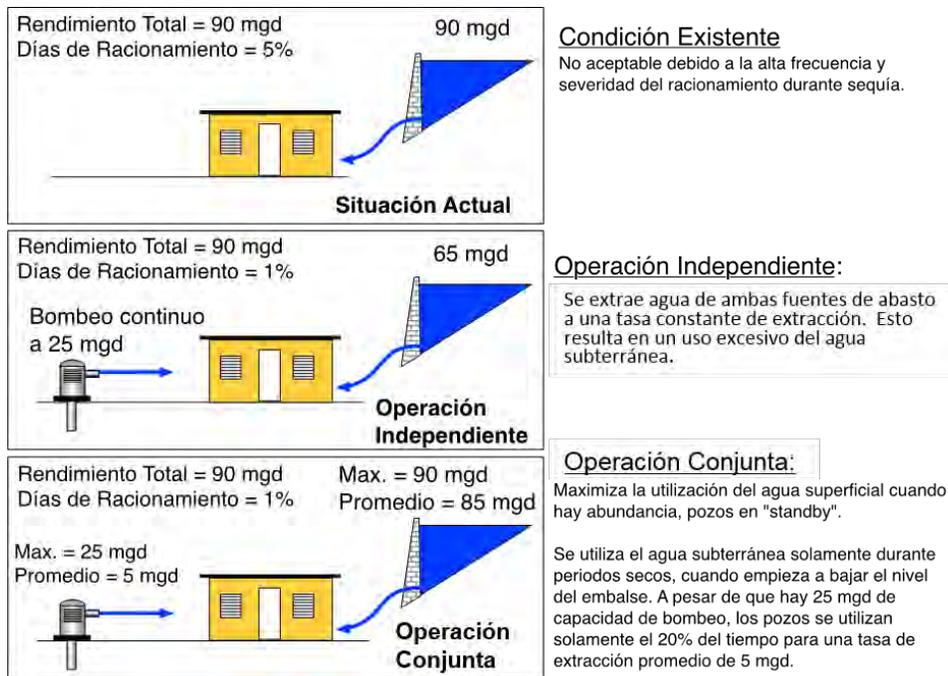
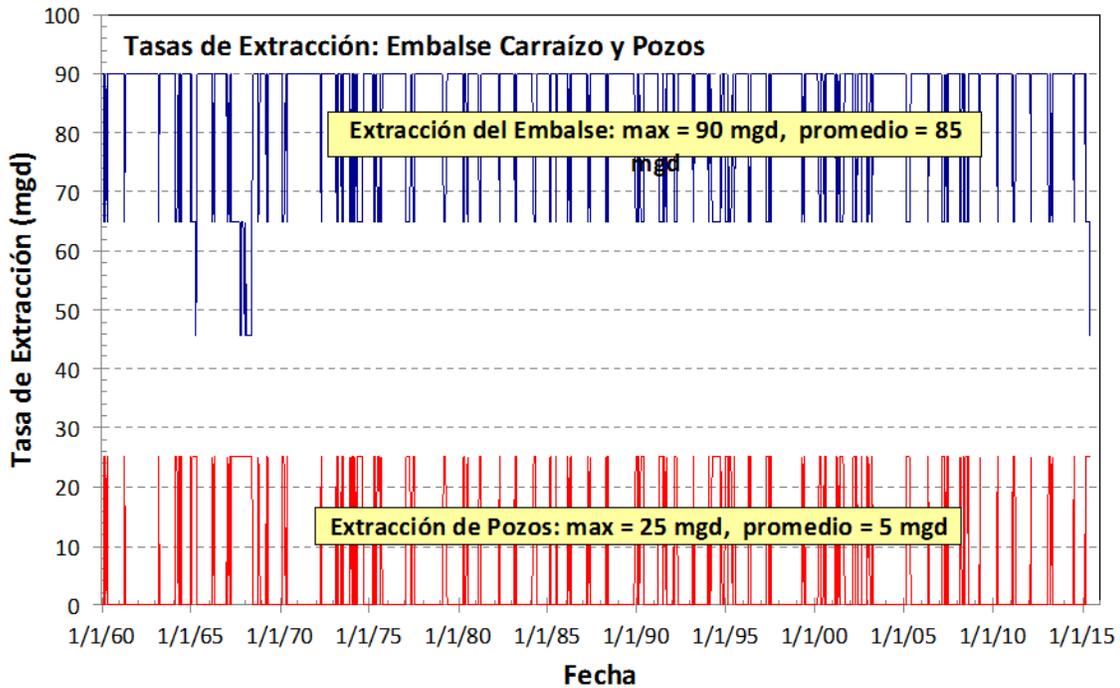


Ilustración 5.3 Beneficios de una estrategia de uso combinado de agua superficial y subterránea en la costa norte de Puerto Rico.



Gráfica 5.7 Tasa de extracción variable del embalse Loíza y de pozos, bajo la operación conjunta de las dos fuentes de abasto.

5.2.8 Desarrollo de nuevas fuentes de abasto de agua superficial

La estrategia de construir embalses adicionales para proveer el volumen de agua necesario para evitar el racionamiento en el AMSJ no se recomienda. Esta estrategia ya se implantó con la construcción del SACN, que prometió terminar con el racionamiento del agua en la zona metropolitana.

La opción de construir proyectos grandes como embalses no es la mejor alternativa, sobre todo por los costos elevados de éstos, la frágil economía presente, los costos ambientales de este tipo de proyecto y porque no hay garantías de que la nueva oferta de agua no se desperdiciará en los sistemas de distribución. Si se logra la utilización eficiente del agua mediante la reducción significativa en las pérdidas físicas, no sería necesario construir ningún proyecto nuevo, ya que los abastos actuales son más que adecuados para suplir las necesidades de los usuarios (refiérase a la Tabla 5.2).

El embalse propuesto en el río Valenciano, cuya construcción se paralizó por insuficiencia de fondos, es uno de los proyectos que no se debe construir debido a su rendimiento limitado, su alto costo unitario, la falta de necesidad y la viabilidad de proyectos alternos de costo mucho menor como lo son el control de fugas y la utilización de pozos en conjunto con las fuentes superficiales. El costo capital del proyecto Valenciano, en comparación con el costo del proyecto del SACN se compara en la Tabla 5.4. En el caso del Valenciano³ también se debe considerar que el costo de un préstamo de construcción es, hoy en día, muy alto para Puerto Rico, y el potencial de obtener financiamiento es muy bajo. El costo de financiamiento (intereses) sería aproximadamente igual al costo de construcción, duplicando así el costo efectivo del proyecto.

Tabla 5.4 Costo Comparativo de los Proyectos Superacueducto y Valenciano.

Proyecto	Costo Capital	Rendimiento Seguro	Costo de Construcción por mgd de Capacidad ^{c/}
Superacueducto	\$527 M	100 mgd	5.27 \$M/mgd
Valenciano ^{a/}	\$219 M	11.5 mgd ^{b/}	19.0 \$M/mgd

a/ Costo y rendimiento de la AAA “Metro Region Water Resources Management Plan”, octubre de 2015.

b/ Rendimiento en adición al rendimiento seguro de la toma en el río sin represa.

c/ No incluye el costo de financiamiento (intereses).

5.2.9 Pérdidas en los canales de riego

En Puerto Rico operan tres sistemas de riego administrados por la AEE que, además de dotar de agua a las actividades agrícolas, también suplen agua a varias plantas de filtración de la AAA.

³ Este río es uno muy sedimentario debido a la geología de su cuenca. El volumen de sedimentos que genera en eventos de lluvia intensa puede tapan el embalse en corto tiempo por lo que no se recomienda la construcción de un embalse en éste.

Distrito de Riego de Isabela

El Distrito de Riego de Isabela, en la Región Noroeste, se alimenta del Embalse Guajataca y distribuye sus aguas a través de los canales de derivación de Isabela, Moca y Aguadilla. La tasa de entregas de este Distrito de Riego conforme a los datos del USGS para el 2013 fue de 20.9 mgd. Un total de 4 plantas de filtración de agua potable, con una producción combinada de 30.9 mgd, se alimentan del Embalse Guajataca. Sin embargo, no existe una buena contabilización del volumen de agua utilizada por los demás usuarios del sistema, principalmente agricultores e industrias. De acuerdo a datos del USGS al 2010, se utilizaron para riego 1.45 mgd de los canales del Distrito de Riego de Isabela. Tampoco existe información actualizada relacionada a las pérdidas por el canal de hormigón luego de las reparaciones efectuadas a partir del año 2006 en los tramos del canal más cercanos al embalse.

Como resultado, este sistema presenta un problema de información incompleta respecto a su balance de agua. El canal de riego pasa por encima de las formaciones de caliza y las filtraciones entran a un sistema de agua subterránea que carece de pozos. Es decir, las pérdidas por filtración de los canales en este sistema de riego representan pérdidas netas, no recuperadas en otro punto.



Ilustración 5. 4 Red de canales de los tres distritos de riego en Puerto Rico.

Afortunadamente, la sequía de 2015 no afectó las cuencas en el oeste de Puerto Rico, incluyendo Guajataca. Sin embargo, la pérdida de una parte significativa de las entregas puede representar la diferencia entre un abasto adecuado vs. el racionamiento del agua durante una próxima sequía. Esto hace prioritario una nueva contabilización de flujo a lo largo de los canales y el control de pérdidas en este sistema de canales.

Distrito de Riego del Valle de Lajas

El Sistema de Riego del Suroeste produce energía hidroeléctrica y provee agua para usos agrícolas y domésticos en el Valle de Lajas. Su fuente de abasto consiste de 5 embalses: Yahuecas, Guayo, Prieto, Lucchetti y Loco. De estos se alimentan cinco plantas de filtración de agua potable, con una capacidad de diseño combinada de 8.4 mgd. Durante el año 2003, los agricultores del área utilizaron un total de 15.7 mgd para riego. En 2014 la AAA inauguró la operación de la ampliación de la planta de filtración de Yauco, aumentando su capacidad de 1.6 a 7.6 mgd, incluyendo una toma directa en el embalse Luchetti.

Los canales de distribución del Distrito de Riego del Valle de Lajas están revestidos en hormigón (véase Ilustración 5.5). Al presente, el rendimiento seguro del sistema al 99% del tiempo se estima en 38 mgd⁴. Al ajustar el mismo por un estimado de 10 por ciento de pérdidas en los canales, se obtiene una disponibilidad neta de 34.2 mgd. Las pérdidas no se consideran un problema mayor en este sistema (CSA, 2005).



Ilustración 5.5 Punto de inicio del canal de distribución del Distrito de Riego del Valle de Lajas.

⁴ CSA, 2005, "Viabilidad de Aumentar el abasto de agua para usos domésticos y agrícolas en el Valle de Lajas", Informe a la AAA, San Juan.

Distrito de Riego de la Costa Sur

El Distrito de Riego de la Costa Sur se divide en las secciones este y oeste. El área de Patillas, Arroyo, Guayama y Salinas comprenden la sección este, mientras que en la zona de Juana Díaz y Santa Isabel opera la sección oeste. Las fuentes de abasto de la sección este son los embalses Carite y Patillas, supliendo respectivamente los canales de Guamaní y Patillas. Las plantas de filtración Farallón (Cayey) y Guamaní se alimentan de las aguas del embalse Carite, y las plantas de Guayama y Patillas se suplen del embalse Patillas. La capacidad combinada de estas plantas al presente asciende a 15.6 mgd, pero en el 2015 utilizaron solo 13.84 mgd. Los agricultores suscritos a este sistema de riego utilizaron 4.4 mgd de agua para la irrigación de sus fincas en el 2015.

La sección oeste se suple del embalse Guayabal en Juana Díaz, más los desvíos de la cabecera del río Grande de Manatí provenientes de los embalses Guineo y Matrullas y de túneles que cruzan la Cordillera Central y descargan aguas arriba del embalse Guayabal. Las aguas del embalse Guayabal son utilizadas exclusivamente para propósitos agrícolas y en el año 2015 dicho sistema de riego registró entregas a los agricultores ascendentes a 13.4 mgd. El embalse del río Toa Vaca, construido por la AAA sobre un tributario al embalse Guayabal, provee agua exclusivamente para el uso doméstico.

Todos los canales de riego en el Distrito de la Costa Sur son de tierra y representan una fuente de recarga significativa hacia el acuífero. Se estima que la tasa de pérdida consiste en entre 10% y 20% del flujo total. Una reducción en la tasa de las pérdidas al impermeabilizar los canales, tendrá el efecto de disminuir la recarga de los acuíferos, impactando adversamente los niveles freáticos y la cantidad y calidad del agua de pozos para usuarios domésticos, industriales y agrícolas. Debido a que el agua que se filtra de los canales es recuperada por los pozos, las pérdidas por infiltración en este sistema de riego no representan una pérdida neta de agua y no se recomienda obras para reducir las filtraciones por estos canales.

5.2.10 Recomendaciones – canales de riego

1. En el Sistema de Riego de Isabela se recomienda una auditoría de los usos del agua y análisis de pérdidas en el canal para identificar el potencial de aumentar la eficiencia de entrega de agua a los usuarios.
2. Realizar un análisis de pérdidas en el sistema de canales del Valle de Lajas para determinar si las pérdidas siguen en niveles aceptables o se requiere de mejoras.

5.3 Sostenibilidad de los embalses existentes

Los embalses son la fuente principal de agua en Puerto Rico. Según documentado por el USGS, durante el 2013 los embalses aportaron 245 mgd de agua cruda a las plantas de filtración operadas por la AAA y 23.3 mgd para propósitos agrícolas a través de los sistemas de riego operados por la AEE. En conjunto, su producción representó el 44 por ciento del agua dulce extraída en la Isla.

Los embalses existentes están perdiendo su capacidad debido al proceso de sedimentación y los más importantes ya están afectados por este proceso. Esta sección presenta un resumen de los problemas de sedimentación de los embalses en Puerto Rico e identifica estrategias recomendadas para atender el problema.

5.3.1 Sedimentación y Rendimiento Seguro

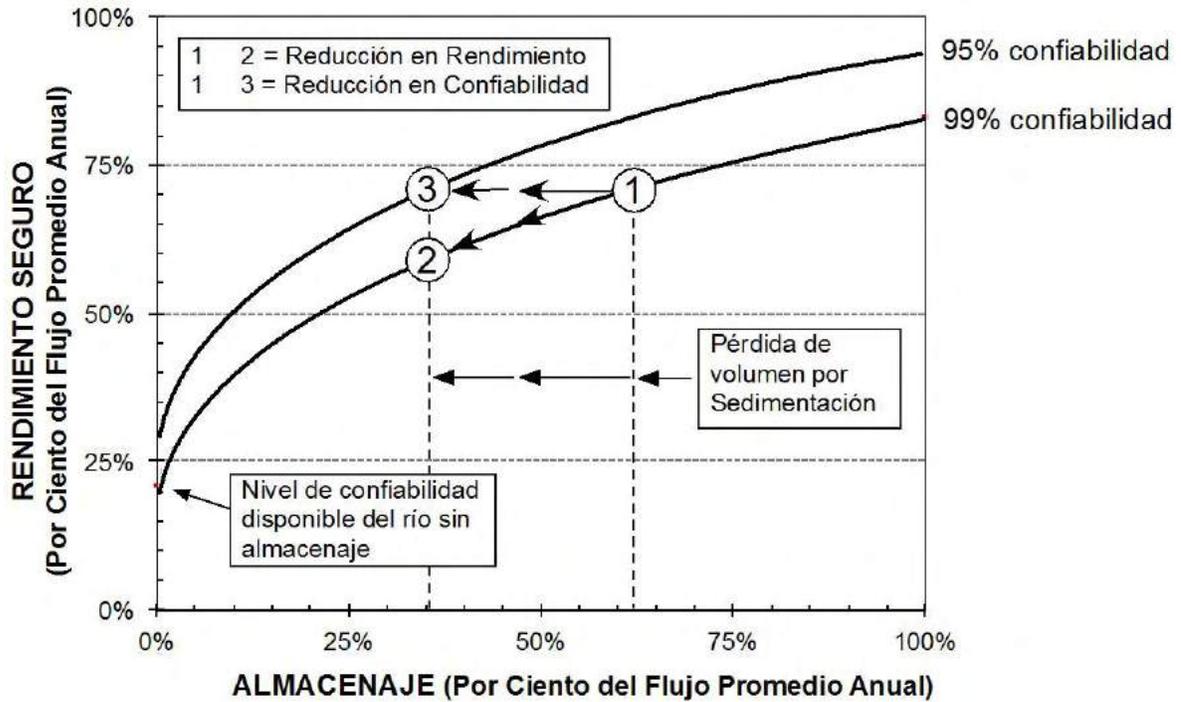
El efecto de la sedimentación se puede analizar a partir de la relación volumen-rendimiento, según se presenta conceptualmente en la Gráfica 5.8. Como consecuencia de la pérdida de volumen por la sedimentación, el embalse puede sufrir una reducción en rendimiento mientras se mantiene el nivel de confiabilidad fija (del punto #1 al #2 en la gráfica); se puede mantener el rendimiento, pero reducir la confiabilidad del abasto (del punto #1 al #3); o una combinación de ambos. Una reducción en la confiabilidad se experimenta durante las sequías, resultando en un mayor número de días con racionamiento del agua y un aumento en el riesgo de que el embalse se vacíe por completo.

5.3.2 Características de la sedimentación

La combinación de tipos de suelos, pendiente de los terrenos (terrenos empinados), eventos de lluvias fuertes y el uso del terreno, hacen que las tasas de erosión y sedimentación sean muy altas en Puerto Rico en comparación con otras partes del mundo. Los ríos transportan los sedimentos erosionados hacia los embalses donde la velocidad del flujo disminuye y las partículas se asientan quedando atrapados. Los embalses representan trampas de sedimentos muy eficientes y como consecuencia, los embalses de la Isla están perdiendo su capacidad de almacenaje. Sin embargo, existe mucha variación en las tasas de sedimentación de un embalse a otro (Tabla 5.5). El término “*vida media*” se refiere al tiempo que toma al embalse perder la mitad de la capacidad original. La función de un embalse se afecta seriamente al perder la mitad de su volumen. Los dos nuevos embalses fuera de cauce tienen una vida

media mayor que los embalses convencionales porque se diseñaron para minimizar la sedimentación.

Según se puede apreciar de la Tabla 5.5, entre los embalses de mayor tamaño y con problemas serios de sedimentación se encuentran las principales fuentes de abasto del AMSJ, los embalses Loíza y Dos Bocas. También están muy afectados cuatro de los embalses que suplen el Sistema de Riego del Valle de Lajas: Loco, Luchetti, Prieto y Yahuecas.



Gráfica 5.8 Reducción en el rendimiento y la confiabilidad del abasto a consecuencia de la pérdida de volumen por sedimentación de un embalse. Cada curva corresponde a un nivel diferente de confiabilidad.

Algunos de los embalses pequeños en Puerto Rico ya están fuera de servicio debido a la sedimentación, como, por ejemplo, el embalse en el río Coamo (véase Ilustración 5.6). Este embalse suplía agua al canal de riego de Juana Díaz, complementando el agua entregada por el embalse Guayabal. Su aporte económico no se considera suficiente para justificar el costo de recuperación de su capacidad. Sin embargo, hay otros embalses que no pueden ser removidos del servicio debido a que su uso es esencial.

PLAN INTEGRAL DE RECURSOS DE AGUA
JUNIO, 2016

Tabla 5.5 Condición de Sedimentación de Embalses Principales en Puerto Rico.

Nombre	Año Llenado	Dueño	Usos	Última Batimetría			Volumen año 2015		Media Vida, años	Pérdida de Volumen Anual, Mm ³ /año
				Volumen Original, Mm ³	Volumen Total, Mm ³	Año del Estudio de Campo	Volumen Original, Mm ³	Volumen %		
Blanco	2010	AAA	M	4.7	NA		4.7	99.8	1270	0.0019
Fajardo	2006	AAA	M, R	4.3	NA		4.3	99.6	1262	0.0017
Cerrillos	1991	DRNA	M, R	38	37.3	2008	36.9	97	420	0.05
La Plata	1974	AAA	M, R	49.2	31.3	2006	26.2	53	44	0.56
Toa Vaca	1972	AAA	M, R	68.9	64.1	2002	62	90	213	0.16
Guayo	1956	AEE	H, M, I, R	19.2	16.6	1997	15.4	80	150	0.06
Yahuecas	1956	AEE	H, M, I, R	1.8	0.3	1997	0	0	25	0.03
Prieto	1955	AEE	H, M, I, R	0.8	0.2	1997	0	0	30	0.01
Loíza	1953	AAA	M, R	26.8	16.4	2009	15.3	57	72	0.19
Luchetti	1952	AEE	H, M, I, R	20.4	11.9	2000	9.2	45	58	0.18
Loco	1951	ELA	H, M, I, R	2.4	0.9	2000	0.4	17	38	0.03
Caonillas	1948	AEE	H, M, R	55.7	39.55	2012	38.8	70	172	0.25
Cidra	1946	AAA	M, R	6.5	5.6	2007	5.5	84	219	0.01
Garzas	1943	AEE	H, R	5.8	5.1	2007	5	87	289	0.01
Dos Bocas	1942	AEE	H, M, R	37.5	16.74	2010	15.2	40	50	0.31
Matrullas	1934	AEE	H, R	3.7	3.1	2001	2.9	79	197	0.01
El Guineo	1931	AEE	H,R	2.3	1.9	2001	1.8	79	200	0.01
Guajataca	1928	AEE	I, M, R	48.5	42.3	1999	40.9	84	278	0.09
Patillas	1914	ELA	I, M, R	17.6	13.6	2007	13.2	75	202	0.04
Carite	1913	AEE	I, M, R	14	10.7	1999	10.1	73	187	0.04
Guayabal	1913	ELA	I, R	11.8	5.8	2006	5.2	44	92	0.06

Notas: H= Hidroeléctrica, M=abasto municipal (AAA), I= Irrigación, R= Recreio, F= Control de Inundación, Capacidad del embalse hasta nivel de vertedero.



Ilustración 5.6 Embalse en el río Coamo, fuera de servicio por la sedimentación, vista desde la PR-52.

El patrón típico de sedimentación en un embalse se presenta de forma esquemática en la Ilustración 5.7. Los sedimentos gruesos, arena y grava, se asientan rápidamente al entrar el embalse y se acumulan en la forma de un delta que gradualmente avanza hacia la represa. Los sedimentos más finos pueden ser transportados hacia zonas de mayor profundidad cercanas a la represa. En general, hay poca arena en los ríos de Puerto Rico por lo que los deltas en los embalses de Puerto Rico normalmente son muy pequeños. Esto se debe a que la roca predominante en el interior de la Isla es el basalto, una roca extrusiva (volcánica) con una estructura cristalina muy fina debido a su enfriamiento rápido. Por ende, carece de los cristales de sílice del tamaño de arena y no genera mucho sedimento en su proceso de meteorización. Además, desde 1950 ha habido mucha actividad de extracción de arena y grava de los cauces de los ríos por parte de la industria de construcción. Sin embargo, en la cuenca tributaria al embalse Dos Bocas hay áreas de granito, una roca intrusiva de enfriamiento lento, compuesto en 75% por sílice, lo cual genera mucha arena en su proceso de meteorización. Por tal razón, el embalse Dos Bocas cuenta con un delta arenoso que está acercándose a la represa (véase Gráfica 5.9).

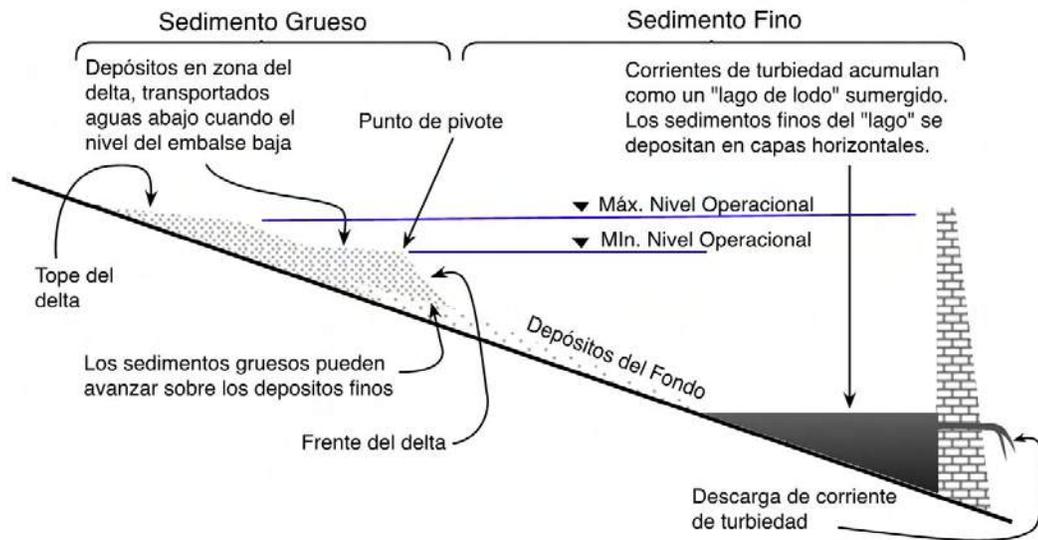


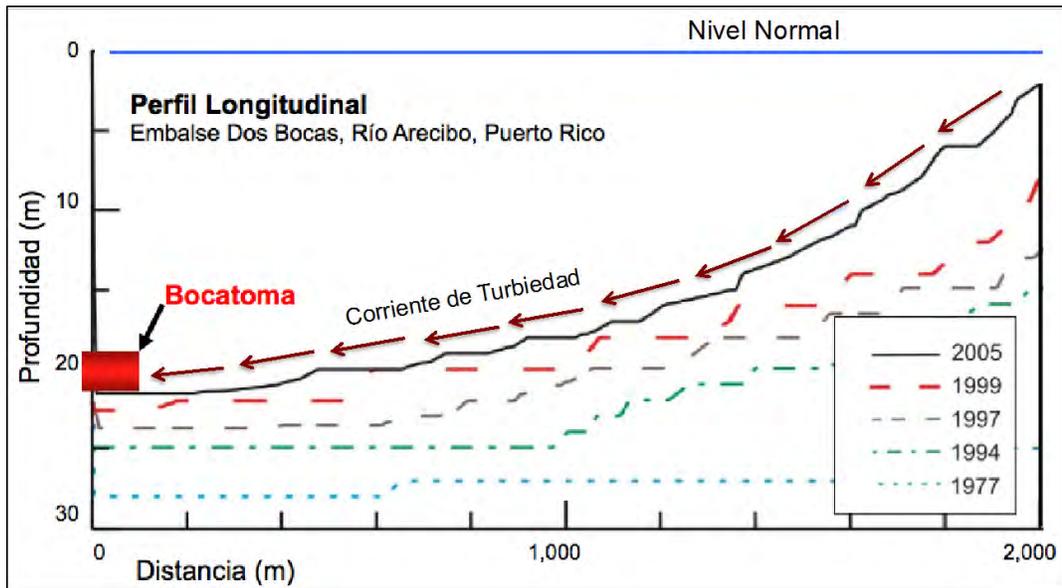
Ilustración 5.7 Proceso de sedimentación típico dentro de un embalse donde se señalan la zona de sedimentos gruesos (áreas en la zona del delta) y la zona de depósitos de material fino aguas abajo del delta. Depósitos de corrientes de turbiedad no ocurren en todos los embalses.

Las tasas de pérdida de volumen por la sedimentación son más elevadas en los embalses de Puerto Rico que en los EE.UU. Esto es resultado de la combinación del alto aporte de sedimento junto con el tamaño reducido de los embalses en la Isla, en relación a su influjo.

Por ejemplo, el volumen actual del embalse Loíza equivale a solamente el 4% de la esorrentía promedio anual de su cuenca. Por el contrario, en el oeste de los EE.UU. hay embalses cuya capacidad excede el 50% de la esorrentía anual.



Ilustración 5.8 Descarga de agua turbida por la apertura de compuertas de la represa Carraízo. La turbidez se debe a la concentración de sedimentos finos en suspensión.



Gráfica 5.9 Patrón de avance del delta hacia la represa Dos Bocas, y la descarga de sedimentos finos por las corrientes de turbiedad (perfiles de informes del USGS).

Los sedimentos son transportados principalmente durante las crecidas. Durante éstas, una fracción menor de los sedimentos finos pueden ser transportados aguas abajo del embalse, sin quedarse atrapados (véase la descarga del agua turbida desde la represa Carraízo en la Ilustración 5.8). En condiciones favorables, una parte significativa de los sedimentos finos se puede descargar como una corriente de turbiedad, según se muestra en la Gráfica 5.9.

Varios de los embalses pequeños que se han colmado por completo han sido objeto de procesos de limpieza con equipo mecánico, pero persisten los problemas de sedimentación. El pequeño embalse hidroeléctrico en río Icacos, ubicado en el Bosque Nacional El Yunque, se llenó totalmente de sedimentos generados por deslizamientos a consecuencia de las lluvias asociadas al paso de los huracanes David y Federico en el año 1979 y luego ha sido limpiado dos veces. Los sedimentos de los embalses Yahuecas, Prieto e Icacos fueron removidos durante 1991-92 mediante un trabajo apoyado con fondos de FEMA a raíz del paso del huracán Hugo, re-estableciendo (temporalmente) la capacidad de almacenaje de éstos.

5.3.3 Alternativas para el manejo de la sedimentación

Existen varias limitaciones para la construcción de embalses nuevos tales como, el costo elevado de los proyectos y la disponibilidad limitada de terrenos. Por esto es esencial establecer técnicas que permitan combatir la sedimentación y mantener en servicio los embalses de mayor importancia del País.

Existen una variedad de técnicas para el manejo de sedimentación en embalses. La Ilustración 5.9 presenta un sistema de clasificación de estas alternativas⁵. Las técnicas de manejo se pueden catalogar en cuatro estrategias básicas: (1) reducir el aporte de sedimentos hacia el embalse, (2) manejo hidráulico del embalse para minimizar el depósito de sedimentos, (3) remover los sedimentos una vez depositados, y (4) manejar las consecuencias de la pérdida de volumen sin manejar el proceso de sedimentación como tal. En un embalse se pueden utilizar más de una técnica en diferentes momentos según avance el proceso de sedimentación y no todas las técnicas son aptas para las condiciones de los embalses en Puerto Rico. Estas estrategias se discuten en las próximas secciones, con atención especial a las técnicas más relevantes a Puerto Rico.

⁵ Morris y Fan (1998) presentan en mayor detalle los procesos de sedimentación y las opciones para su manejo, disponible en formato PDF en www.reservoirsedimentation.com.

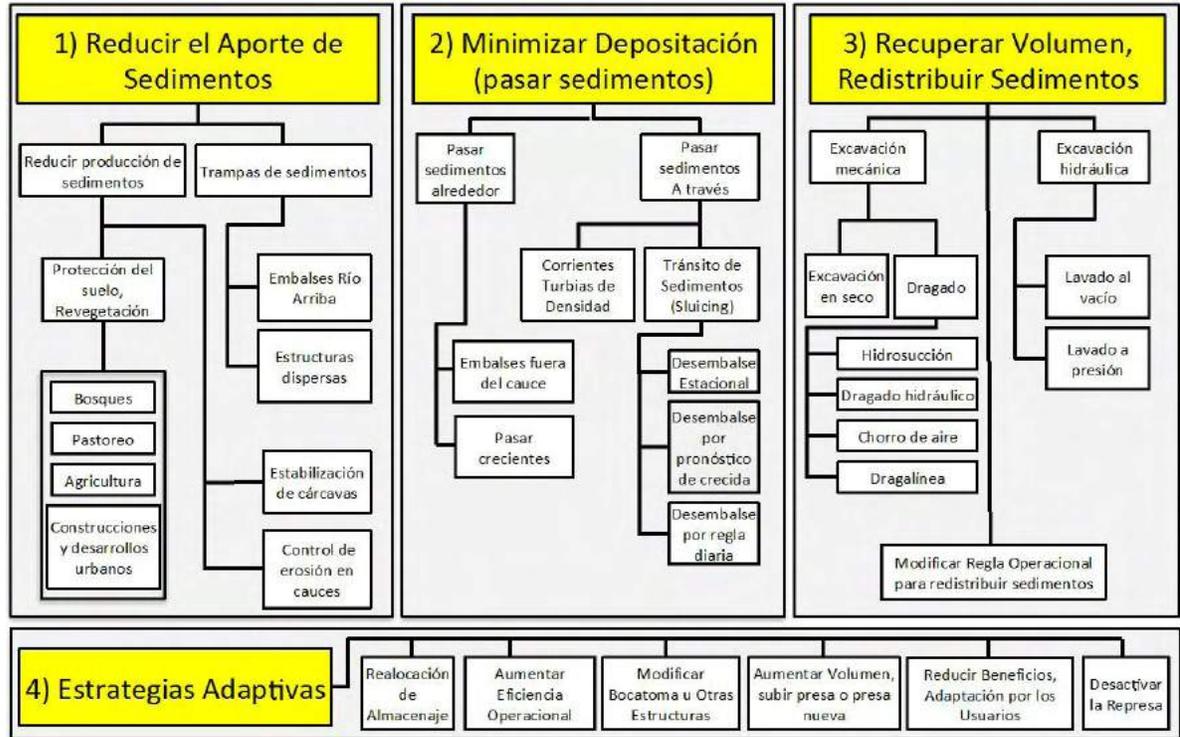


Ilustración 5.9 Alternativas para el manejo de sedimentos en embalses (Morris 2015).

5.3.4 Reducir el aporte de sedimentos

La erosión y transporte de sedimentos hacia el mar es un proceso natural y depende de factores tales como la intensidad de la precipitación, la resistencia de los suelos y la pendiente del terreno. La erosión se acelera por las actividades del ser humano incluyendo la remoción de la capa vegetal y el movimiento de los terrenos. De acuerdo a experimentos controlados de medición de erosión, llevados a cabo durante 10 años en la Estación Experimental de Mayagüez, la tasa de erosión, corregido por variaciones en la pendiente y la capa vegetal, puede ser muy variable (Tabla 5.6). A nivel de cuenca, los cálculos de la susceptibilidad de erosión de diferentes suelos, junto con sus características de pendiente y uso de terreno, indican que la alta tasa de erosión es atribuible al suelo desprovisto de protección. Por ejemplo, el 21% de la erosión tiene su origen en tan solo 0.6% del terreno. El control de erosión puede ser efectivo si se enfoca en las partes de la cuenca que aportan mucho sedimento independientemente del tamaño de área.

La materia orgánica en la capa superficial del suelo actúa como un pegamento que resiste la erosión. La eliminación de esta capa superficial expone el sub-suelo a las fuerzas erosivas, lo que resulta en la tasa máxima de erosión. Esto es común en lugares donde se realizan actividades de construcción, en comparación con cualquier otro uso de terreno. Por tal razón,

los controles de erosión en las áreas de construcción son de extrema importancia. Este fenómeno se refleja en los datos presentados en las tablas 5.6 y 5.7.

Tabla 5.6 Tasa de erosión promedio como función del uso de terreno, cuenca del río Guadiana, Puerto Rico (López, Aide y Scatena, 1998).

Uso de Terreno	Tasa de Erosión Promedio, T/km ² /año	Por Ciento del Área de la Cuenca	Por Ciento de la Erosión Total
Suelo sin vegetación	53,400	0.6	21
Área urbana	100	1.7	0.1
Rural residencial	1500	9.4	9.2
Agricultura	2200	0.3	0.4
Pastos	1700	16.6	18
Bosque con dosel abierto	2600	14.5	25
Bosque con dosel cerrado	700	56.9	26

Nota: Los bosques ocupan terrenos con mayores pendientes.

La mayor parte de los sedimentos producto de la erosión son transportados hacia los embalses por eventos extremos de lluvia como son las vaguadas y los huracanes. Durante el periodo de los 8 años señalados (Gráfica 5.10), en solamente 5 días se registraron el 50% del aporte total de los sedimentos. Esto demuestra que el control de la sedimentación depende del manejo exitoso de los eventos de lluvia de mayor intensidad y las crecidas resultantes. Desafortunadamente, es muy difícil lograr un control efectivo de la erosión en suelos perturbados durante estos eventos extremos.

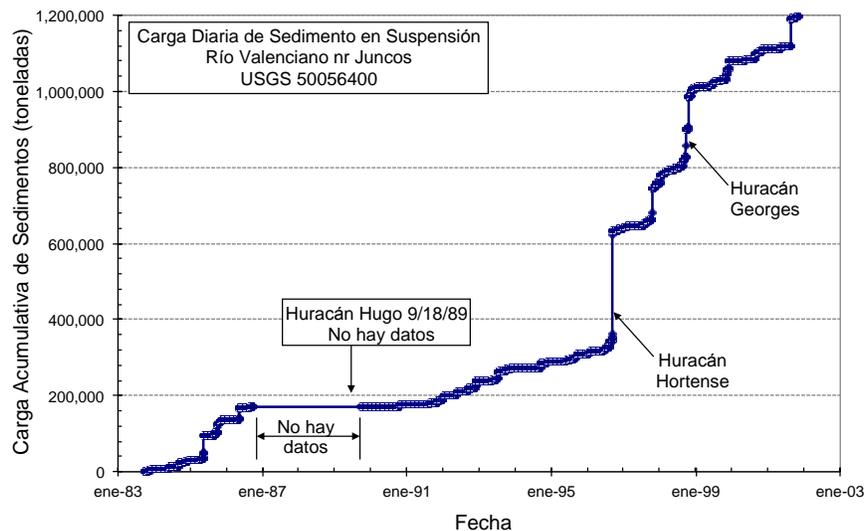
Tabla 5.7 Tasa de Erosión del Suelo Bajo Diferentes Coberturas Vegetal (Smith y Abruña, 1955).

Tratamiento del Suelo	Pérdida de suelo por pulgada de lluvia por 1% de pendiente, t/km ²	Control relativo de la erosión, %
Suelo desnudo, 3' de la capa superficial removido ^{a/}	25,660	0
Suelo desnudo (arado)	21,859	15
Promedio de todas las cosechas	16,537	36
Batata	14,541	43
Café con suelo desnudo	9,504	63
Caña de azúcar con hojarasca quemada	7,413	72
Caña de azúcar en hoyos con hojarasca parcial	3,897	85
Caña de azúcar en surco con hojarasca parcial	1,996	92
Café con cobertura natural del suelo y terrazas	1,045	96
Promedio de todas las gramas	760	97
Caña de azúcar con hojarasca completa	570	98
Kudzu (enredadera densa)	570	98

a/ Tratamiento similar a un sitio de construcción.

La mayor parte de los sedimentos producto de la erosión son transportados hacia los embalses por eventos extremos de lluvia como son las vaguadas y los huracanes. Durante el periodo de los 8 años señalados (gráfica 5.10), en solamente 5 días se registraron el 50% del aporte total de los sedimentos. Esto demuestra que el control de la sedimentación depende del manejo exitoso de los eventos de lluvia de mayor intensidad y las crecidas resultantes. Desafortunadamente, es muy difícil lograr un control efectivo de la erosión en suelos perturbados durante estos eventos extremos.

En general, las prácticas prevalecientes de conservación y manejo de suelos en la Isla son deficientes, tanto en su diseño como en su implantación. Diversas técnicas de control de erosión se presentan en *“Puerto Rico Erosion and Sediment Control Handbook,”* (JCA 2005) disponible en el Internet en formato PDF. En las áreas de producción de cultivos agrícolas (ej. laderas) y en lugares de construcción, las medidas de control de erosión no son eficientes durante los eventos de lluvia extrema. Los métodos, como verjas de geotextil (*“silt fence”*) y pacas de heno, fallan durante eventos extremos. La técnica más útil y confiable para minimizar el escape de sedimentos de un terreno objeto de actividades de construcción es utilizando una charca de sedimentación que cuente con un vertedero construido para resistir el flujo asociado con una lluvia extrema.



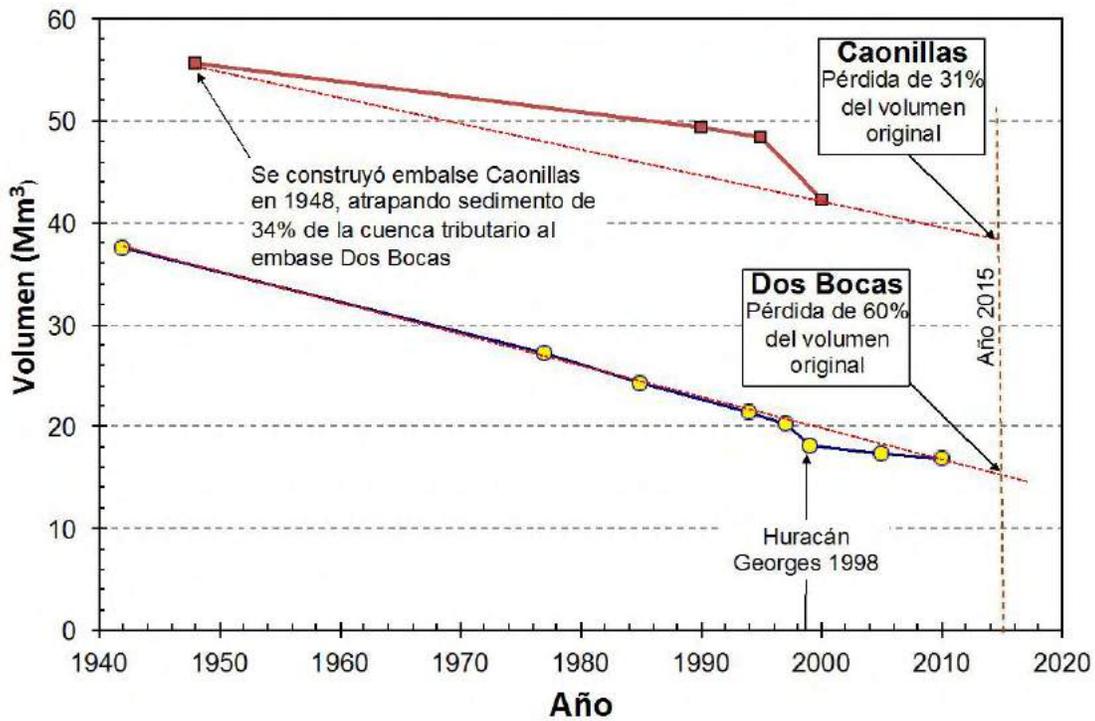
Gráfica 5.10 Transporte diario de sedimentos a lo largo del río Valenciano, señalando la importancia de eventos extremos.

Las medidas de control de erosión pueden reducir el aporte de sedimentos durante los eventos normales, sin embargo, las lluvias extremas pueden originar deslizamientos y erosión de gran escala. Estos eventos extremos pueden tener una influencia importante sobre la tasa

de sedimentación de los embalses. En el caso del embalse Dos Bocas, a pesar de que la mayoría de las actividades agrícolas cesaron y las fincas fueron abandonadas y se reforestaron por procesos naturales, desde su construcción en el 1942 hasta el 2010, la tasa promedio de acumulación de sedimentos en el embalse no se disminuyó (Gráfica 5. 11). Un factor causante de la alta tasa de sedimentos puede ser el aporte de sedimentos a consecuencia de las actividades de construcción. También se puede apreciar que la tasa de sedimentación aumentó a raíz del huracán Georges, un evento extremo en la cuenca cuyo periodo de recurrencia fue mayor de 100 años. En los años subsiguientes a Georges la tasa de sedimentación ha disminuido. El evento extremo arrastró los sedimentos disponibles para el transporte, por lo que hubo menos sedimentos disponibles para transportar hacia el embalse durante los años subsiguientes. Este fenómeno también ha sido observado en otros embalses de Puerto Rico (Soler-López, 2012).

Los datos del embalse Caonillas, presentados en la gráfica 5.11, señalan el impacto del evento en la sedimentación del embalse. La pérdida de volumen por sedimentación a consecuencia del huracán Georges fue igual a la pérdida de volumen durante 35 años sin un evento de lluvia extraordinaria. El municipio de Jayuya, que se localiza dentro de la cuenca del embalse Caonillas y solamente 5 millas aguas arriba de la represa, registró más de 24 pulgadas de lluvia durante el huracán.

Las medidas de control de erosión en las cuencas son muy importantes para mejorar la calidad del agua y reducir el aporte de sedimentos en eventos comunes o de menor severidad, particularmente en terrenos perturbados por actividades de construcción. El control de la erosión no solamente es una estrategia para reducir las tasas de sedimentación en los embalses, sino también para sostener la producción de suelos agrícolas, reducir la pérdida de nutrientes y evitar la contaminación de los cuerpos de agua dulce y las aguas costeras, las cuales están particularmente sensitivas a impactos por los sedimentos finos. Una buena cubierta vegetal es la mejor manera de reducir la erosión y además, es sustentable.



Gráfica 5.11 Pérdida de capacidad en el embalse Dos Bocas, señalando que la tasa de sedimentación no ha registrado una reducción a pesar de la reforestación de la cuenca. Los datos de Caonillas señalan que el volumen de sedimento depositado por el huracán Georges igualó a aproximadamente 35 años de sedimentación bajo condiciones “normales”.

El control de uso de los terrenos en los suelos clasificados de mayor riesgo o aguas arriba de los embalses es una tarea que compete a la JP y los municipios. Los reglamentos sobre el control de erosión y sedimentación son administrados por la JCA y la EPA. En las zonas aguas arriba de los embalses críticos, se debe considerar restricciones más estrictas con respecto al control de la erosión y en particular enfocar esfuerzos de monitoreo ya que los reglamentos existentes frecuentemente no se aplican de acuerdo a los requerimientos existentes. Para lograr el control efectivo sobre la sedimentación, es importante dar énfasis en la construcción de trampas de sedimentos para capturar sedimentos durante el periodo de construcción y las técnicas de diseño de bajo impacto (“*low impact development*”) para minimizar el aporte de sedimento y el aumento en las descargas máximas de manera permanente.

Sin embargo, no hay evidencia que los programas de control de erosión pueden producir una reducción sustancial en el rendimiento de sedimento de las cuencas tributarias a los embalses en Puerto Rico ante el impacto de los múltiples disturbios humanos. Esto significa que será necesario implantar otras medidas para mantener la capacidad de almacenaje en los embalses.

5.3.5 Alternativas para minimizar el depósito de sedimentos

El manejo hidráulico de los flujos de crecidas para minimizar el depósito de sedimentos en un embalse es una estrategia que puede ser altamente efectiva en la reducción de la tasa de sedimentación. Esta estrategia es una técnica eficiente y económica que mantiene el patrón natural de transporte de sedimentos aguas abajo, minimizando los impactos ambientales.

Embalses fuera de cauce. La estrategia de pasar sedimentos alrededor del embalse se ha implantado en Puerto Rico en los últimos dos embalses construidos en los ríos Fajardo (Fajardo) y Blanco (Naguabo). Ambos son embalses “fuera de cauce”. La Ilustración 5.10 presenta la diferencia entre un embalse convencional dentro del cauce y uno fuera de cauce. Con el embalse fuera del cauce, durante una crecida extraordinaria, tanto el flujo de la crecida como su carga de sedimentos, siguen aguas abajo a lo largo del río y no entran al embalse. Simulaciones llevadas a cabo para el diseño de los embalses de Fajardo y Blanco (Morris, 1997) indican que las aguas de las crecidas grandes, que son poco frecuentes, no son necesarias para sostener el rendimiento seguro del embalse. Al construir el embalse fuera del cauce se reduce en más del 90 por ciento la carga de sedimentos hacia el embalse en comparación con un embalse convencional ubicado dentro del cauce del río. Este diseño fue desarrollado en Puerto Rico para las condiciones particulares de la Isla y evita el problema de sedimentación masiva a consecuencia de eventos como los huracanes. Esta estrategia también se ha utilizado en varios embalses en Taiwán, una isla tropical caracterizada por tener una tasa de sedimentación aún mayor que la de Puerto Rico debido a que predomina roca sedimentaria muy frágil.

Tránsito de sedimentos. La estrategia de pasar sedimentos a través del embalse (el “tránsito de sedimentos”) requiere la operación de las compuertas de una represa convencional para dejar pasar las aguas de crecidas con su carga de sedimentos a lo largo del embalse con la mayor velocidad posible, para minimizar el depósito de los sedimentos. Esta clase de operación se utiliza en varios embalses en diferentes partes del mundo. La secuencia presentada en la Ilustración 5.11 corresponde a la adaptación de esta operación al embalse Loíza. Esta técnica requiere la preparación de un modelo hidrológico que opere a tiempo-real para calcular continuamente el volumen de esorrentía en la cuenca afluyente del embalse. Con esta información, se guía la secuencia de operaciones presentadas en la Ilustración 5.11, evitando el riesgo de no poder llenar el embalse al final del evento. También

ayuda a guiar la operación de las compuertas para evitar el riesgo de inundaciones aguas abajo de la represa. Esta estrategia es viable en el embalse Loíza porque tiene una configuración muy alargada, (Ilustración 5.12) con compuertas radiales grandes. La altura de las compuertas de 10 metros (33 pies), controla casi la totalidad de su volumen de almacenaje.

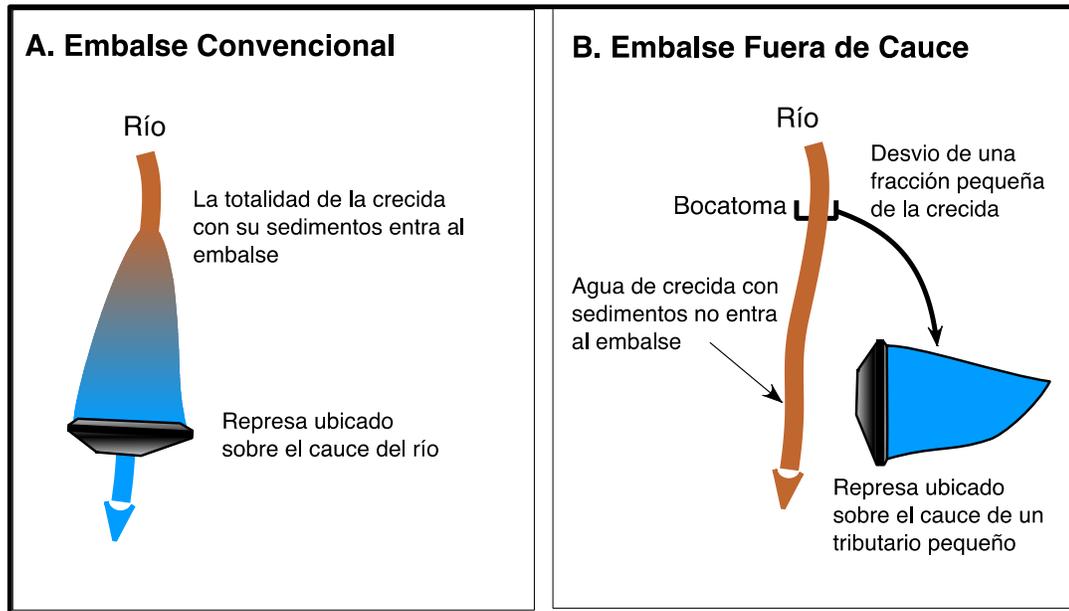


Ilustración 5.10 Diferencia conceptual entre: (A) embalse convencional y (B) embalse fuera de cauce. El embalse fuera de cauce se alimenta por una toma en el río y tubería de aducción cuya capacidad hidráulica es típicamente menos del 1% del flujo de las crecidas. Esto evita que una fracción significativa del sedimento de la crecida entre al embalse, aún sin utilizar una compuerta. En contraste, todo el sedimento entra al embalse convencional.

La efectividad de una operación de tránsito de sedimentos aumenta con la magnitud de la crecida. Las crecidas grandes, que aportan la mayor parte de los sedimentos, traen volúmenes de agua mucho mayor que la capacidad del embalse, por lo que, al abrir las compuertas se generan velocidades altas a través del embalse. Por ejemplo, la descarga durante 24 horas del huracán Hortense fue 10 veces el volumen del embalse Loíza. La práctica actual es mantener el embalse a un nivel alto, una regla operacional que maximiza la tasa de sedimentación en vez de minimizarla.

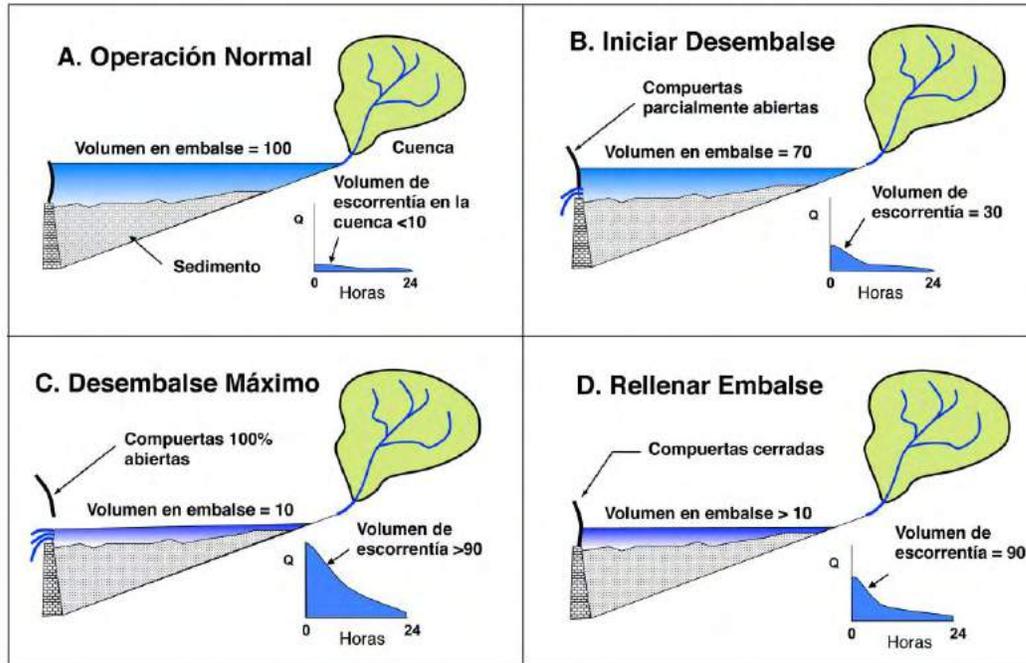


Ilustración 5.11 Manejo de las compuertas del embalse Loíza para maximizar la velocidad del flujo durante crecidas y minimizar la acumulación de sedimentos finos. (A) Operación normal, sosteniendo el nivel alto para suplir el abasto de agua. (B) Al iniciar una crecida grande asociada con una vaguada o huracán, empieza a bajar el nivel del agua a la par con la acumulación de agua en la cuenca tributaria de la represa. (C) Si la crecida se sigue desarrollando y genera un volumen grande de agua, se llega al punto que las compuertas están totalmente abiertas y las aguas pasan a través del embalse a una velocidad alta y con una acumulación mínima de sedimento. (D) Al reducir la intensidad de las lluvias y el volumen de agua en la cuenca, se cierran las compuertas para llenar nuevamente el embalse.

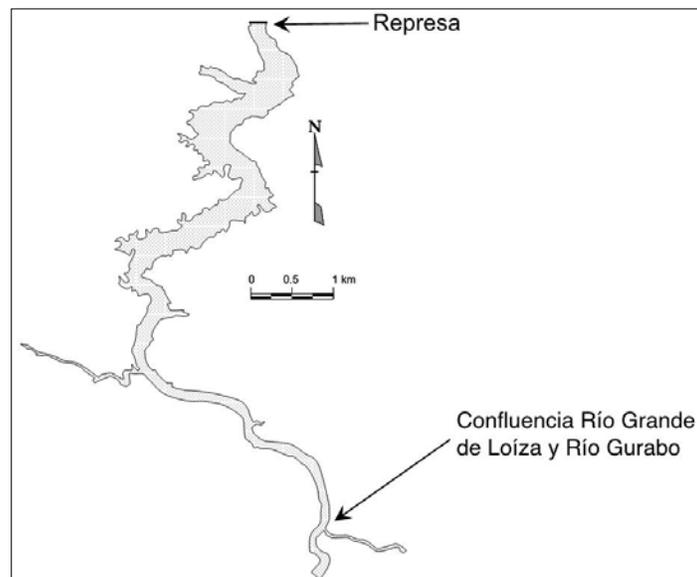


Ilustración 5.12 La configuración alargada del embalse Loíza propicia el tránsito de sedimentos.

5.3.6 Recuperar o aumentar el volumen del embalse

Aumentar el volumen de un embalse tiene el objetivo de proveer más espacio para los sedimentos de manera que se alargue el periodo que tomaría perder su capacidad útil. Por ejemplo, al subir el nivel de Loíza en 1 metro, aumentaría su volumen en aproximadamente 3 Mm³, un aumento de 20%, equivalente a 10 años de sedimentación. En el caso de Loíza un factor limitante e importante es la necesidad de evitar inundaciones en el área de Caguas, inmediatamente aguas arriba de la represa. Sin embargo, con la operación adecuada de las compuertas, podría bajar el nivel del embalse en anticipación de las crecidas, evitando así el problema de aumentar los niveles de inundación. Otro posible candidato para un aumento en el nivel operacional es el embalse Dos Bocas, actualmente sedimentado en un 60%. Debido al costo de aumentar el nivel del embalse y la rapidez con que el volumen adicional se puede perder por la sedimentación, sería aconsejable lograr estabilizar el volumen del embalse antes de incurrir en el gasto de aumentarlo.

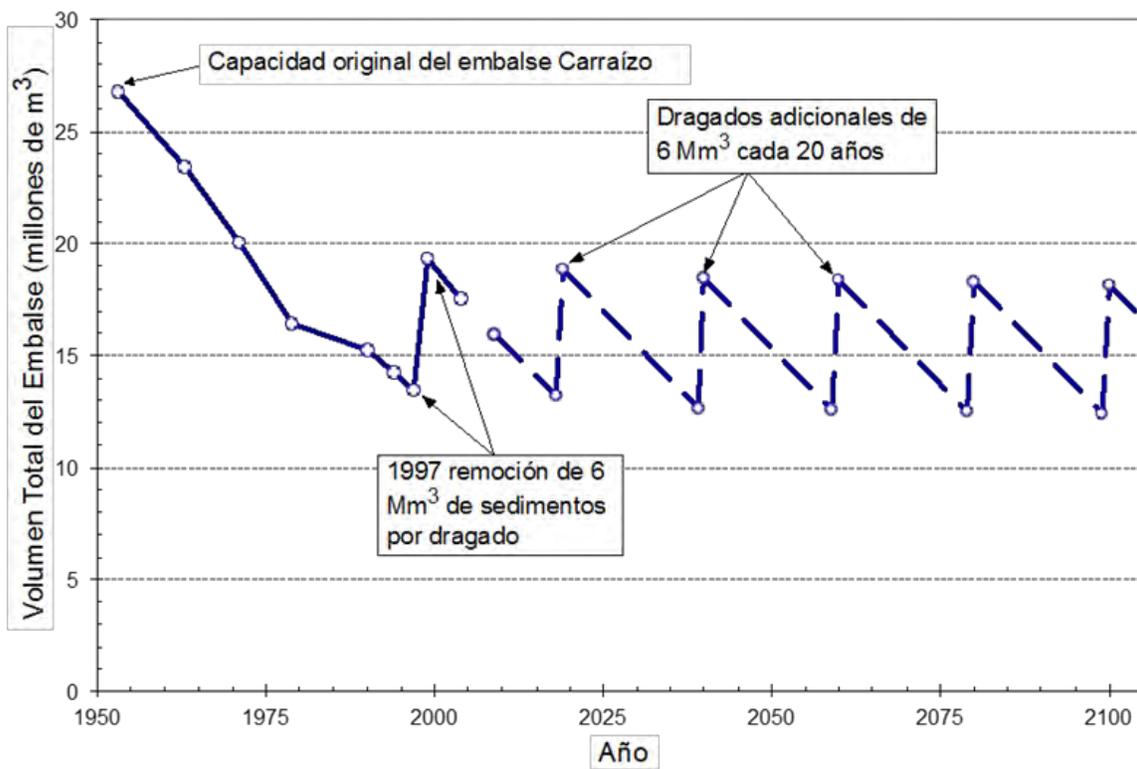
5.3.7 Remoción de sedimentos por dragado

Frecuentemente se habla del dragado como la solución al problema de la sedimentación de los embalses. Entre 1996 y 1997 se llevó a cabo el dragado del embalse Loíza, removiendo 6 Mm³ de sedimentos a un costo de unos \$60 millones, equivalente a un costo unitario de \$10/m³. Hoy en día este costo unitario de dragado se ha estimado en \$20/m³ (AAA, 2015).

El embalse Loíza tiene una tasa de sedimentación de 0.29 Mm³/año. Considerando que los dragados futuros van a remover 6 Mm³ de material, igual al primer dragado, habría que llevar a cabo una operación de dragado cada 20 años (Gráfica 5.12). A un costo actual de \$20/m³, el próximo dragado puede costar unos \$120 millones, un costo elevado para un beneficio que va durar tan sólo 20 años. Además, la estrategia de dragado implica la disposición de 30 Mm³ de sedimentos durante el siglo 21, un volumen mayor que la capacidad original del embalse (26.8 Mm³ en 1953). En Puerto Rico, los sitios disponibles para la disposición de millones de metros cúbicos de sedimentos son muy limitados, por lo que no se puede considerar el dragado como una estrategia sostenible para mantener la capacidad de los embalses.

El dragado es necesario en algunos casos, pero es esencial reducir la necesidad de dragar al mínimo. Por ejemplo, los embalses fuera de cauce del río Fajardo y río Blanco van a requerir ser dragados, pero no se anticipa que sea necesario en los próximos 300 años. Además, el volumen será pequeño (menos de 1 Mm³), lo que representa una sexta parte del volumen

que habría dragar del embalse Loíza. Al comparar ambos sistemas, durante 100 años se debe dragar un total de 30 Mm³ de Loíza y tan sólo 0.3 Mm³ de los embalses de Fajardo y río Blanco. En algunos casos el dragado también se puede utilizar para remover el material grueso que se acumula en el delta del embalse, material que puede tener valor comercial como agregado de construcción o relleno. Esta estrategia ha sido utilizada en la zona aguas arriba del embalse Dos Bocas, pero en general, menos del 10% de los sedimentos en los embalses representa material aprovechable y se puede encontrar mezclado con material fino y en zonas con pobre acceso.



Gráfica 5.12 Historial de pérdida de capacidad del embalse Loíza y los proyectos de dragado futuros necesarios para mantener su capacidad actual.

El dragado es costoso y no es sostenible como estrategia para el manejo de la sedimentación en los embalses de Puerto Rico. Se debe considerar como la última opción y trabajar para implantar otras medidas más costo-efectivas para reducir al máximo la tasa de sedimentación.

5.3.8 Adaptación a la sedimentación

Las estrategias de adaptación son aquellas que se dirigen a optimizar la utilización del recurso para así minimizar el impacto de la reducción en su volumen. Varias estrategias aplicables a Puerto Rico se discuten a continuación.

1. **Uso combinado de embalses y pozos en la costa norte.** Mediante el uso combinado de los recursos superficiales y subterráneos se operan los embalses y los pozos con tasas de extracción variable. Esta estrategia se puede iniciar en los acuíferos de la costa norte ya que han dado muestras de recuperación.
2. **Uso combinado en embalses y pozos en la costa sur.** En la costa sur, y particularmente en el municipio de Salinas, se presenta la posibilidad de utilizar una estrategia diferente. En esta zona el acuífero está siendo sobre explotado y el embalse Patillas perdió 30% de su volumen útil a partir del febrero del 2016 debido a una reducción en su nivel máximo operacional por razones de seguridad. En este caso la tasa de extracción del acuífero es constante, sin embargo, la tasa de extracción del embalse Patillas es variable. Cuando el nivel del embalse es alto se aumenta la tasa de extracción del embalse para recargar el acuífero.
3. **Santa Isabel.** El acuífero en Santa Isabel también está sobreexplotado. El único embalse en la zona, el embalse del río Coamo, está totalmente sedimentado. En este caso se propone modificar la estructura de la presa para desviar agua, por gravedad, a zonas de recarga del acuífero, según explicado en la Sección 5.4.5. En este caso la presa se utiliza como parte integral de un sistema para almacenar agua en el acuífero, sin tocar los sedimentos en el embalse.
4. **Uso eficiente del recurso.** El mayor problema que confronta el sistema de abasto público en Puerto Rico (el sistema de la AAA), es la pérdida excesiva del agua. Una reducción en pérdidas resulta en una reducción en la tasa de extracción necesaria para mantener entregas a los abonados (véase la Tabla 5.2).
5. **Conservación del agua.** La conservación del agua por parte de los usuarios es otra opción disponible en Puerto Rico. Ante una reducción en la oferta del agua debido a la sedimentación de embalses, la conservación por parte de los usuarios también puede ayudar a bajar la tasa de extracción necesaria para satisfacer sus necesidades.

6. **Optimizar reglas operacionales para maximizar rendimiento.** Los embalses en Puerto Rico no son manejados para optimizar su rendimiento seguro. Un ejemplo es el caso del sistema de los embalses interconectados del “*Sistema de Riego del Suroeste*”, construido en 1954 y compuesto por los embalses Yahuecas, Prieto, Guayo, Luchetti y Loco. Estos suplen agua de riego al Valle de Lajas y agua cruda a varias plantas de la AAA. Simulaciones llevadas a cabo por el DRNA y la AAA han confirmado que al optimizar la regla operacional de dicho sistema se podría aumentar su rendimiento seguro en aproximadamente 10 mgd, a pesar de su estado de sedimentación actual. Este aumento en su rendimiento seguro no depende de la utilización en conjunto con el agua subterránea.

Las estrategias #1, #2, #3 y #6 son medidas para aumentar el rendimiento seguro del sistema que a su vez contrarrestan el efecto de la sedimentación. Estas estrategias pueden ser útiles en mantener el rendimiento seguro total del sistema compuesto de fuentes superficiales y subterráneas. En contraste, las estrategias #4 y #5 reducen la tasa de extracción requerida para suplir las necesidades de los consumidores. La adopción de medidas dirigidas al manejo de la sedimentación y sus impactos, frecuentemente se aplican en combinación. Por ejemplo, en el caso del embalse Loíza, se recomienda la implantación de un conjunto de acciones incluyendo el tránsito de sedimentos para minimizar la tasa de acumulación, junto con las técnicas #1 y #4, presentadas anteriormente.

5.3.9 Prioridades de manejo de sedimentos

Todos los embalses están acumulando sedimentos, pero el control de la sedimentación es costoso, particularmente al considerar la opción del dragado. Esto nos lleva a la necesidad de implantar dos estrategias distintas para lidiar con el problema de la sedimentación. En esta sección se identifican los proyectos de manejo de sedimentos considerados de mayor prioridad y los más viables para su implementación rápida, ya que sus costos no son grandes y sus beneficios se extienden por más tiempo.

Loíza. La implantación del proyecto de tránsito de sedimentos en el embalse Loíza es un proyecto que se puede implantar rápidamente a un costo que no supera de \$1 millón. El único costo operacional de este sistema en los años subsiguientes, además de los costos operacionales actuales de la represa, podría ser la necesidad de un par de estaciones adicionales del USGS, un costo que no debe sobrepasar de \$70,000 al año. De la modelación

preliminar del transporte de sedimento se desprende que al implantar este sistema de manejo se podría reducir la tasa de sedimentación por la mitad, o sea, una reducción en la tasa de sedimentación en unos 150,000 m³/año. Considerando el costo de dragado en \$20/m³, los beneficios de este sistema son de \$3 millones al año. Es un proyecto en el que se repaga su inversión desde el primer año, por los costos futuros evitados.

Sistema Río Grande de Arecibo. Existen seis embalses en el río Grande de Arecibo contruidos para la producción de energía eléctrica. La ubicación de estos embalses y las cuencas afluentes a cada uno, se presenta de forma esquemática en la Ilustración 5.14. Además de la producción de energía hidroeléctrica en la planta de Dos Bocas y Caonillas, estos embalses suplen un promedio de 100 mgd a la planta de filtración Antonio Santiago Vásquez, y de allí al SACN.

De los 6 embalses en la cuenca, el único que aún no tiene un problema de sedimentación severo es Caonillas. El embalse Dos Boca ha perdido el 60% de su volumen, y el avance de sedimentos hacia la presa ya se presentó previamente en la Gráfica 5.9. El problema de la sedimentación en Dos Bocas se acentúa aún más debido a su regla operacional; el embalse siempre se mantiene a un nivel alto para mantener el transporte por lancha a propiedades en el otro lado del embalse (véase el contraste en los niveles en Dos Bocas y Caonillas en la Gráfica 5.14).

La situación de sedimentación es peor en los pequeños embalses Adjuntas, Pellejas, Viví y Jordán en la zona de la cabecera de la cuenca. Estos están totalmente llenos de sedimentos al igual que los túneles, por lo cual están inutilizables. Estos pequeños embalses no son importantes por su volumen de almacenaje, sino por su capacidad de desviar agua de la cuenca alta del río Grande de Arecibo hacia el lago Caonillas, el segundo embalse más grande en Puerto Rico. Bajo la situación actual, las aguas afluentes a esos cuatro embalses que están en la zona de mayor humedad de la cuenca, desbordan sobre pequeñas presas y fluyen hacia Dos Bocas, donde tampoco hay volumen para almacenar el agua debido a que se mantiene en su nivel tope. Las aguas sobrantes desbordan la presa Dos Bocas y siguen río abajo hasta el mar, en vez de llenar el lago Caonillas, según el diseño original.

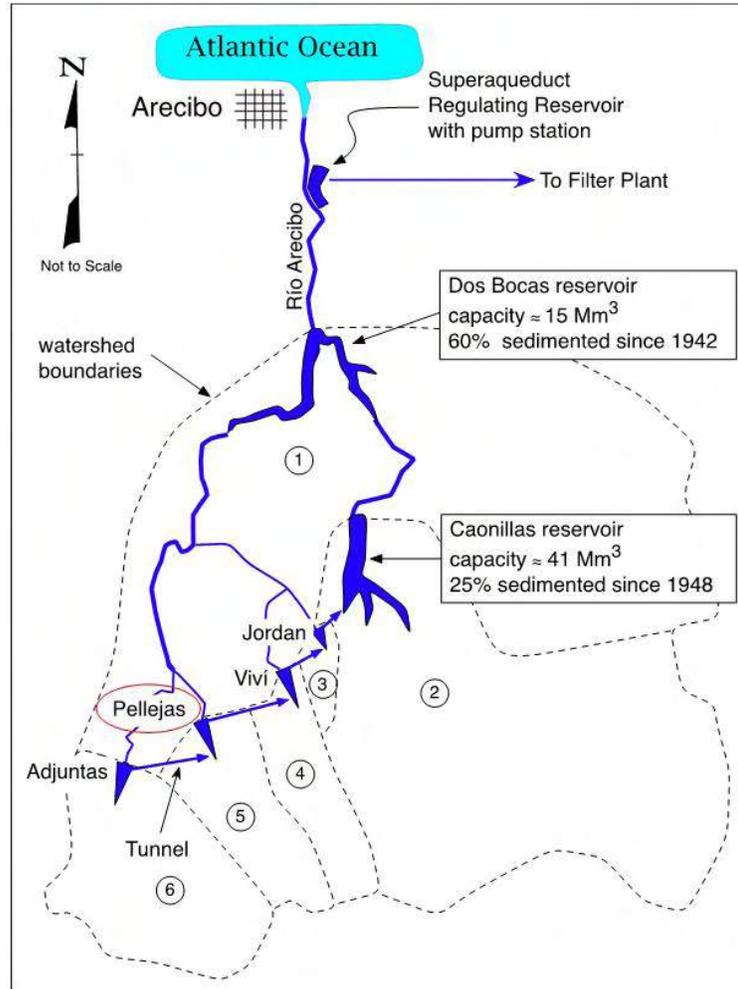
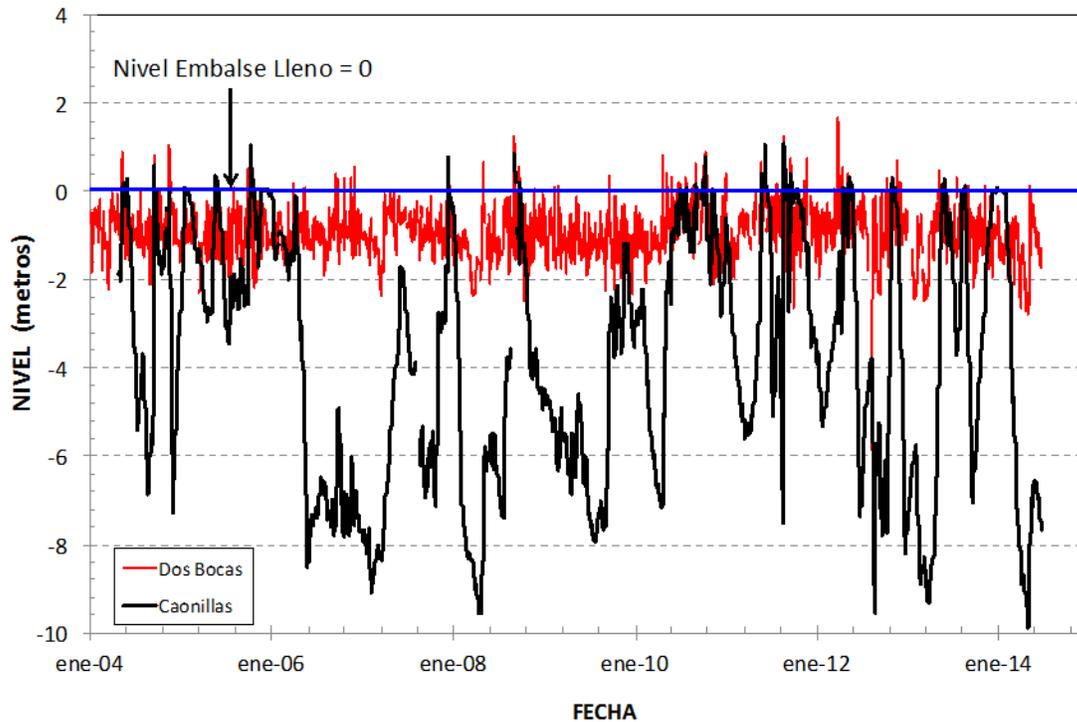


Ilustración 5.14 Cuenca del río Grande de Arecibo señalando la zona de la cabecera (sub-cuencas 3, 4, 5 y 6) cuya escorrentía podría aportar agua nuevamente al embalse Caonillas de resolverse el problema de sedimentación en los pequeños embalses Adjuntas, Pellejas, Viví y Jordán y sus túneles de desvío.

Las consecuencias de la sedimentación junto con las normas de operación, ocasionan una reducción en el rendimiento seguro de este sistema. De ocurrir una sequía en la cuenca del río Grande de Arecibo no se alcanzará el rendimiento de 100 mgd que el que se estimó para el diseño del SACN. Durante la sequía de 2015, se afectó el este de Puerto Rico, el centro-oeste recibió más lluvia de lo normal.

Para solucionar el problema de sedimentación en este embalse se recomiendan dos acciones inmediatas: (1) empezar el desarrollo de una estrategia de manejo de sedimentos en Dos Bocas y (2) llevar a cabo las modificaciones necesarias para rehabilitar el sistema de desviar agua hacia el embalse Caonillas mediante el manejo sostenible de los sedimentos en los embalses y túneles en la zona de la cabecera de la cuenca. En estos embalses pequeños ya

se han removido sedimentos en ocasiones previas, pero se llenan nuevamente. La estrategia recomendada es modificar las estructuras del vertedero y de las tomas para evitar que se obstaculicen con sedimentos.



Gráfica 5.14 Niveles de agua en Dos Bocas y Caonillas, mostrando que siempre se mantiene el nivel alto en Dos Bocas, mientras en Caonillas los niveles bajan sustancialmente y se mantienen bajos por periodos prolongados.

Abandonar el embalse. No siempre se puede justificar mantener en operación un embalse cuando los costos del control de la sedimentación son altos y los beneficios son limitados. Los embalses hidroeléctricos Comerío #1 y #2 fueron los primeros embalses abandonados en Puerto Rico, dejando de producir energía eléctrica a consecuencia del impacto de la sedimentación. En el caso del embalse de Coamo, se perdió su volumen y el embalse dejó de suplir agua al sistema de riego. El abandono del embalse no es equivalente al abandono de la estructura, porque la estructura actualmente se mantiene para asegurar que las aguas de crecidas pueden seguir pasando por encima del vertedero de la presa de manera segura. Uno de los proyectos ahora propuestos en el Plan de Agua es utilizar el embalse de Coamo nuevamente como punto de extracción de agua destinada para la recarga del acuífero en

Santa Isabel, aprovechando esta infraestructura en una forma diferente a su propósito y diseño original.

5.3.10 Recomendaciones

Frente a los problemas de sedimentación, existen alternativas viables para mantener los abastos de agua. Las represas y embalses no son infraestructuras que van a funcionar siempre a la perfección. Por el contrario, estas requieren un buen manejo para adaptar su utilización a las condiciones nuevas, incluyendo la acumulación de sedimentos. A continuación, se presenta un resumen de las recomendaciones para los embalses con mayor prioridad de acción en Puerto Rico.

Loíza. En el caso del embalse Loíza, se debe implantar el sistema de tránsito de sedimentos. Este es el sistema más costo-efectivo y rápido de implantar además de representar una estrategia sostenible a largo plazo. El dragado no se recomienda como alternativa principal para el manejo de sedimentos en Loíza debido a su costo y a las limitaciones en las áreas disponibles para el depósito de sedimentos. La reducción en las pérdidas y hurto del agua, un programa que ya está siendo encaminado por la AAA, es una estrategia de maximizar el aprovechamiento del agua disponible frente una reducción en el rendimiento seguro debido a la sedimentación de este embalse. También se puede compensar la reducción en volumen mediante un cambio operacional hacia la utilización conjunta del embalse con fuentes de agua subterránea.

SACN. El Superacueducto se suple de los embalses Dos Bocas, Caonillas y cuatro presas pequeñas que desvían agua de la zona de la cabecera de la cuenca hacia el embalse Caonillas. Dos Bocas ya ha perdido el 60% de su volumen y los cuatro pequeños embalses en la cabecera de la cuenca (Adjuntas, Pellejas, Viví y Jordán) están completamente sedimentados y no pueden desviar agua hacia Caonillas, según su diseño original. En este sistema las dos prioridades son (1) desarrollo de estrategias de manejo de sedimentos para Dos Bocas y (2) modificar las estructuras hidráulicas de las cuatro represas en la cabecera para habilitar nuevamente el desvío de agua hacia el embalse Caonillas, embalse que cuenta con la mayoría del almacenaje en esta cuenca.

Sistema Valle de Lajas. Se debe desarrollar e implantar una regla operacional para los embalses que suplen riego al Valle de Lajas y plantas de la AAA, con el propósito de optimizar su operación para aumentar su rendimiento seguro, sin perjudicar las operaciones hidroeléctricas. Este cambio en la regla operacional no requiere de obras civiles, más allá de lo necesario para mantener el sistema en un buen estado operacional. Este análisis también debe identificar los volúmenes necesarios a mantener en los diferentes embalses y las estrategias para el manejo de la sedimentación dentro del sistema.

5.4 Aguas Subterráneas

Los acuíferos representan la fuente de agua más económica en Puerto Rico, ya que pueden producir agua de calidad potable en las mismas áreas de demanda, con un nivel de tratamiento limitado a la desinfección. Sin embargo, los recursos subterráneos no se están explotando de una manera sustentable, lo que resulta en problemas de intrusión salina y de contaminación, según se describe en esta sección. También, en esta sección se presentan estrategias para atender los problemas más críticos relacionados con el manejo de los acuíferos.

5.4.1 Características de los acuíferos principales

Un acuífero es una formación geológica saturada con agua, cuya permeabilidad permite la extracción del agua en volúmenes significativos por medio de pozos. Hay formaciones subterráneas con mucha agua, como son las formaciones de arcilla. Sin embargo, no se considera como un acuífero ya que su permeabilidad es muy baja y el agua se mueve tan lentamente que no se puede extraer en volúmenes significativos. En Puerto Rico se pueden clasificar los acuíferos en cuatro clases generales, cada uno con características geológicas y necesidades de manejo y monitoreo diferentes.

Acuíferos de Roca Caliza. Los acuíferos principales de la costa norte consisten en las calizas, ubicadas generalmente desde el área de San Juan hasta Isabela. Su área de mayor desarrollo se extiende desde Toa Baja hasta Arecibo. La roca caliza desarrolla su permeabilidad por el proceso de disolución de la roca por la percolación del agua dulce. En la costa norte este acuífero recibe su recarga, principalmente de la lluvia, a través de la zona de los mogotes por la infiltración del suelo y por los sumideros. Hay zonas dentro de este acuífero que tienen

una capa de caliza poco permeable, lo que divide al acuífero entre una zona superficial y una zona inferior con agua confinada con condiciones de flujo artesiano. En general los depósitos aluviales en la costa norte son poco permeables debido a su contenido de arcilla.

Aluviones de la costa sur. La costa sur es mucho más seca que la costa norte. La tasa reducida de meteorización química causa que los suelos sean más arenosos. Los aluviones de la costa sur contienen formaciones de arena y grava de alta permeabilidad. Las fuentes de recarga de esta zona provienen de la lluvia, el lecho de los ríos y de la recarga producto de actividades humanas (ej. la filtración por los canales de riego en tierra que reciben agua de los embalses Carite, Patillas y Guayabal). Los acuíferos aluviales en el sur se extienden desde Patillas hasta Guánica.

Un factor determinante que propició una tasa alta de extracción en los acuíferos de la costa fue la recarga proveniente de los sistemas de riego. Ésta ha disminuido dramáticamente desde 1980, resultando en un balance de agua desfavorable en varias regiones de la costa sur. Los factores que limitan la utilización de los acuíferos de la costa sur son similares a la costa norte: contaminación por actividades humanas (derrames de químicos, descargas de pozos sépticos, contaminación con abonos agrícolas) y la intrusión salina.

Acuíferos aluviales del interior de la isla. En algunas zonas del interior de Puerto Rico existen depósitos aluviales que constituyen acuíferos de importancia. Por ejemplo, hay varios pozos en el Valle de Caguas que extraen agua del aluvión. Estos acuíferos se nutren por infiltración de los ríos y la lluvia.

La utilización de acuíferos aluviales está limitada por la contaminación provocada por las actividades humanas, particularmente los demarres de químicos industriales y de tanques de las gasolineras. Por ejemplo, los pozos de la AAA en Bairoa (Caguas) fueron clausurados por contaminación. En otra zona (Juncos) hay concentraciones altas de hierro y manganeso, pero estos contaminantes no representan riesgos de salud y son fáciles de remover. Los pozos del interior no tienen problemas de intrusión salina, pero los pozos se pueden secar cuando se extrae mucha agua durante una sequía.

Acuíferos de roca fracturada. Puerto Rico está compuesto principalmente de roca ígnea (basalto), la cual ha sido objeto de movimientos y desplazamientos resultando en fracturas y fallas geológicas. Estas fallas representan zonas permeables que pueden ser desarrolladas como acuíferos si un pozo penetra una zona de fractura que está interconectada con una

zona de recarga. Los pozos de mayor rendimiento en esta clase de sistema son aquellos que penetran un sistema extenso de fracturas que cuentan con un volumen de almacenaje significativo y una amplia área de recarga. Los manantiales en el centro de la Isla son puntos de descarga de estos acuíferos.

A pesar de que el rendimiento de los pozos en la roca fracturada normalmente es más bajo que los pozos de los acuíferos costeros, las comunidades en el interior tampoco son tan grandes como las comunidades en la costa. Por lo tanto, estos pozos pueden representar la fuente de agua más económica y confiable para suplir dichas comunidades.

Los principales factores limitantes para la utilización de la roca fracturada son: (1) la dificultad en identificar el sitio apropiado para el hincado del pozo y (2) el volumen limitado de almacenaje y de rendimiento. Dada la escasez de actividad industrial y la baja población en sus zonas de recarga, la contaminación en estos acuíferos no representa un problema. Al ubicar el pozo en un sistema de roca fracturada esto puede representar una fuente de agua más confiable que una fuente superficial en la misma zona debido a su amplio almacenaje y recarga.

5.4.2 La intrusión salina

La intrusión salina es un factor muy importante que limita la tasa de extracción de los acuíferos costeros y determina la localización de los pozos. La intrusión salina ha resultado en el cierre de pozos de abasto público tanto en la costa sur como la costa norte. Por ejemplo, el campo de pozos de la AAA en el área de Campanilla (río De La Plata) fue cerrado a consecuencia de la entrada de agua salina durante la sequía del 1967-68. Más reciente, algunos pozos en Salinas fueron clausurados debido a su salinización. Para maximizar la extracción sostenible de agua de un acuífero costero se requiere que la construcción y operación de los pozos tome en consideración la intrusión salina.

El agua dulce en un acuífero costero fluye desde las zonas de recarga hacia el mar, descargando por la boca de los ríos, por manantiales submarinos y filtración por el lecho del mar (Ilustración 5.15). En los acuíferos costeros existe un balance dinámico entre el agua dulce y el agua salina. El agua dulce es más liviana que el agua salada y “flota” sobre ésta dentro del acuífero (Ilustración 5.15A).

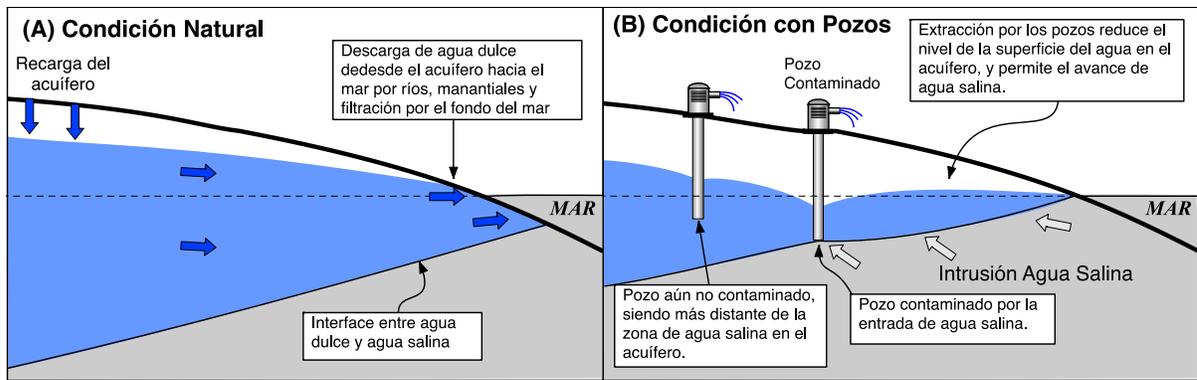
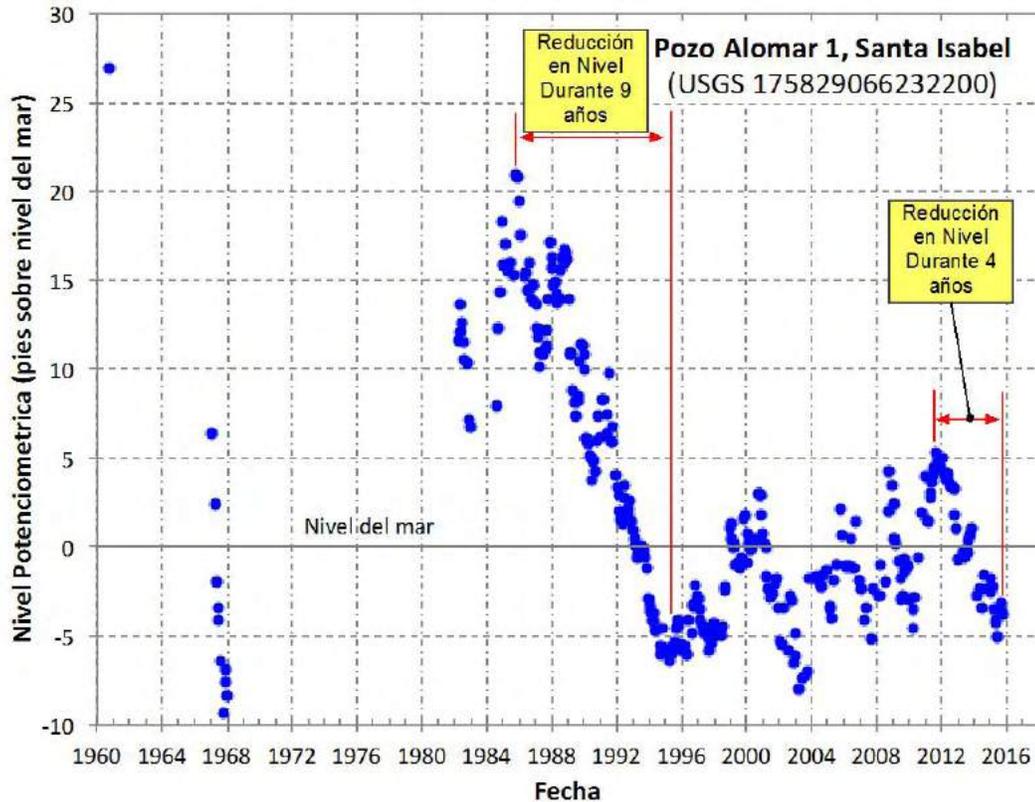


Ilustración 5.15 Proceso de intrusión salina. (A) Condición previa al desarrollo de pozos. (B) Modificación de los niveles de agua en el acuífero a consecuencia de la operación de pozos. La intrusión salina resulta en la contaminación de los pozos más cercanos a la costa.

El balance entre la recarga y la descarga establece el nivel normal del agua dentro del acuífero (Ilustración 5.15-A). Sin embargo, la operación de pozos cambia este balance, reduciendo los niveles en el acuífero y también reduciendo el flujo de agua hacia el mar. En respuesta al nuevo balance de agua, el agua salina avanza tierra adentro y hacia niveles superiores en el acuífero y eventualmente contamina los pozos, según se muestra en la Ilustración 5.15-B. Como consecuencia de la intrusión salina, el acuífero queda contaminado, lo que resulta en el abandono de pozos y la necesidad de relocalizarlos tierra adentro y extraer a una profundidad menor en el acuífero. Este proceso también reduce el volumen de almacenaje de agua dulce en el acuífero.

La relación entre el nivel de agua dulce sobre el nivel del mar en un acuífero y la profundidad hasta la interface con el agua salina, está determinada por la diferencia en densidad. Debido a esta diferencia, cada pie de elevación de agua dulce sobre el mar puede desplazar el agua salina hasta una profundidad de 40 pies debajo del nivel del mar dentro del acuífero. Esto se conoce como la relación Ghyben-Herzberg. Por esto, al bajar la superficie del agua en el acuífero, el agua salada puede empezar a subir dramáticamente. Cuando el nivel del agua en el acuífero se mantiene igual o inferior al nivel del mar, como es el caso de varios lugares en la zona de Santa Isabel, la respuesta del agua salada es moverse hacia arriba dentro del acuífero, con el potencial de contaminar la zona de bombeo. Este movimiento es lento, sin embargo, la recuperación es aún más lenta. Una vez que ha sido contaminado por intrusión salina, se pueden requerir décadas para descontaminar la zona inferior del acuífero.

Mantener el acuífero a un nivel inferior al del mar no es una práctica de manejo sostenible, ya que se induce el avance de intrusión salina y se facilita el desplazamiento de casi toda el agua dulce en la zona de depresión, quedando sólo agua salobre en la zona. La depresión del nivel de agua en el acuífero de Santa Isabel es una zona de preocupación particular. El historial de niveles en el pozo de observación Alomar-1 se presenta en la Gráfica 5.15, en la que se puede observar periodos prolongados con el nivel freático inferior al nivel del mar.



Gráfica 5.15 Niveles en el pozo de observación Alomar-1, Santa Isabel, indicando periodos prolongados de depresión del agua en el acuífero a niveles inferiores al nivel del mar (Datos del USGS).

5.4.3 Cambio en el balance de agua en la costa sur

Contexto de manejo de los acuíferos del sur. Los acuíferos del sur, que van desde Guánica hasta Patillas, consisten de múltiples valles aluviales que ocupan una zona aproximadamente de 1.5 a 3 millas de ancho entre la franja de las montañas de roca ígnea y el mar. Al oeste de Ponce, los acuíferos aluviales están asociados a los valles de los ríos Tallaboa, Guayanilla, Yauco, Loco y el Valle de Lajas. La Ilustración 5.16 muestra la zona considerada crítica debido a un balance desfavorable entre la recarga y la extracción del acuífero, con el riesgo de

intrusión salina excesiva. Esta zona crítica se extiende desde Ponce a Arroyo, pero el problema más severo ocurre en las áreas de Santa Isabel y Salinas.

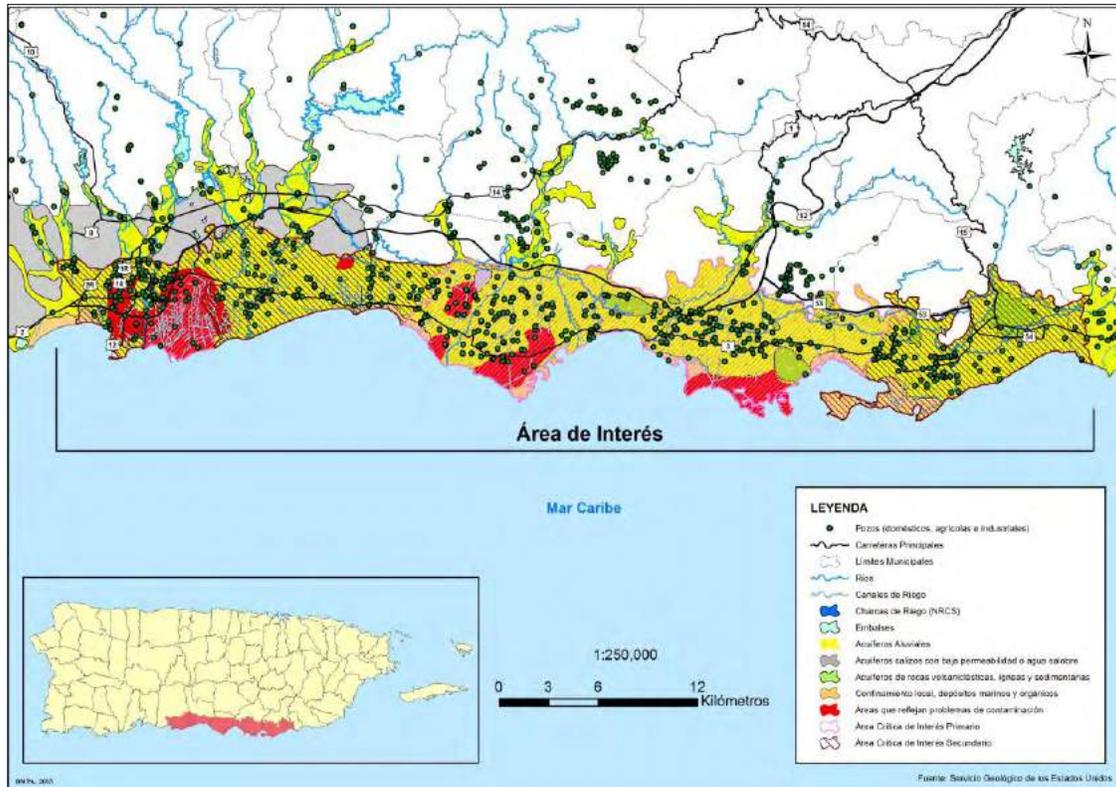


Ilustración 5.16 Mapa indicando la zona desde Ponce a Guayama considerada crítica por el balance desfavorable entre las tasas de recarga y extracción.

Condición histórica en el acuífero de la costa sur. El desarrollo en gran escala de los acuíferos de la costa sur empezó a principio del siglo XX con la instalación de pozos profundos para proveer riego para la siembra de caña de azúcar. Esto respondió a la combinación de grandes inversiones en la industria azucarera junto con el desarrollo de la tecnología de pozos con motores eléctricos. Durante el periodo 1913-1914, también entraron en servicio los embalses Guayabal, Patillas, Carite y Coamo, este último está fuera de servicio por sedimentación. El embalse Carite se ubica en la zona de la cabecera del Río de La Plata y desvía agua a la costa sur mediante un túnel. Estos embalses suplen agua para riego mediante los siguientes canales:

- Juana Díaz – Embalses Guayabal y Coamo
- Patillas – Embalse Patillas
- Guamaní – Embalse Carite

Todos los canales son de tierra, lo que permite infiltración por su fondo hacia el acuífero. Aproximadamente el 35% del riego regresaba al acuífero, según se aprecia en la Ilustración 5.17. Se puede observar que, para un año promedio, durante el principio de la década de 1960, la contribución de recarga por riego (28,000 AP/año) fue superior a las fuentes naturales de recarga por los ríos y la lluvia (25,000 AP/año). Este volumen de recarga suplido por los sistemas de riego permitió a su vez el bombeo de caudales altos.

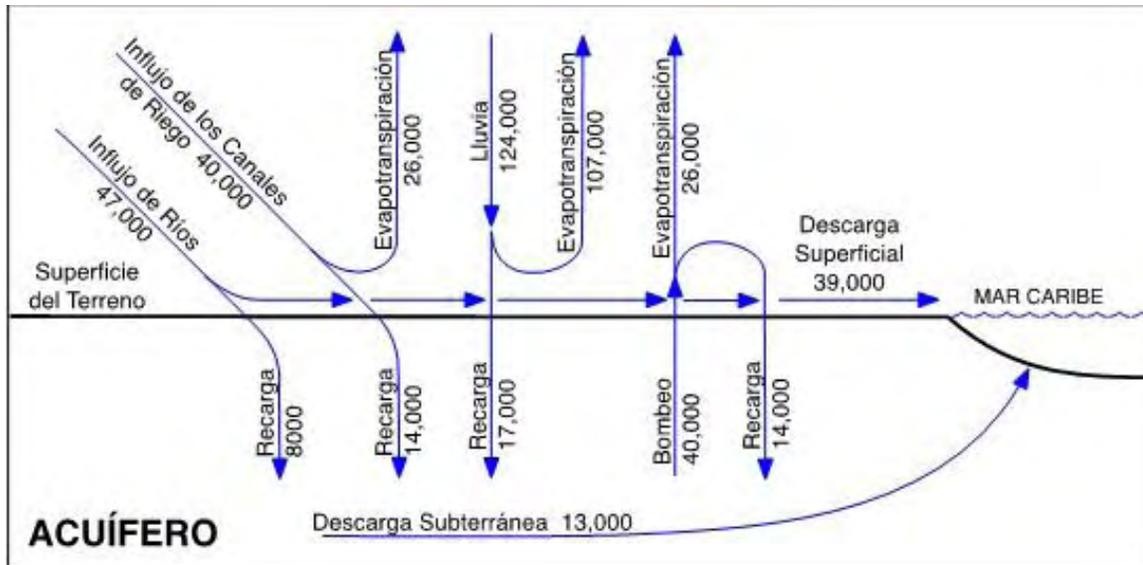


Ilustración 5.17 Balance de agua en la zona entre Salinas y Guayama para un año de lluvia promedio al principio de la década de 1960 (reproducido de Mc Clymonds y Díaz, 1972).

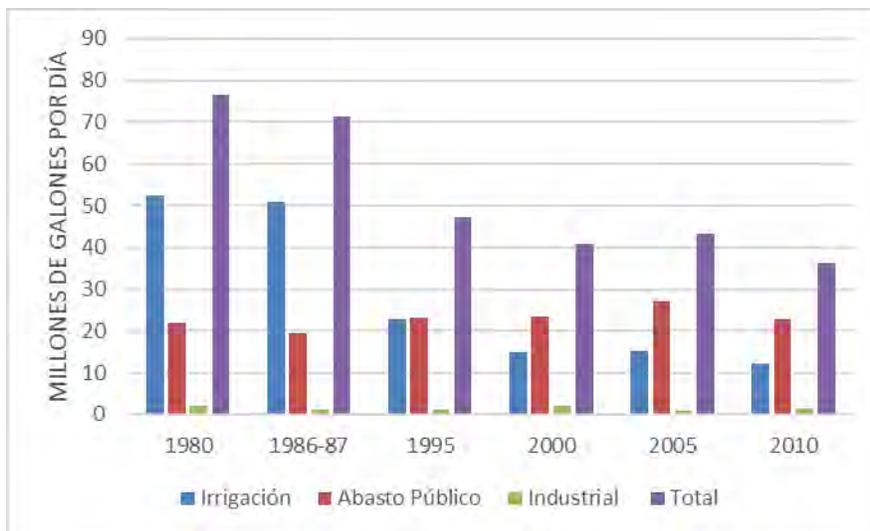
Condición actual en los acuíferos del sur.

Los acuíferos de la Región Sur son una fuente importante de agua para consumo humano y actividades agrícolas, produciendo aproximadamente el 53 por ciento de toda el agua que se utiliza en la zona. La fuente principal de agua potable en los municipios de Salinas, Santa Isabel, Coamo y Guánica son los acuíferos aluviales. Se extrajeron 48.59 mgd de los acuíferos en la Costa Sur, desde Guánica hasta Patillas, de los cuales 30.58 mgd se extrajeron para uso doméstico, 16.41 mgd para fincas agrícolas y 0.45 mgd para industrias (Molina, 2010).

Históricamente una de las fuentes de recarga más importantes para los acuíferos de la Región Sur ha sido la infiltración de agua de riego suplido por los embalses Patillas, Carite y Guayabal; por los fondos de los canales de transmisión en tierra; y por la práctica de riego por surcos. La reducción en el área bajo riego, el incremento en la utilización del agua de los embalses y canales para uso doméstico y la utilización de sistemas de riego de mayor eficiencia son

factores que han producido una merma significativa en la recarga artificial de los acuíferos en la Costa Sur durante los últimos 30 años.

La problemática con el sistema de los acuíferos del sur viene agudizándose desde la década de los 90. Los suelos agrícolas de la costa sur fueron regados con una combinación de agua de los acuíferos locales y de los canales de riego para el cultivo de la caña de azúcar. El riego de este cultivo se hacía mediante inundación de los terrenos. El exceso de agua que no se evapotranspiraba, 26 mgd (Kuniansky, Gómez & Torres, 2004), se infiltraba al acuífero. Todo este proceso resultaba en una recarga de los acuíferos mayor a la que ocurriría naturalmente. A principios de la década de los 90 finaliza el cultivo de la caña en el sur y los nuevos cultivos se riegan con aguas subterráneas mediante el método de riego por goteo. El uso de los acuíferos como fuente de agua potable se intensifica y pasa a ser el uso principal del agua del acuífero. Esto resulta en una sobreexplotación de los acuíferos, pues ya se había eliminado la recarga artificial que resultaba del riego por inundación de los terrenos agrícolas con agua de los canales. La reducción en el área bajo riego y menos cuerdas que utilizaban agua de los canales y un sistema de riego por goteo que dejó de utilizar agua de los canales y empezó a utilizar agua subterránea, son factores que han producido una merma significativa en la recarga de los acuíferos en la Costa Sur durante los últimos 20 años. En la Gráfica 5.16 se puede observar cómo han variado los usos del agua en la zona desde la década de los 80.



Gráfica 5.16 Historial de extracciones desde Ponce hasta Patillas.
Fuente: Rodríguez & Gómez, 2009.

La condición precaria en que se encuentra la calidad de las aguas de algunos de los acuíferos del sur fue causal para declarar los mismos en estado crítico. La Secretaria del DRNA tomó esta medida implantando lo que dicta el Artículo 5 (d) de la Ley Núm. 136 de 3 de junio de 1976, según enmendada, Ley para la Conservación, el Desarrollo y Uso de los Recursos de Agua de Puerto Rico (Ley de Aguas), la cual dicta que la Secretaria puede: “Establecer áreas o distritos de aguas en estado crítico y adoptar con referencia a ellas las normas especiales y el sistema de prioridades que se precise para garantizar su mejor conservación, uso y aprovechamiento”.

El objetivo de establecer como área crítica varios de los acuíferos del sur es viabilizar la adopción de normas especiales para atender los problemas de sobreexplotación, contaminación e intrusión salina que están ocurriendo en estos acuíferos. De no ser atendidos con premura estos asuntos y perpetuarse los problemas, éstos pueden provocar daños irreparables y permanentes a la fuente de agua principal y en algunos casos la única fuente de agua que tienen los municipios del sur. Urge preservar, optimizar y restaurar las aguas subterráneas para poder garantizar el equilibrio entre la extracción y la recarga hasta conseguir el buen estado de los acuíferos del sur. Hay que invertir la tendencia sostenida en el descenso del nivel freático en los acuíferos del sur a consecuencia de la actividad humana para detener la contaminación de las aguas subterráneas con sólidos totales disueltos.

El carácter urgente que tiene la intervención del Estado para atender este problema es que estos acuíferos son la fuente de agua potable para cerca de 130,000 personas en la zona sur de Puerto Rico y para riego de los suelos agrícolas del sur de la Isla. Actualmente, estos acuíferos presentan contaminación por sólidos disueltos (intrusión salina) y nitrato. Esta contaminación compromete la calidad del agua de los acuíferos para uso agrícola y agua potable. De prolongarse este problema llegará el momento en que el acuífero no será apto para uso alguno y habrá que invertir en la restauración del mismo. Es deber del DRNA proteger los recursos de agua del País, en especial en zonas como ésta, donde el desarrollo de fuentes de abasto alternas requeriría inversiones cuantiosas de dinero.

Dentro del área delimitada declarada como crítica existen 615 pozos aproximadamente, según datos del 2010 del USGS (Molina, 2010). Estos se desglosan de la siguiente manera:

Los acuíferos del sur que están siendo sobreexplotados y que presentan algún tipo de contaminación o tendencia en esa dirección son incluidos en la Declaración de Área Crítica

(Ilustración 5.18). Estos son los acuíferos que ubican en los municipios de Ponce, Juana Díaz, Santa Isabel, Salinas, Guayama y Arroyo.

Tabla 5.8 Pozos dentro del área crítica de los acuíferos del sur.

Uso del Pozo	Cantidad de Pozos
Industrial-Comercial	91
Domésticos	164
Agrícolas	278
AAA	82
Total	615

Fuente: Molina, 2010.

El 21 de julio de 2015 se promulga el Boletín Administrativo OE-2015-026 con el propósito de establecer la política pública para el uso y manejo de los acuíferos del sur. Cumpliendo con las directrices específicas de la orden, se desarrolló el Plan de Manejo y Restauración de los Acuíferos del Sur. Este Plan es el resultado de la colaboración de las 15 agencias pertenecientes al Grupo de Trabajo creado por el Boletín. Dicho documento contiene las estrategias y acciones que deben desarrollarse en el corto, mediano y largo plazo, concentrándose en alternativas viables para resolver el problema de sobreexplotación de las aguas subterráneas y la consecuente contaminación por intrusión salina.

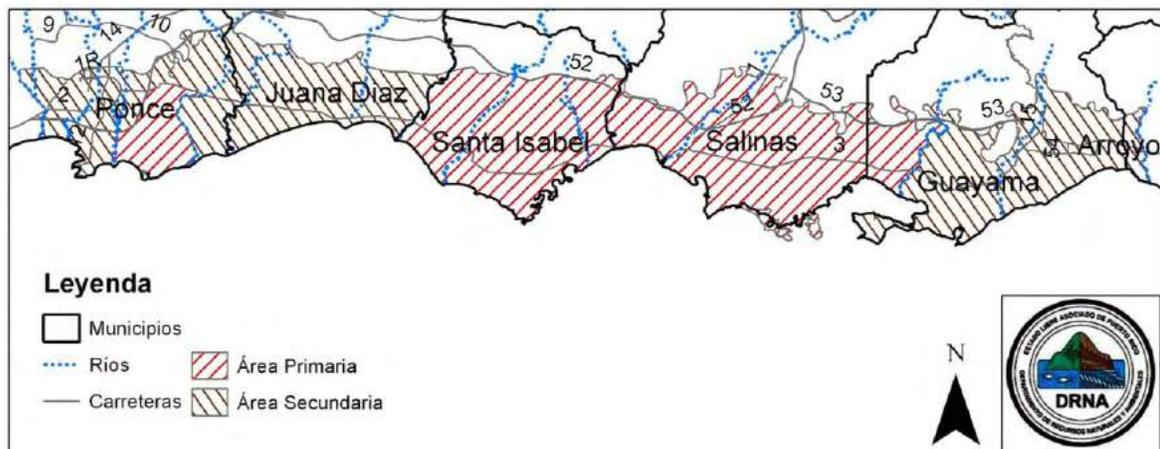


Ilustración 5.18 Área crítica de los acuíferos del sur.

Las estrategias contenidas en el Plan de Manejo y Restauración están incorporadas en esta versión del PIRA. La implantación de algunas de ellas son propuestas a nivel nacional,

mientras que otras son de carácter puntual para los acuíferos del sur. Entre las estrategias puntuales se encuentra la implantación de la Zona de Evaluación Especial por parte de la Junta de Planificación y la Oficina de Gerencia de Permisos. Ésta va dirigida a la evaluación de proyectos en los terrenos sobre la cuenca que nutre a los acuíferos del sur, o que se abastecen de éstos, y establece condiciones para los nuevos desarrollos. Se propone, además, la calibración, con datos nuevos, de los modelos desarrollados por el USGS para los acuíferos en peor estado, como son los de Santa Isabel y Salinas.

En los municipios de Salinas hasta Arroyo, parte del agua de los sistemas de riego ha sido desviada para el uso doméstico. Las plantas de filtración que utilizan las aguas de los embalses de Carite y Patillas aparecen en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9 Plantas de Filtración Servidas por los Embalses Carite y Patillas.

Nombre	Capacidad de Diseño, mgd	Producción Normal, mgd	Fuente de Agua
Farallón (Cayey)	7	5.2	Embalse Carite (toma flotante en el lago)
Guayama Urbano	6	5.5	Embalses Carite y Patillas (via canal)
Patillas Urbano	6	4.5	Embalse Patillas (toma flotante en el lago)

La AAA también extrae agua de pozos de los acuíferos del sur. Previo al verano de 2015, cuando se ordenó una reducción en el bombeo, las tasas de extracción fueron de 3.96 mgd en Salinas y 6.47 mgd en Santa Isabel. Luego de la ordenanza, la extracción en Salinas se redujo un 26% y un 33% en Santa Isabel. El bombeo de todos los pozos de la AAA en la costa sur (Guánica a Patillas) fue de 21.57 mgd en 2014⁶.

Diferente a los sistemas de riego tradicionales, las aguas domésticas usadas contribuyen muy poco a la recarga. Las aguas servidas desde Salinas hasta Patillas se recogen y dirigen hacia la planta de tratamiento regional de Guayama, y luego son utilizadas para enfriamiento en la planta de energía de AES-Puerto Rico o son descargadas hacia el mar. En Santa Isabel, las aguas de su planta de tratamiento se descargan hacia el mar luego de recibir tratamiento secundario. La planta regional de Ponce descarga al mar mediante emisario marino luego de tratamiento primario.

⁶ Dato provisto en comunicación personal por el USGS como dato preliminar sujeto a revisión y cambio.

Otro factor que ha afectado adversamente el balance en el acuífero ha sido el cambio de tecnología en los sistemas de riego. Los sistemas de riego por aspersión y por goteo son mucho más eficientes que el riego por surco, por lo que muy poca agua se infiltra como recarga hacia el acuífero. Este cambio en el balance de agua en la costa sur se presenta conceptualmente en la Ilustración 5.19. Debido a que los acuíferos de la costa sur son pequeños, su nivel puede bajar significativamente durante las sequías, según se puede apreciar en la Gráfica 5.15 y la Gráfica 5.17.

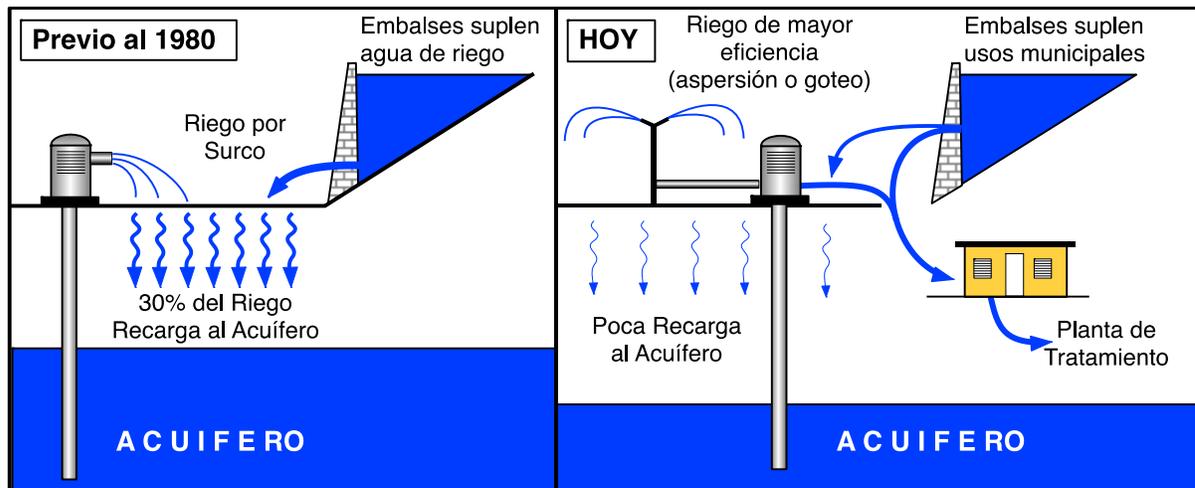
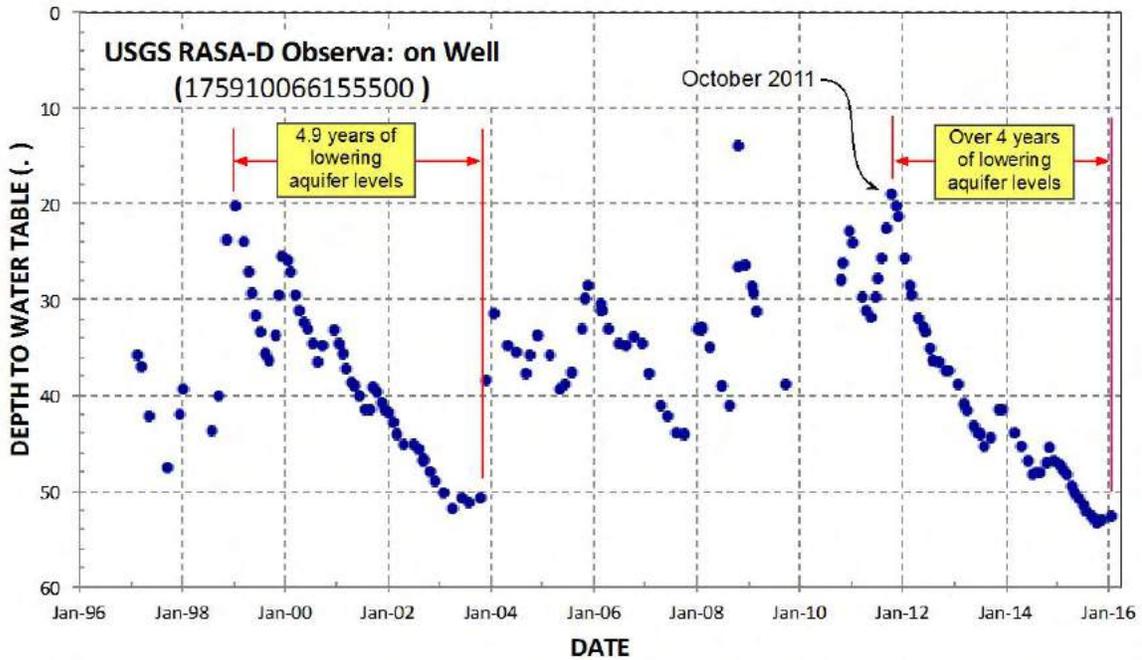


Ilustración 5.19 Cambio en el balance de agua en el acuífero debido a cambios en el patrón y tecnología de la utilización del agua.

Estrategia de restauración. Ante el problema del balance de agua no-favorable y no-sostenible de los acuíferos en los municipios de Salinas y Santa Isabel, existen dos estrategias alternas: (1) minimizar la extracción del agua, o (2) incrementar la recarga del acuífero. Un análisis preliminar realizado por la AAA reveló que sería muy costoso sustituir los pozos actuales con fuentes superficiales. Reconociendo que el agua subterránea representa una fuente de agua económica en la zona y ante la falta de recursos superficiales alternos de costo razonable, es muy deseable mantener esta fuente de abasto. Por tal razón, la reducción de extracción de agua como estrategia es una temporal a corto plazo. Para la segunda estrategia, existen alternativas muy económicas para mejorar el balance del agua mediante el aumento de la recarga. En las siguientes secciones se resumen las estrategias seleccionadas para rehabilitar los acuíferos de Salinas y Santa Isabel a través del aumento de la recarga, para así poder mantener de forma sostenible la tasa de extracción que prevaleció antes de la sequía de 2015.



Gráfica 5.17 Variación en el nivel de agua en el pozo de observación Rasa-D, Salinas. Se puede observar que los niveles en el acuífero pueden bajar durante 4 años consecutivamente y que los niveles actuales están en el punto más bajo del récord (datos del USGS). Este pozo de observación está cercano el campo de pozos de la AAA en Salinas, según localizado en la Ilustración 5.22 y la Ilustración 5.25.

5.4.4 Restauración del acuífero de Salinas

Históricamente el acuífero de Salinas recibía recarga por lluvia a través de los suelos, por el lecho del río Nigua en Salinas, mediante infiltración por los canales de Guamaní y Patillas (ambos canales en tierra) y por los sistemas de riego por surco (inundación), según previamente presentado en la Ilustración 5.13. A pesar de una alta tasa de extracción, en el pasado se mantenía un balance adecuado debido a la cantidad de recarga que recibía el acuífero la cual incluía una gran cantidad de agua del sector agrícola, estimada en aproximadamente 26 mgd (Kuniansky, Gómez y Torres, 2004).

Al presente el agua del embalse Carite que suple al canal de Guamaní está comprometido para suplir a la AAA y varios usuarios agrícolas. Sin embargo, simulaciones hidrológicas del embalse Patillas, cuyo rendimiento es mayor que el de Carite, demuestra que éste tiene el potencial de suplir un caudal substancial para la recarga al acuífero. La mayoría del agua proveniente de la cuenca del embalse Patillas no se almacena en el embalse, sino que se desborda sobre la presa y fluye hacia el mar. Una alternativa es utilizar agua del embalse para desviarla hacia el canal de Patillas, para ser utilizada como fuente de recarga.

Condición de seguridad del embalse Patillas. La represa Patillas fue construida entre 1912 y 1914 utilizando relleno hidráulico (*hydraulic fill*), resultando en un muro muy impermeable pero susceptible a colapso a causa de licuefacción que pueda ocurrir como consecuencia de un terremoto. En el año 2015⁷, estudios nuevos determinaron que el riesgo sísmico en el área de Patillas es mayor de lo antes calculado, resultando en uno inaceptable para la población ubicada aguas abajo del embalse. Para reducir el riesgo de un colapso repentino, en febrero de 2016 se bajó el nivel máximo operacional del embalse de 222 pies a 210 pies, siguiendo recomendaciones del U.S. Bureau of Reclamation. Esto eliminó el 30% del volumen del embalse hasta que se pueda re-construir la presa, lo cual puede tomar hasta 10 años de acuerdo a la disponibilidad de fondos.

Revisión de la regla operacional del embalse. Se desarrolló una regla operacional para el embalse con dos objetivos: (1) mantener el servicio de agua a los usuarios existentes bajo la limitación impuesta por la reducción en el nivel del embalse, y (2) desviar un caudal de agua significativo hacia el canal de Patillas durante periodos lluviosos, para recargar el acuífero. Esta recarga ayudará a mantener altos los niveles del acuífero, maximizando el volumen de agua almacenada disponible para la extracción en periodos de sequía.

Esta regla se desarrolló a base de los niveles operacionales descritos en la Ilustración 5.20. Se da prioridad a las entregas a los usuarios existentes y solamente se desvía agua hacia el canal de Patillas cuando el nivel se encuentra en la “Zona de Recarga”.

Tanto la regla actual como las reglas alternas para el manejo del embalse fueron analizadas mediante una simulación de la operación diaria que utilizó datos para un periodo de 50 años (enero 1966 a enero 2016) del caudal de los ríos afluentes al embalse (Grande de Patillas y Marín⁸). El modelo fue calibrado utilizando los datos diarios preliminares del USGS para el caudal afluente y niveles del embalse y la tasa de extracción según informado por la AEE y la AAA (Tabla 5.10). Luego de analizar varias alternativas, se identificó una modificación a la regla operacional del embalse recomendada, resumida en la Tabla 5.10.

⁷ En esta sección se presenta un resumen de la regla operacional propuesta para el embalse Patillas (ver Apéndice 4).

⁸ La serie del río Marín es más corta que la del río Grande de Patillas. Por esta razón, para el periodo inicial se estableció la relación entre las dos estaciones de aforo para estimar el caudal total.

Tabla 5.10 Usos de Agua del Embalse Patillas en 2015

Usuario	pcs	mgd
AAA, PF de Patillas (toma flotante en el embalse)	7.0	4.5
Canal de Patillas (riego, otros usuarios y 4.6 mgd para PF de Guayama)	21.0	13.5
Evaporación del embalse (por calibración)	<u>0.5</u>	<u>0.3</u>
Totales	28.5	18.4

Nota: PF = Planta de Filtración de la AAA. 1 mgd = 1.55 pcs (pie cúbico por segundo).

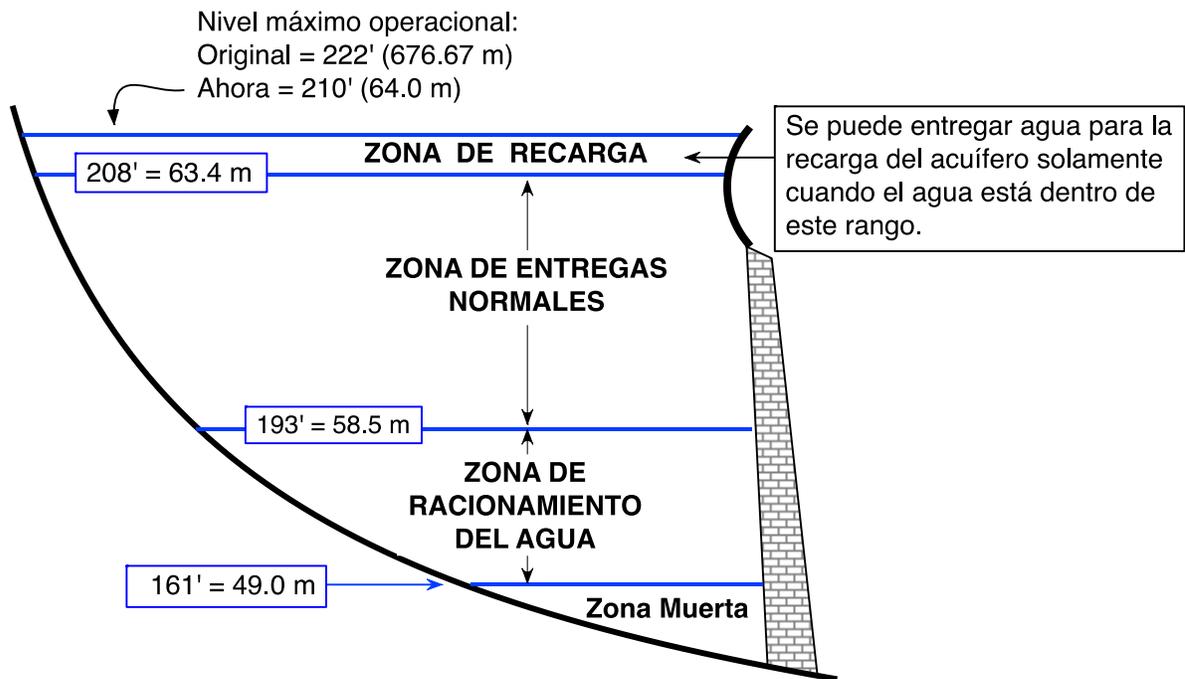
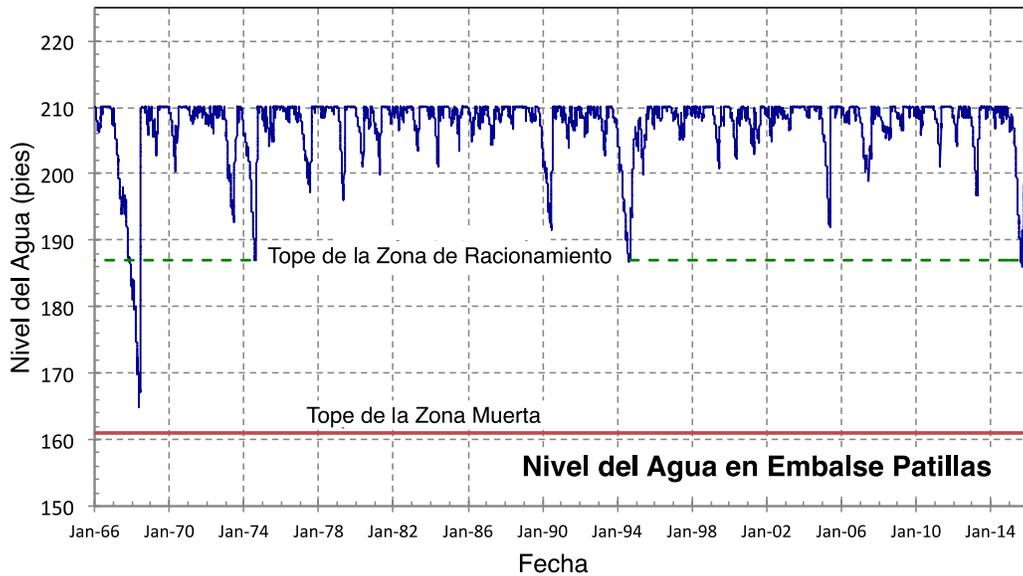


Ilustración 5.20 División del embalse Patillas en diferentes zonas según la tasa de extracción de acuerdo con la regla operacional propuesta.

Tabla 5.11 Zonas Operacionales Recomendadas para el Embalse Patillas.

Nivel en pies	Descripción Operacional	Zona Operacional
210.0 – 208.3	Blanco. Zona control por seguridad de inundación (puede recargar al acuífero).	Recarga
208.3 – 204.0	Verde. Zona segura (operación normal, sin recarga).	Normal
204.0 – 193.0	Azul. Análisis de la situación.	Normal
193.0 – 187.0	Amarillo. Análisis de la situación.	Racionamiento
187.0 – 181.5	Anaranjado. Ejecución planes control de abastos.	Racionamiento
181.5 – 161.0	Rojo. Zona crisis.	Racionamiento
< 161.0	Zona Muerta.	

La Gráfica 5.18 presenta el comportamiento de los niveles en el embalse, según la serie de flujo histórico, incluyendo la entrega a los usuarios existentes y 15 pcs adicionales para la recarga del acuífero. La sequía de mayor intensidad en el récord hidrológico fue del 1967-68 y representó la gran mayoría de los días de racionamiento en la simulación.



Gráfica 5.18 Comportamiento diaria del nivel de agua en el embalse Patillas con un nivel máximo de 210 pies y con entregas de 15 pcs para la recarga del acuífero cuando el nivel se encuentre en la zona de recarga (zona Blanca).

Tabla 5.12 Disponibilidad de Recarga del Embalse Patillas por Año.

Año	Días de Recarga al Acuífero	Volumen de Recarga Disponible, AP	Flujo Promedio de Recarga	
			pcs	mgd
2010	280	8,331	11.5	7.4
2011	225	6,694	9.2	6.0
2012	207	6,159	8.5	5.5
2013	211	6,278	8.7	5.6
2014	278	8,271	11.4	7.4
2015	57	1,696	2.3	1.5

Nota: AP = acre pies (43,560 pies³). De modo de comparación, la tasa de extracción de los pozos de Salinas por la AAA es de aproximadamente 3 mgd.

Según las gráficas 5.15 y 5.17, el periodo de reducción progresivo de los niveles en los acuíferos del sur dura de 4 a 5 años. Sin embargo, el resultado de la simulación en la gráfica 5.17 demuestra que los periodos de sequía y reducción en el nivel del embalse Patillas son mucho más cortos que en los acuíferos, aproximadamente de 9 meses.

La frecuencia y volumen de entregas disponibles para la recarga están resumidas en la Tabla 5.12, señalando que existe un volumen sustancial disponible para la recarga en la mayoría de los años. Esto implica que, anualmente se puede recargar el acuífero con aguas del embalse, para asegurar que el mismo cuente con la reserva necesaria para suplir agua de manera sostenible al ocurrir una sequía. De haberse aplicado esta regla durante los años 2012 al 2014, el acuífero hubiese estado en mejor condición para afrontar la sequía de 2015.

En resumen, con la regla operacional propuesta, se propone: (1) mantener los usos existentes del embalse, (2) evitar el racionamiento de agua en el sistema de pozos de la AAA en Salinas, y (3) recuperar los niveles de agua en el acuífero para lograr el equilibrio de éste y para el beneficio de los usuarios domésticos y agrícolas.

Técnica para realizar recarga del acuífero. La estrategia seleccionada para la aplicación del volumen de recarga disponible del embalse Patillas se determinó a base de varias consideraciones. Primero, una característica importante es la distribución de la conductividad hidráulica dentro del acuífero. Las zonas de mayor producción de agua en el acuífero aluvial en Salinas consisten de los depósitos permeables de grava y arena depositadas por el río Nigua. Estos depósitos ancestrales rinden un buen caudal a los pozos. En la Ilustración 5.21 se señala la conductividad hidráulica del acuífero en la zona de Salinas con la localización del campo de pozos de la AAA sobrepuesto. También se ilustra la ubicación del pozo Rasa-D, cuyo comportamiento se presentó en la Gráfica 5.16. La zona de mayor conductividad hidráulica corresponde a los depósitos de arena y grava depositados cercanos al curso actual del río Nigua. Mientras, que las zonas más distantes del río, donde había una mayor deposición de material fino, se caracterizan por conductividad hidráulica menor.

La aplicación de recarga al acuífero requiere que el agua superficial pueda penetrar la superficie e infiltrar hacia el acuífero, un proceso presentado de manera esquemática en la Ilustración 5.22. Se descartó la alternativa de utilizar pozos para inyectar agua directamente hacia el acuífero debido a la tendencia a tupirse por la combinación de los sedimentos finos y el crecimiento de bacterias que se alimentan del material orgánico presente en el agua superficial.

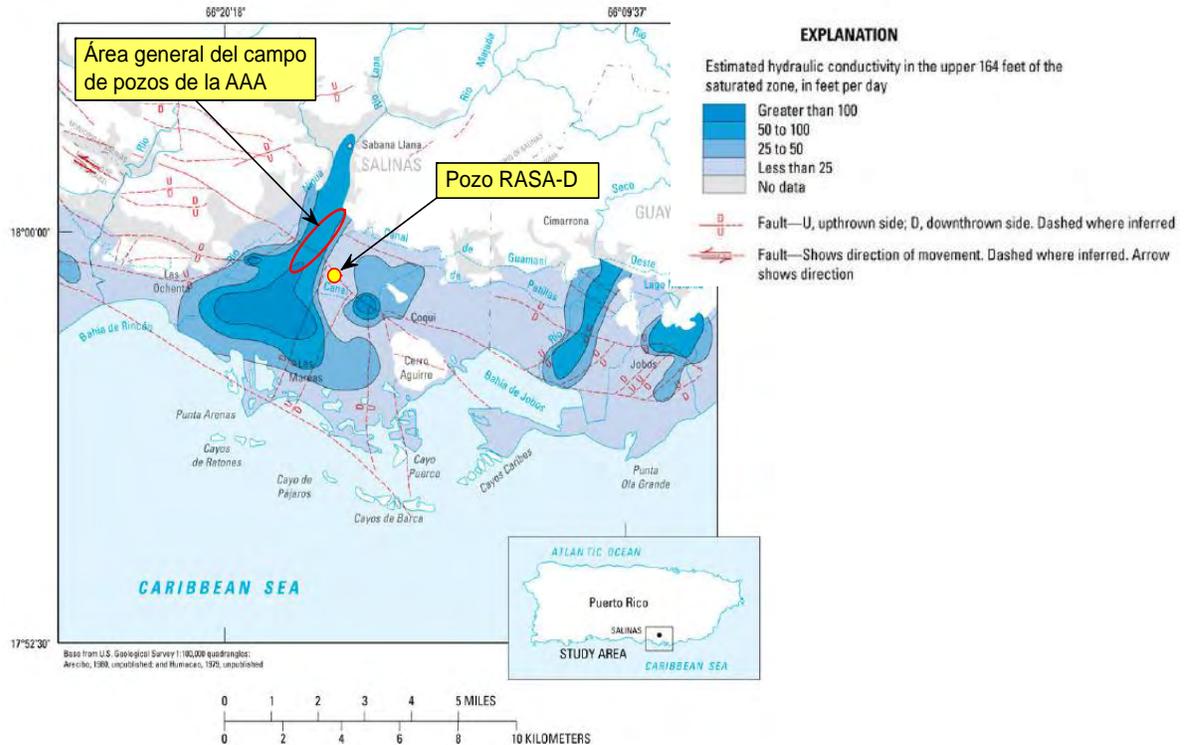


Ilustración 5.21 Localización del pozo de observación RASA-D en relación al campo de pozos de la AAA que suple al área urbana de Salinas (localización sobrepuesto sobre mapa presentada por Kuniansky y Rodríguez, 2010).

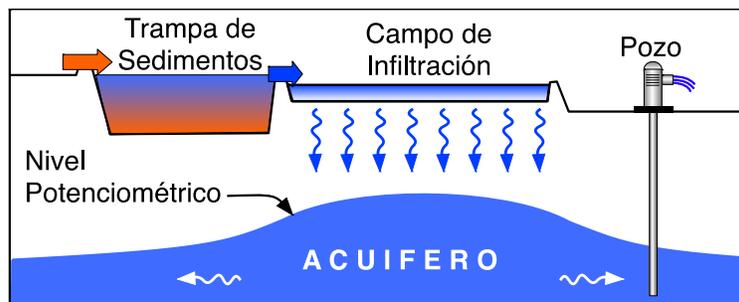


Ilustración 5.22 Concepto de recarga al acuífero con agua desviada de un río, utilizando una trampa de sedimentos previo al campo de infiltración.

Para controlar la intrusión salina hacia la zona de bombeo de la AAA, el agua de recarga se puede infiltrar entre el campo de pozos y el mar, o aguas arriba de los pozos, según presentada en la Ilustración 5.23. Ambas estrategias de aplicación de recarga deben ser viables en Salinas. Éstas se lograrían mediante la utilización de los canales de Patillas y de Guamaní, respectivamente, en las localizaciones señaladas en la Ilustración 5.24. Se propone desviar agua superficial hacia el acuífero en tres áreas mediante dos técnicas: (1) enviando agua al cauce del río Nigua, una vía de recarga natural y (2) mediante campos de infiltración sobre suelos permeables y que contienen vegetación o cosechas que son tolerantes a la aplicación de riego en exceso (ej. pasto de corte o caña de azúcar).

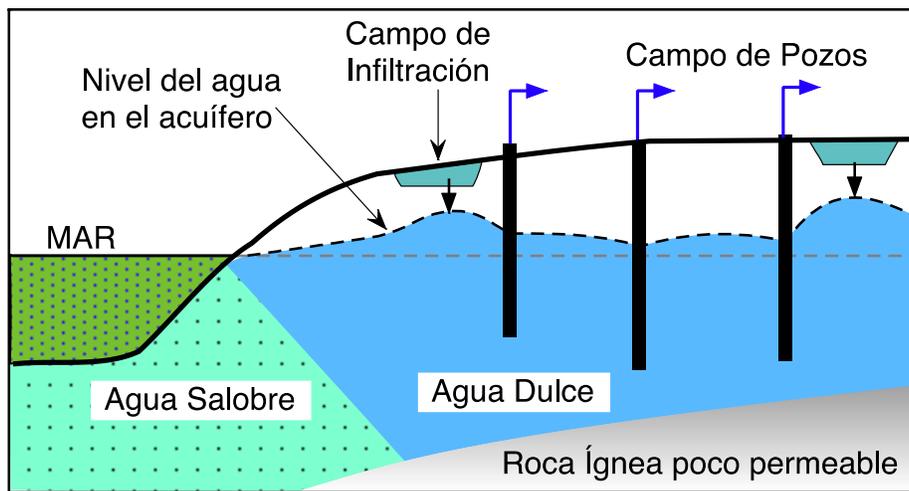


Ilustración 5.23 Alternativas para infiltrar aguas de recarga para combatir la intrusión salina en un acuífero aluvial sobre roca ígnea (modificado de Driscoll, 1986).

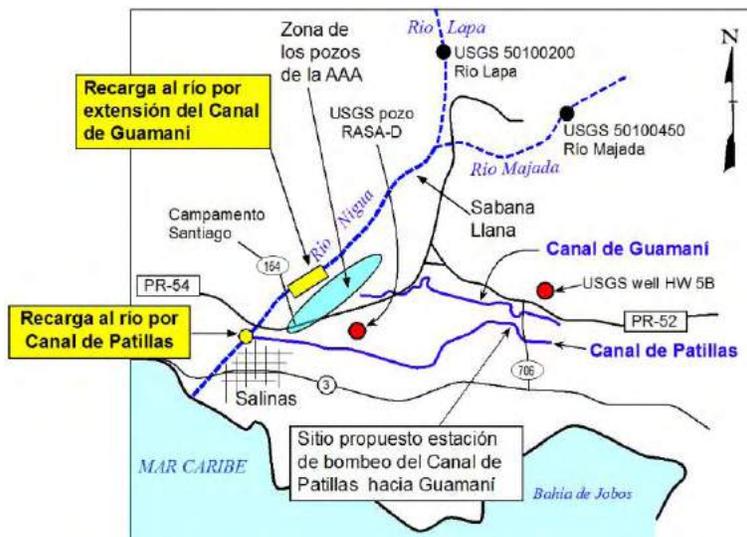


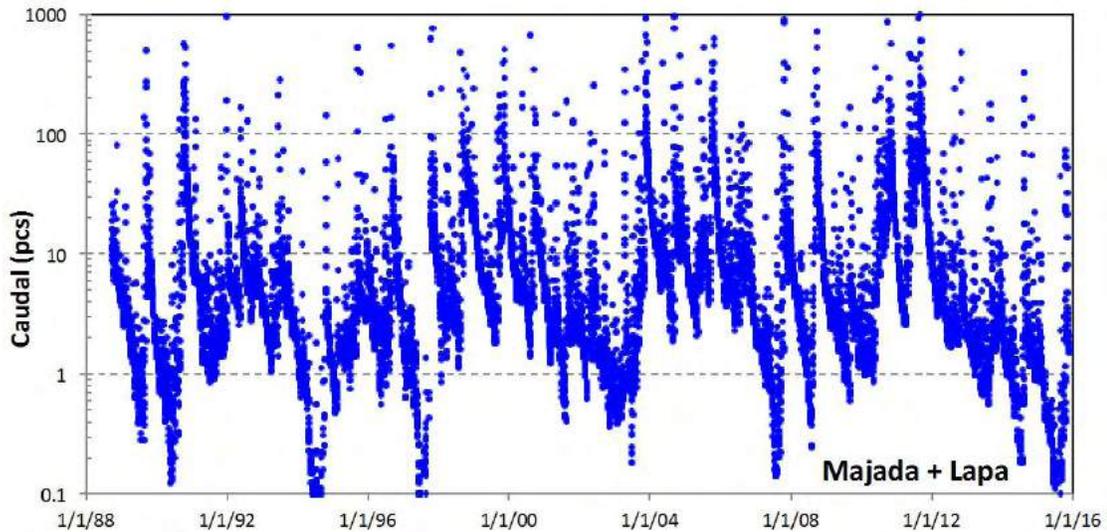
Ilustración 5.24 Mapa esquemático del área de Salinas señalando elementos relevantes de la recarga del acuífero.

Los ríos de la costa sur típicamente tienen flujo todo el año antes de llegar a la planicie costera. Sin embargo, cuando empiezan a fluir sobre los depósitos aluviales, sus flujos se infiltran por sus lechos, recargando así el acuífero y, si los caudales no son significativos, los cauces quedan secos. Por ejemplo, Kuniansky y Rodríguez (2010) informaron que cuando el flujo en el río Nigua fue de 8.15 pcs en Sabana Llana el río estaba seco en Campamento Santiago, lo cual quiere decir que la totalidad de este flujo se infiltró hacia el acuífero (véase mapa de localización en la Ilustración 5.24). Por otro lado, cuando el caudal aumentó a 27.4 pcs en Sabana Llana se observó flujo en el río en la zona de Campamento Santiago, indicando que este caudal superó la capacidad de infiltración de este tramo del río. Para el propósito del análisis siguiente se utilizó la premisa de que este tramo del río cuenta con la capacidad de infiltrar 12 pcs. Además, hay capacidad de infiltración adicional en la zona del río aguas abajo del Campamento Santiago.

Uno de los retos en el manejo de un sistema de recarga es mantener la capacidad de infiltración, puesto que la superficie del suelo se puede tapar con el sedimento fino que trae el agua de recarga y también por el crecimiento de algas u otra materia orgánica. El fondo del río mantiene su capacidad de infiltración por la acción de socavación y limpieza a consecuencia de las crecidas. En el caso de campos de infiltración es recomendable la aplicación intermitente, por ejemplo, un par de días a la semana a cada campo particular, con un tiempo para descansar, evitando la formación de una capa de algas. Debido a que la vegetación ayuda a mantener la tasa de infiltración, la siembra de una cosecha como heno o caña de azúcar, puede ser consistente con la operación de una zona de recarga. La combinación de las plantas, sus raíces y el proceso normal de arado y re-siembra, pueden ayudar en mantener la permeabilidad de la superficie del suelo.

Los caudales del río Nigua en Salinas, calculados como la suma de los caudales de los ríos Majada y Lapa, se presentan en la Gráfica 5.19 utilizando una escala logarítmica. El 80% del tiempo el caudal del río Nigua es inferior a los 12 pcs (la capacidad estimada de infiltración aguas arriba del Campamento Santiago). Esto indica que existe una amplia oportunidad de incrementar la recarga a través del fondo del río además de la recarga por campos de infiltración. La Ilustración 5.24 indica que el Canal de Patillas tiene una descarga hacia el río Nigua, entre la zona de los pozos de la AAA y el mar. Esta descarga fue observada el día 9 de agosto de 2015 con un caudal de 1.1 pcs y la totalidad del flujo se infiltró por el lecho del río dentro de una distancia de 500 pies. Se puede aumentar esta descarga hacia el lecho del río

en aproximadamente 5 pcs utilizando agua del embalse Patillas con la rehabilitación de un tramo corto del canal, según la regla operacional del embalse previamente descrita.⁹



Gráfica 5.19 Caudal diario del río Majada y río Lapa, los tributarios del río Nigua. Puede observarse que el 80% del tiempo el flujo afluente al río Nigua es inferior a 12 pcs (datos del USGS, escala logarítmica).

Una segunda opción sería instalar una estación de bombeo en el canal de Patillas en la zona donde los canales de Patillas y Guamaní están más cercanos uno al otro, para así suplir un caudal mayor al canal de Guamaní, el cual tiene poca agua en esta zona. Suplir recarga por el canal de Guamaní tiene la ventaja de poder recargar el acuífero en la zona aguas arriba del campo de pozos de la AAA, según localizado en la Ilustración 5.24. Esta recarga se puede aplicar por una combinación de varias técnicas: (1) infiltración por el fondo del canal de Guamaní, más la extensión del canal necesario para llegar al río Nigua; (2) desbordar un volumen limitado, puede ser 1 pcs, a la quebrada Sabater, normalmente seca, que cruza por debajo del canal de Guamaní; (3) aplicar agua a campos de infiltración a construirse en la zona de alta permeabilidad entre la carretera PR-1 y el río Nigua; y (4) descargar directamente al cauce del río Nigua. Una opción adicional con ambos canales, sería nivelar terrenos con el propósito de habilitar campos de infiltración. Estos pueden tener vegetación natural o la siembra de una cosecha que tolera una alta tasa de aplicación de agua. Utilizando los canales

⁹ Dependiendo en el volumen de agua a desviar, puede requerir limpieza y modificaciones menores al último tramo del canal.

Patillas y Guamaní en combinación y varias técnicas de recarga, se hace posible aprovechar la totalidad de los 15 pcs que están disponibles desde el embalse Patillas debido al cambio en el nivel óptimo operacional de tan solo 210 pies que obliga al descargue de aguas con frecuencia mayor.

5.4.5 Restauración del acuífero de Santa Isabel

Resumen del problema en Santa Isabel. Datos del Servicio Geológico Federal indican que la intrusión salina ha ido avanzando en el acuífero de Santa Isabel. La intrusión salina es el resultado del balance desfavorable en el acuífero, producido por la reducción en recarga asociado con los cambios en la tecnología de riego, según explicado previamente (Kuniansky et al. 2004). Además del problema de la intrusión salina, también se ha encontrado contaminación con nitrato en el agua subterránea en la zona de Santa Isabel y niveles significativos de plaguicidas, ambos como resultado de las operaciones agrícolas en la zona (Rodríguez 2013). El aumento de recarga con aguas superficiales de calidad superior mejoraría la calidad de las aguas subterráneas por la dilución de los contaminantes.

El problema de la intrusión salina se asocia con los niveles generalmente bajos de agua en un acuífero. Se ha observado que la superficie potenciométrica¹⁰ en Santa Isabel se ha mantenido por debajo del nivel del mar durante períodos prolongados desde 1992, según documentado con los datos del pozo Alomar-1 (Gráfica 5.15). La zona más afectada se identifica en la Ilustración 5.25. Los datos preliminares de 2015 del USGS indican que el problema de los bajos niveles en el acuífero sigue en la actualidad. Durante los últimos cuatro años, que han sido relativamente secos, ha resultado en un descenso sustancial en los niveles de agua en el acuífero, también mostrado por los datos del pozo Alomar-1. En vista de los niveles bajos, durante la sequía del 2015 el DRNA, en consulta técnica con el USGS, declaró condiciones de emergencia y ordenó a la AAA reducir en un 33% el bombeo como medida de emergencia para proteger el acuífero ante la amenaza de la intrusión salina.

Estrategia propuesta. El estudio de modelaje del acuífero realizado por el USGS (Kuniansky, et al. 2004) indicó que se requiere un cambio positivo en el balance hídrico de entre 3.3 y 4.6 mgd, para poder regresar a los niveles de agua adecuados en el acuífero en un período de

¹⁰ En un acuífero no-confinado, como Santa Isabel, la superficie potenciométrica corresponde al nivel en que se encuentra la zona saturada por agua en el subsuelo, según medida en pozos sin bombeo.

entre 10 y 20 años. Este cambio en el balance hídrico se puede lograr mediante la reducción en las extracciones, un aumento en la recarga, o una combinación de ambos. Si el agua de recarga es de buena calidad, también puede mejorar la calidad del agua en el acuífero.

Debido a que el agua subterránea es la fuente de agua potable más económica y representa una fuente sostenible siempre que esté bajo un régimen de manejo adecuado, se propone la siguiente estrategia con énfasis en aumentar la recarga al acuífero.

1. **Reducción en la tasa de extracción.** En julio de 2015, el DRNA ordenó una reducción de un 33% en las extracciones en el área de Santa Isabel. Previo a la sequía de 2015, en los pozos de la AAA en el Bo. Paso Seco, Santa Isabel, se estaba extrayendo 6.75 mgd (10.5 pcs). De esto, aproximadamente la mitad se enviaba a Coamo mediante un tubo de 16" en diámetro y el restante se utilizaba en Santa Isabel.

En respuesta a la orden del DRNA, la AAA redujo la tasa de extracción de sus pozos a 4.50 mgd (7.0 pcs), una disminución de 2.25 mgd. Esta agua fue reemplazada en el verano de 2015 con un caudal equivalente transferido del embalse Toa Vaca, con el cual ahora se supe a Coamo, mientras los pozos continúan supliendo a Santa Isabel.

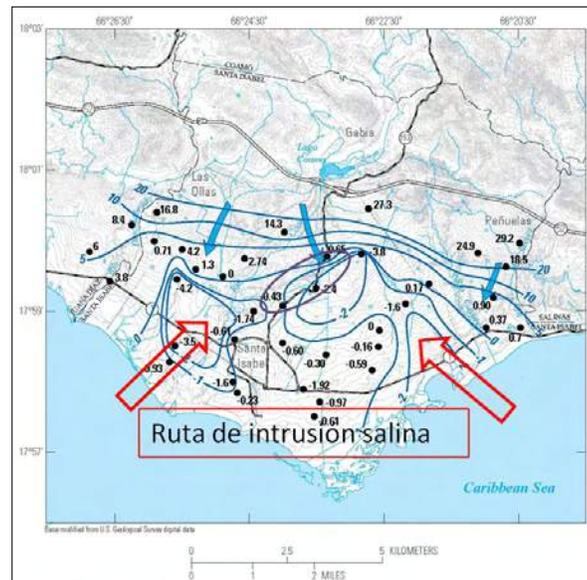
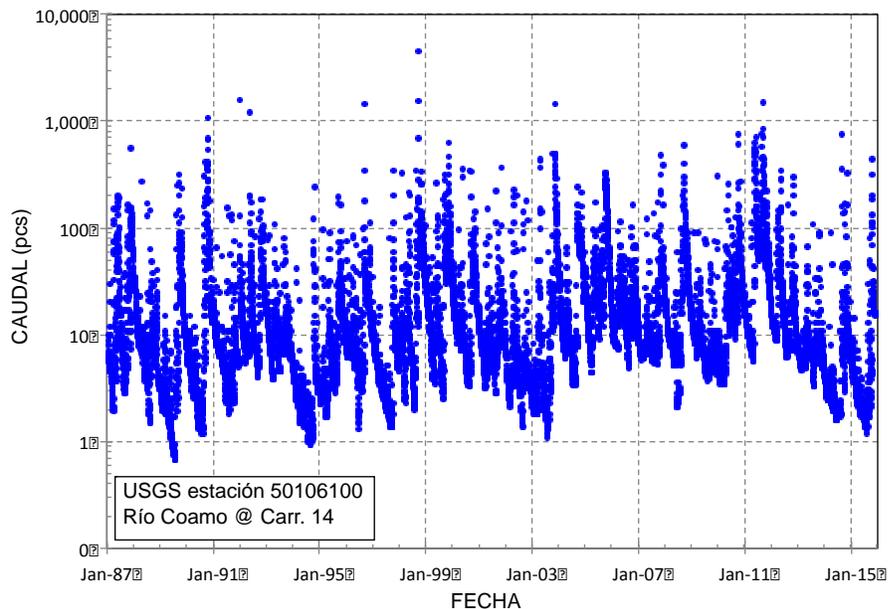


Ilustración 5.25 Mapa potenciométrico del 2008, con anotaciones señalando la zona de niveles bajos en el acuífero de Santa Isabel en la zona del campo de pozos de la AAA (reproducida de Rodríguez 2013).

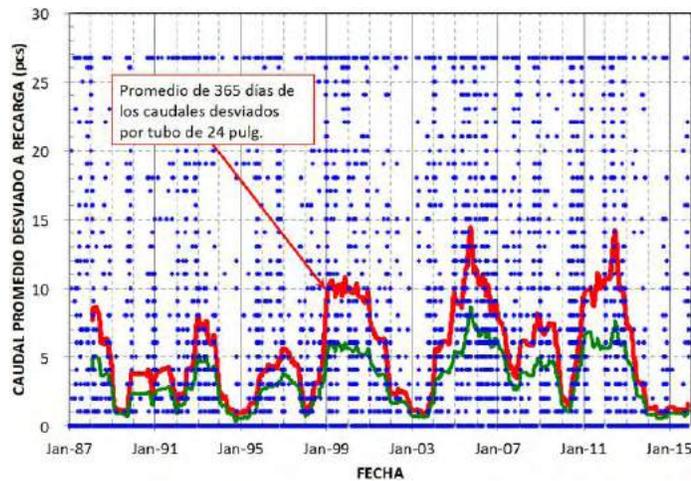
2. Aumentar la recarga. El segundo componente será aumentar la recarga de aguas subterráneas en aproximadamente 2.0 mgd (3.1 pcs). Esta agua se puede proveer del río Coamo durante los periodos de mayor flujo, entregando el agua mediante tubería hacia campos de infiltración con suelos de alta permeabilidad ubicados a lo largo del lado este del río Coamo.

El río Coamo fue seleccionado como la fuente de recarga luego de considerar diferentes alternativas. La utilización de agua de los canales de riego fue descartada debido a la falta de disponibilidad en la zona de Santa Isabel. La reutilización del efluente de la planta sanitaria de tratamiento de Santa Isabel también fue considerada y descartada por las siguientes razones: (1) el alto costo de implantación; (2) un proceso reglamentario prolongado; (3) la calidad del agua del efluente será inferior a la calidad del agua en el río, particularmente con respecto al nitrato, un contaminante de preocupación en el acuífero de Santa Isabel; y (4) porque el Departamento de Agricultura ha expresado interés en la utilización de las aguas tratadas para el riego de siembras de plantas ornamentales. El río Coamo fue seleccionado como fuente de abasto por el sistema de recarga a base de las siguientes consideraciones: (1) a tiene suficientes días con un volumen de agua adecuado para recargar; (2) el agua puede fluir hacia la zona de recarga por gravedad; y (3) es agua de buena calidad.



Gráfica 5.20 Caudal diario del río Coamo en el puente PR-14, aguas arriba de la presa de Coamo. El caudal del río fluctúa entre 10 y 100 pcs el 40% del tiempo, mostrando la disponibilidad de agua para recarga.

Disponibilidad del agua. La disponibilidad del agua proveniente del río Coamo se calculó tomando en consideración la serie de 28.5 años de flujo diario señalada en la Gráfica 5.20. El lecho del río Coamo, aguas abajo de la presa, funciona naturalmente como una zona de recarga, por lo que no se propone desviar agua fuera del río y hacia el campo de infiltración a menos que el flujo del río sobrepase los 10 pcs. También, para minimizar la concentración de sólidos en suspensión, que pueden reducir la tasa de permeabilidad del suelo, en el agua que se desviaría hacia la zona de recarga, se simuló el cierre de la toma de desvío cuando el caudal en el río sobrepasa los 100 pcs. También se simularon las limitaciones en caudal debido a la capacidad hidráulica del tubo de aducción entre la represa y la zona seleccionada para el sistema de recarga. La relación resultante entre la capacidad de la tubería y la cantidad de agua (promedio anual) que se puede desviar hacia la recarga, se presenta resumida en la Tabla 5.13. Esta relación aparece en la Gráfica 5.21.

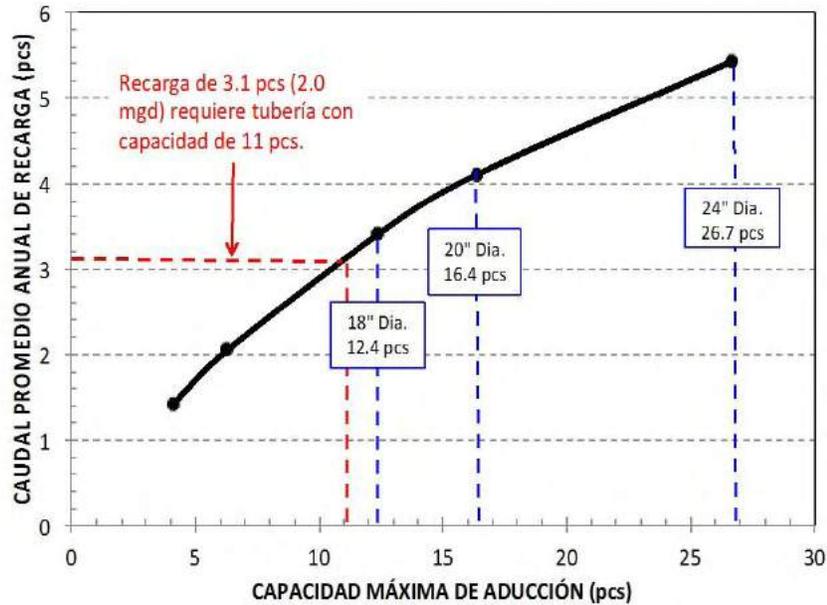


Gráfica 5.21 Relación entre la capacidad máxima de la tubería de aducción entre la represa de Coamo y la zona de recarga, y el volumen de agua a desviar expresada como un caudal promedio anual.

Tabla 5.13 Relación entre diámetro de la tubería, el caudal y el volumen promedio de agua desviada del río Coamo hacia la zona de recarga.

Diámetro de tubería (pulgadas).	Capacidad Hidráulica del Tubo Máximo (pcs)	Caudal Promedio		Volumen del Agua (acre-pies/año)
		(pcs)	(mgd)	
12	4.1	1.43	0.9	1,035
14	6.3	2.05	1.3	1,484
18	12.4	3.41	2.2	2,469
20	16.4	4.11	2.7	2,976
24	26.7	5.43	3.5	3,931

El análisis sugiere que un tubo de 18 pulgadas es el tamaño mínimo que se puede utilizar¹¹. Se debe considerar el utilizar un diámetro mayor para poder maximizar el volumen de desvío para acelerar la recuperación luego de un año muy seco. La variación en la tasa de recarga con el tiempo, se presenta en la Gráfica 5.22.



Gráfica 5.22 Flujo de recarga diario por un tubo de 24'' (puntos azules) y el promedio de la tasa de recarga durante 365 días para tubos de 24'' (línea roja) y de 18'' (línea verde).

Selección del área de recarga. El área de recarga se seleccionó considerando la permeabilidad del acuífero, la capacidad de infiltración de los suelos (Ilustración 5.26), la ubicación del campo de pozos de la AAA y las zonas de niveles críticos en el acuífero (Ilustración 5.16). Se propone llevar a cabo la recarga principalmente en la zona entre el río Coamo y el campo de pozos de la AAA, extendiéndose desde Bo. Paso Seco, aguas abajo, hasta la zona urbana. Esta zona se caracteriza por suelos de alta permeabilidad y se encuentra dentro de la zona del acuífero afectada por niveles de agua reducidos. Dado que el gradiente hidráulico se inclina en la dirección de los pozos de la AAA, se anticipa que una fracción grande del agua de recarga será capturada por el campo de pozos de la AAA.

¹¹ Los cálculos han sido realizados utilizando flujo por gravedad por un tubo de 2.0 km de largo con una rugosidad hidráulica representativa de tubería de PVC ($n=0.010$) y con información de elevación del cuadrángulo topográfico. Habrá que cotejar todo a base de la información topográfica detallada.

La configuración del campo de infiltración podría orientarse como una línea paralela al río, a lo largo de la carretera PR-153. Se podría incluir el cauce viejo del río Coamo que corre al lado oeste de la carretera PR-153 al sur del Bo. Paso Seco, el cual no cuenta con utilidad agrícola. Otra opción sería la aplicación de un exceso de riego a un terreno agrícola con alta capacidad de infiltración con una cosecha que puede aceptar este volumen de agua.

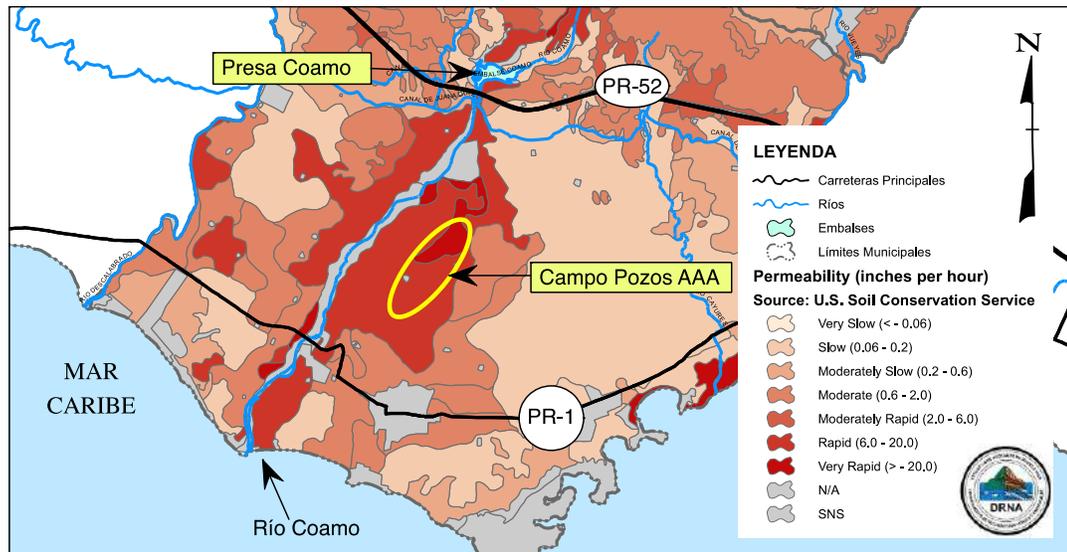


Ilustración 5.26 Capacidad de infiltración de los suelos en el área de Santa Isabel (datos de GIS de NRCS con infraestructura sobre puesta).

La permeabilidad del suelo es un factor importante en determinar el terreno necesario para la recarga. La relación entre el área del campo de infiltración y la tasa de infiltración diaria se presenta en la Tabla 5.14.

Para reducir la carga de los sedimentos finos que pueden entrar durante crecidas y tapar la superficie del campo de infiltración, se debe pasar el agua a través de una charca de sedimentación (vea la Ilustración 5.22).

Resumen. Existe un caudal de agua disponible del río Coamo, suficiente para restaurar el acuífero de Santa Isabel en combinación con la reducción en la tasa de extracción ya realizada por la AAA. El sistema de recarga puede funcionar por flujo por gravedad, minimizando su costo de construcción y operación. Su operación debe ser automática, desviando agua de acuerdo a su disponibilidad en el río, apoyado con trabajos rutinario de mantenimiento. El costo de construcción del sistema no debe sobrepasar los \$3.5 millones, sin incluir el costo del terreno. En la zona identificada para recarga existen terrenos tanto privados como

públicos. El proyecto de recarga debe incluir la instalación de un sistema de monitoreo de la intrusión salina y la preparación anual de un mapa de niveles potenciométricos (nivel del agua dentro del acuífero).

Tabla 5.14 Relación entre capacidad de infiltración y área superficial de campo de infiltración, para manejar el caudal máximo de un tubo de 24” de diámetro.

Caudal, pcs	Profundidad de Aplicación Diaria (pulg/día)	Área Requerida (acres)
26.7	2	318
26.7	4	159
26.7	6	106
26.7	8	79
26.7	10	64
26.7	12	53
26.7	18	35
26.7	24	26

Nota: El caudal de un tubo de 18” es aproximadamente la mitad del valor presentado arriba.

5.4.6 Monitoreo y manejo de los acuíferos

Las secciones previas han identificado estrategias para dos áreas críticas de los acuíferos del sur. En ambos casos se evidencian limitaciones en los datos disponibles. En particular, no hay información referente a la localización y movimiento del agua salina dentro del acuífero.

Tanto en la costa norte como en la costa sur el agua subterránea representa una fuente de abasto muy importante para los usos municipales, industriales y agrícolas. Se ha indicado previamente la manera en que, tanto en la costa norte como la costa sur, se pueden manejar los recursos superficiales y subterráneos en conjunto para maximizar el rendimiento de agua para todos los usuarios. Sin embargo, el manejo adecuado de las aguas subterráneas requiere de información que actualmente no está disponible. Se recomiendan las siguientes medidas de recolección y organización de los datos de agua subterránea:

Datos de niveles potenciométricos. Los niveles en los acuíferos suben en años con mucha lluvia y recarga y bajan en años secos o con bombeo a un ritmo superior a su recarga. Un ejemplo de las variaciones en los niveles del acuífero en el área de Santa Isabel, con datos del pozo Alomar, se presenta en la Gráfica 5.15. Se requiere de datos tomados regularmente durante muchos años para poder interpretar correctamente las condiciones hidrológicas de

un acuífero. La gran mayoría de los datos son de periodos de récord muy cortos o los datos publicados son insuficientes para hacer una interpretación confiable. Por ejemplo, aunque el pozo Alomar-1 tiene algunos datos de 1967-68, por los siguientes 30 años no hay datos. Mientras, existe un número de estaciones superficiales con datos diarios continuos por más de 50 años, para los pozos no hay datos de semejante duración y continuidad.

Datos de calidad del agua. Gran parte de los datos de calidad de agua subterránea se toman solamente en pozos de la red de agua potable. Una vez uno de los pozos de la AAA queda contaminado y se elimina de la red, ya no se informa la calidad del agua. Como consecuencia, el acopio de datos de calidad se concentra en los sectores de los acuíferos con agua de buena calidad, lo cual no necesariamente refleja la condición del acuífero en su totalidad ni la magnitud del problema de contaminación.

Tasa de extracción. La información sobre la tasa de extracción de los pozos es, en general, muy deficiente. El único sector con buena calidad de datos y que rinde informes de producción puntualmente es el sector industrial, lo cual representa una fracción menor de la extracción total. Los sectores de mayor importancia son los pozos de la AAA y los pozos agrícolas. En ausencia de datos sobre cambios en la tasa de extracción, no es posible interpretar de manera confiable, las razones para las variaciones en los niveles de agua observados dentro de los acuíferos.

Estrategias para mejorar la disponibilidad de datos. Para maximizar la tasa de extracción sostenible de los acuíferos, las acciones deben enfocarse en las siguientes estrategias referentes a la recopilación y disponibilidad de datos hidrológicos del agua subterránea.

1. Se recomienda establecer una red de pozos de rastreo permanente y de largo plazo. La red debe consistir de pozos de observación del nivel freático, combinado con pozos para observar las variaciones en la localización del frente de agua salina dentro de los acuíferos costeros.
2. Se debe incluir el acopio de datos de calidad como parte de la red permanente de pozos de monitoreo.
3. En el caso de los acuíferos donde existe un potencial de contaminación, los datos de calidad deben incluir parámetros que permitan identificar si el agua subterránea ha sido contaminada debido a la disposición inadecuada de desperdicios potencialmente

- peligrosos como las cenizas producto de la quema de carbón, lixiviados de rellenos sanitarios, nitratos, entre otros.
4. Los datos de extracción de los pozos de la AAA deben ser informados mensualmente, de forma confiable y con una demora de no más de 60 días. Estos datos se deben publicar de manera puntual en el Internet.
 5. Se recomienda la calibración del consumo de energía vs. caudal para pozos agrícolas, para poder estimar el bombeo en los pozos agrícola a base del consumo de electricidad. Este método también puede ser útil a la AAA como método de cotejo en sus sistemas de bombeo.

5.4.7 Contaminación del agua subterránea

En las aguas subterráneas se han identificados tres tipos principales de contaminantes, como lo son los contaminantes orgánicos, los inorgánicos y los microbiológicos. Los contaminantes de origen orgánico, tales como los plaguicidas y los derivados del petróleo, son asociados principalmente con la disposición inadecuada de los desechos, los tanques con fugas y las escorrentías provenientes de áreas industriales, vertederos, pozos sépticos, entre otros. Por otro lado, altas concentraciones de nitrato y nitrito, los sólidos disueltos, las sales y los minerales presentes en el agua, se consideran como contaminantes de origen inorgánico. Estos pueden provenir de los lixiviados de los sistemas de relleno sanitario, aguas usadas y por la entrada de la cuña de agua salada. Las partículas virales, las bacterias y los parásitos, provenientes de las prácticas agropecuarias o de las aguas usadas con poco o ningún tratamiento se consideran contaminantes de origen microbiológicos (Waller, 1982). El origen de los contaminantes puede ser fácil de identificar (fuente puntual). En otros casos, los contaminantes son transportados por la escorrentía o son el resultado de diversas actividades y su origen no se puede identificar fácilmente (fuente no puntual).

En el caso de Puerto Rico, casi la mitad de las residencias no están conectadas al sistema de alcantarillados de la AAA. Éstas dependen principalmente de pozos sépticos y pozos muros. El sistema de tratamiento individual más eficiente es el pozo séptico, el cual provee tratamiento en dos etapas: (1) un tanque para colectar los sólidos por el proceso de sedimentación, y (2) un lecho de suelo biológicamente activo por donde el líquido sale del tanque. El suelo actúa como un filtro y también como un proceso de tratamiento biológico. Sin embargo, muchos de los pozos muros consisten de un tanque soterrado con una pared

permeable con un nivel de tratamiento inferior, por lo que se infiltran directamente hacia el acuífero.

Diversas actividades económicas han contribuido a la contaminación de las aguas subterráneas por sustancias químicas incluyendo: gasolineras, industrias de alta tecnología, centros de servicio automotriz, sistemas de relleno sanitario municipal e industrial, hospitales, centros agropecuarios y vaquerías. La contaminación del acuífero típicamente resulta por accidentes, derrames, filtraciones de tanques de almacenaje, falta de controles adecuados en el manejo de químicos industriales o agrícolas, efecto acumulativo de aplicación de abonos de nitrógeno, pozos sépticos y el manejo inadecuado de los sistemas de rellenos sanitario.

En el caso de los acuíferos del sur, se ha identificado el potencial de contaminación química de éstos a causa del uso de las cenizas producto de la quema de carbón como material de relleno para la construcción de urbanizaciones sobre zonas de recarga. Es por esto que se debe estudiar la necesidad de incluir en el monitoreo de parámetros que puedan servir para identificar este tipo de contaminación. Algunos de los componentes regulados por la EPA y el Departamento de Salud que se han encontrado en muestras de cenizas obtenidas en Salinas y que representan riesgos a la salud son antimonio, arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo, selenio y talio.

El acuífero de la costa norte es particularmente susceptible a la contaminación por los sumideros. En muchos lugares de la zona cárstica las aguas de escorrentía superficial de las fincas están dirigidas hacia los sumideros que las conducen directamente a acuíferos que son utilizados como fuente de agua potable. Varios pozos en el área de Manatí han sido clausurados a raíz de niveles altos de nitrato, producto del abono aplicado a las fincas de piña en la zona (Conde-Costas y Gómez-Gómez, 1999). En el caso del acuífero del sur, se han reportado problemas similares (Rodríguez 2013). Muestras de agua subterránea tomadas por el DRNA en los años 1997 y 2000 presentan concentraciones de nitrato que fluctúan entre 0.68 y 19.3 mg/L en el abanico aluvial del río Nigua de Salinas y entre 1.74 y 112 mg/L en las colinas al Norte de la Llanura Costera del Sur (Rodríguez, 2006). Al presente, el monitoreo del área continúa. Los acuíferos que presentan un problema mayor de contaminación con nitrato, o que potencialmente podrían tenerlo, son aquellos ubicados en áreas caracterizadas por la aplicación en grandes cantidades de nitrógeno al suelo, zonas donde se generan grandes cantidades de estiércol y por la buena conectividad hidráulica que existe entre estas

zonas y el acuífero. Su concentración en el acuífero puede aumentar durante décadas debido a la recurrencia de actividades que continúan introduciendo nitrato al área de recarga del acuífero.

El nitrato es un contaminante poco reactivo y soluble en agua, el cual no se remueve mediante el proceso de filtración por el suelo. El nitrato disuelto en el agua, es un contaminante que en concentraciones elevadas puede ser letal en infantes. A tales efectos la EPA ha establecido un límite de 10 mg/L de nitrato en el agua potable. Algunos de estos casos están siendo manejados por el programa de la Lista Nacional Prioridades del Superfondo (NPL, por sus siglas en inglés de la EPA) cuando se trata de puntos precisos de contaminación.

Tabla 5.15 Lugares identificados en la Lista Nacional Prioridades del Superfondo, municipio en el que se encuentra y etapa del proceso de remediación ambiental.

Nombre del lugar identificado	Municipio en el que se encuentra	Etapa del Proceso
Fiber Public Supply Wells	Guayama	O&M
Juncos Landfill	Juncos	O&M
Vega Alta Public Supply	Vega Alta	O&M
Barceloneta Landfill	Barceloneta	O&M
Pfizer Pharmaceuticals, antiguo Upjohn Caribe Inc.	Barceloneta	O&M
Maunabo Groundwater Contamination	Maunabo	RI/FS
Cabo Rojo Groundwater Contamination	Cabo Rojo	RI/FS
Scorpio Recycling Inc.	Toa Baja	RI/FS
Pesticide Warehouse I	Arecibo	RI/FS
Pesticide Warehouse III	Manatí	RI/FS
Hormigas Groundwater Plume	Caguas	RI/FS
San German Groundwater Contamination	San Germán	RI/FS
Vega Baja Solid Waste Disposal	Vega Baja	RA
Cidra Groundwater Contamination	Cidra	RD
Papelera Puertorriqueña Inc.	Utado	RI
Corozal Groundwater Contamination	Corozal	RI
Atlantic Fleet Weapons Training Area	Vieques	Desconocido

Puerto Rico posee diecisiete (17) lugares identificados e incluidos en la Lista Nacional Prioridades del Superfondo. Estos lugares se encuentran en diferentes etapas del proceso de remediación ambiental. Las etapas son: Investigación Remedial/ Estudio de Vulnerabilidad (Remedial Investigation/Feasibility Study RI/FS), Diseño de Remediación/ Acción Remedial

(Remedial Design/Remedial Action RD/RA) y Operación y Mantenimiento (Operation and Maintenance O&M). En la Tabla 5.15 se presenta los lugares en la Lista Nacional Prioridades del Superfondo para Puerto Rico, su ubicación y la etapa en la que se encuentra el lugar en el proceso de remediación ambiental.

5.5 Sostenibilidad de ecosistemas acuáticos

5.5.1 Fuentes de datos

Hay una variedad de factores que inciden sobre la supervivencia de las especies nativas y la integridad y diversidad biológica de los ecosistemas acuáticos en Puerto Rico. Entre dichos factores destacan la magnitud del flujo (mínimo y alto), la calidad del agua, incluyendo niveles mínimos de oxígeno, la conservación de las rutas migratorias, tanto en dirección aguas arriba como aguas abajo. Además, la integridad de la configuración morfológica del cauce, incluyendo charcas, tramos llanos y una zona de ribera que ofrezca fuentes de alimentación y protección de los depredadores.

Scatena y Johnson (2001) estudiaron la relación entre el flujo mínimo y la disponibilidad de hábitat para el camarón en las cabeceras de los ríos. Sin embargo, no existen estudios para determinar la relación entre flujos mínimos y condiciones de hábitat para los tramos cercanos a la costa y en los estuarios, donde la pendiente es menor.

Existe información general sobre los niveles de oxígeno requeridos para varias especies. En relación a las rutas migratorias, se conoce que la interrupción de las migraciones elimina las especies nativas, pero las técnicas para asegurar que se mantengan las rutas migratorias no están bien desarrolladas. En cuanto a los demás factores que influyen en la supervivencia de las especies nativas, la geomorfología de los cauces y las actividades depredadoras y competencia por especies exóticas, no cuentan con documentación en la Isla.

Las estaciones de calidad del USGS presentan una buena base de datos tanto de flujo como de concentración de oxígeno y otros parámetros. Sin embargo, no existe información sobre la relación entre el caudal, la cantidad y calidad del hábitat necesario para sostener a los ecosistemas acuáticos y las especies acuáticas nativas.

Otra limitación es la inexistencia de un inventario ecológico detallado que documente la biota y elementos morfológicos en los tramos de los ríos poco impactados por los procesos de desarrollo. Este inventario debe identificar los impedimentos a las rutas migratorias y las

opciones (si alguna) para su eliminación. De esta manera se facilitaría la aplicación de normas más estrictas para proyectos, así como las acciones de restauración en los tramos de los ríos identificados como áreas a ser protegidas.

5.5.2 Caudal ambiental

En cada río se requiere un caudal ambiental para mantener el hábitat y las rutas migratorias, sostener la capacidad de los ríos para diluir la descarga de desperdicios líquidos y mantener la circulación en los estuarios. Sin embargo, durante periodos secos hay muchos embalses y tomas de agua que extraen la totalidad del flujo, dejando seco el río aguas abajo hasta que el cauce en su ruta al mar recibe afluentes que aportan flujo y se reestablecen las funciones bióticas.

A pesar de la importancia singular del agua sobre la salud de los ecosistemas acuáticos, este tema apenas ha sido discutido en Puerto Rico. El principal estudio (Scatena y Johnson, 2001) fue llevado a cabo en la cabecera del río Mameyes y el río Espíritu Santo. Ambos cuerpos de agua son parte del sistema del Bosque Nacional El Yunque, el cual nutre unas 30 tomas de agua potable. Dicho estudio examinó la relación entre caudal mínimo, hábitat y población, utilizando varias especies de camarones como indicador ecológico. Los hallazgos principales del estudio fueron los siguientes:

1. El hábitat disponible se reduce rápidamente con caudales menores que los flujos en el rango de Q_{96} hasta Q_{99} .
2. El flujo de Q_{99} es necesario para mantener la cantidad mínima de hábitat utilizable.
3. El periodo de tiempo en que el hábitat utilizable está en su valor mínimo (debido a un caudal bajo), aumenta una vez la tasa de extracción excede del Q_{98} .

Los hallazgos del estudio de Scatena y Johnson establecen que el mantenimiento de un flujo de Q_{99} es el valor mínimo que puede sostener las condiciones de hábitat en los ríos. Es necesario que se lleven a cabo estudios en otros cuerpos de agua y se incluyan otros organismos (peces) ya que el estudio citado utilizó solamente camarones.

El problema con las tomas sin almacenaje ya construidas es que se diseñaron sin tomar en consideración la necesidad de agua que tiene la biota en ese cuerpo de agua. Además, la demanda de agua que se sirve de estas tomas es mayor al rendimiento seguro de la fuente,

lo que crea un conflicto de uso entre los usuarios (biota acuática y el uso público). Por tal razón, resulta crítico que las tomas de agua de la AAA consideren el rendimiento seguro de un cuerpo de agua en su diseño para mantener el caudal ambiental, de lo contrario ese cuerpo de agua donde se estable la toma no es el apropiado y deberán identificar una fuente que le permita satisfacer la necesidad de producción.

En Puerto Rico no existen normas que establezcan los caudales ambientales que se deben mantener en ríos y quebradas. Las solicitudes para la construcción de tomas nuevas se analizan caso por caso. Al presente, el DRNA tiene como política para flujo ambiental mantener el Q_{99} . Debido a que los caudales naturales pueden ser muy bajos por causas naturales, se entiende que las obstaculizaciones de las rutas migratorias son de mayor impacto para la supervivencia de la fauna acuática nativa que el mantenimiento del flujo mínimo.

También es necesario tomar en cuenta que el flujo mínimo no es el único requerimiento para mantener la integridad ecológica. Son importantes, además, los eventos de crecida para renovar el cauce del río. Los flujos altos conservan el tamaño y configuración del cauce, lo mantienen libre de vegetación, socavan las charcas y limpian las piedras de los sedimentos finos. Esta función es importante para mantener en su estado natural la estructura física del substrato en el lecho del río, hábitat esencial y base de la cadena alimenticia.

5.5.3 Sostener rutas migratorias

Según se explicó en el Capítulo 3, todas las especies de peces y camarones nativos de Puerto Rico migran entre el mar y las zonas en los ríos donde se encuentran. Los peces requieren aguas relativamente profundas y migran a lo largo de los cuerpos de agua durante periodos de flujo elevado cuando los tramos llanos están sumergidos, mientras especies como los camarones, con menos capacidad nadadora, migran cuando el flujo es menor. Las migraciones tienen componentes tanto en la dirección aguas arriba como aguas abajo y cada ruta migratoria tiene patrones y requisitos ambientales distintos. Para mantener las rutas migratorias se requiere conocer los patrones de migración e identificar los métodos disponibles para garantizar que las intervenciones en los ríos mantengan (no interrumpan) las migraciones en ambas direcciones durante cualquier época del año.

La Tabla 5.16 identifica, en términos muy generales, las clases de obras que pueden impactar las rutas migratorias, la magnitud estimada del impacto y el potencial de minimizarlo si se

optimiza el diseño para sostener los patrones de migración. El único tipo de obra con impactos grandes y pocas opciones para su mitigación son los embalses. Las demás estructuras y actividades en los ríos generalmente pueden reducir o mitigar su impacto. Algunas actividades, como son la descarga de efluentes y la extracción de agregados, influyen tanto en la calidad del agua como en la morfología del cauce.

Las rutas migratorias pueden ser obstaculizadas parcialmente o totalmente por una variedad de factores, los cuales se describen a continuación:

Flujo mínimo: Al secar el río se elimina la ruta migratoria.

Barreras físicas: Las represas constituyen barreras físicas a la migración. Las estructuras construidas en los cauces de los ríos, tales como represas y embalses, tomas de agua, puentes, vados y atarjeas restringen el movimiento de las especies.

Tabla 5.16 Actividades en los ríos que afectan rutas migratorias y el potencial de mitigación.

Obra o actividad	Magnitud estimada del impacto	Potencial para minimizar impacto optimizando el diseño y operación
Represa y embalse	Muy grande	Muy poco
Toma de agua	Grande	Bueno
Canalización	Grande	Bueno, utilizando diseño “natural”
Descarga de efluentes	Grande	Bueno
Extracción arena y grava	Moderado	Moderado
Puente	Muy Poco	Generalmente no necesario
Vados y atarjeas	Moderado	Bueno

Morfología del cauce: Alteraciones en el canal, ya sea por entubamiento o por canalización convencional, como lo es un canal con paredes y fondo en hormigón, altera la morfología del cauce y elimina la configuración natural de los hábitats disponibles (ej. pozas, rápidos y los corridos). Esto ocasiona que la fauna carezca de áreas para resguardo, descanso y reproducción. Al presente, el DRNA no promueve las canalizaciones en los cauces de los ríos. Sin embargo, en aquellos casos donde la alteración del cauce es inevitable, es importante tomar en consideración técnicas de restauraciones ecológicas que permitan el control de las inundaciones y la estabilización de los bancos (Tamir et al., 2007).

Actividades de Extracción: Las actividades de extracción de arena, grava y piedra (corteza terrestre), incluyendo las obras de “limpieza de los cauces” causan incisiones y desniveles en el cauce, alterando o eliminando los hábitats y favoreciendo el establecimiento de especies exóticas. Las extracciones de corteza terrestre en los ríos deben evitarse para garantizar que se mantenga la morfología, la estabilidad del cauce y la configuración natural de los hábitats. La acumulación de sedimentos finos elimina la variabilidad natural del lecho, aumentando el empotramiento¹² del sustrato. En los casos más extremos, el hábitat acuático se simplifica debido a la eliminación de las áreas de resguardo, descanso y reproducción.

Especies exóticas: Las especies exóticas pueden competir con las nativas por alimento y áreas de refugio. También pueden convertirse en depredoras, ya que pueden alimentarse de las etapas larvales de las especies nativas. Es necesario realizar estudios que indiquen la peligrosidad de las especies exóticas sobre las nativas, con el fin de hacer un manejo adecuado de estas. También es necesario que continúe la ejecución efectiva del Reglamento para Regir la Conservación y el Manejo de la Vida Silvestre, las Especies Exóticas y la Caza en el Estado Libre Asociado de Puerto Rico, de forma tal que se regule apropiadamente la importación de especies exóticas.

Sistemas de extracción: Las estaciones de bombeo que extraen agua del río succionan los organismos con poca capacidad de nado, como son las larvas y camarones pequeños. La migración aguas abajo de las larvas ocurre principalmente en horas de la noche, con picos después de la puesta del sol y antes del amanecer (Covich et al., 2014). Una técnica muy efectiva para reducir este impacto es apagar las bombas por varias horas, con énfasis en las horas pico de migración. En el caso de las migraciones aguas arriba, los camarones migran a lo largo de los márgenes de los ríos donde la corriente es más lenta y ofrece mayor protección de los depredadores. Sin embargo, si la toma de agua está colocada en los márgenes de los ríos, los organismos migrando por esta zona serán succionados. Por tal razón, es necesario que los sistemas de extracción de agua se coloquen y operen de forma tal que se minimice la entrada de los organismos. También es necesario establecer una serie de criterios mínimos

¹² Empotramiento- incrustar una cosa en otra, especialmente al hacerlas chocar con violencia entre sí, de acuerdo a la definición establecida por la real academia española. En este caso, se hace referencia a las rocas presentes en el lecho cubiertas por sedimento fino.

para el diseño de tomas nuevas o modificación de las ya existentes, de tal forma que se consideren los patrones migratorios de las especies.

Calidad del agua: En los ríos, la calidad del agua puede degradarse por la presencia de contaminantes disueltos, provenientes de efluentes asociados a zonas urbanas y agrícolas. Estos contaminantes pueden reducir drásticamente el oxígeno disuelto, causando mortandad en las especies nativas en proceso de migración.

Cualquiera de los factores anteriores puede reducir parcial o totalmente la migración. Además, el impacto acumulativo de varias obstrucciones parciales puede tener el efecto de eliminar la migración por completo. Por lo tanto, es importante considerar los impactos acumulativos de las actividades en los cauces y no tomar cada factor como si fuera un evento aislado.

Tabla 5.17 Magnitud relativa de diferentes obras por clase de impacto ^{a/}.

Clase de Impacto	Actividad u obra en el cauce del río					
	Embalse	Toma	Canalización	Vados y Atarjeas	Descarga Efluentes	Extracción Arena y Grava
Flujo mínimo	3	2	2	3	0 ^{b/}	0
Barrera física	3	2	1	3	0	0
Morfología del cauce	3	1	3	3	0	2 ^{d/}
Apoyar especies exóticas	3	1	1	2	2 ^{c/}	1
Atrapar larvas y juveniles	3	3	0	3	0	1
Degradación de la calidad	1	0	1 ^{f/}	1	3	2 ^{e/}

^{a/} Impactos: 3 = Grande, 2 = Moderado, 1 = Poco, 0 = Ninguno.

^{b/} Aumenta el flujo mínimo, pero con agua de calidad inferior.

^{c/} Por adición de nutrientes.

^{d/} Degradación por excavación de fosas en el cauce y por remoción del sustrato natural.

^{e/} Generación de sedimentos durante la extracción.

^{f/} Clasificación del agua.

La Tabla 5.17 presenta la magnitud relativa de diferentes obras por clase de impacto en los cauces de los ríos, que pueden ser barreras a la migración. Existe gran diferencia entre un sitio y otro, debido a las características intrínsecas de cada lugar. La magnitud de los impactos en cada caso corresponde a condiciones típicas de Puerto Rico y no representan las mejores alternativas de diseño y operación para minimizar su impacto. Las actividades asociadas a la construcción de estructuras pueden afectar los cauces de los ríos. Sin embargo, su efecto es

temporal y es menos significativo para las especies, a menos que ocurra durante los periodos pico de migración. Esto contrasta con las obras permanentes, ya que su efecto sobre las especies es a largo plazo.

5.5.4 Sobrepesca y especies exóticas

La sobrepesca en los ríos y quebradas ha disminuido las poblaciones de la fauna nativa. Peces como el dajao, la anguila, el olivo, el morón y la guavina son objeto de la pesca recreativa. Las larvas del olivo (cetí) son utilizadas para preparar platos típicos de mucha demanda por la población y turistas de la zona norte del País. Igualmente, de las tres familias principales de camarones dos son pescadas regularmente. El cangrejo buruquena es capturado con trampas en horas de la noche. El caracol burgao (*Neritina*), el cual alcanza hasta una pulgada de diámetro, es pescado a mano debajo de las piedras del fondo de los ríos y quebradas. La pesca recreativa se realiza con redes, varas, nasas y a mano. También ocurre la pesca furtiva (ilegal) con químicos (cloro y diversos venenos), muchas veces en áreas contaminadas.

Las especies exóticas, también descritas en el Capítulo 3, representan un peligro creciente y permanente para las especies nativas. Hay pocas experiencias con relación al manejo de las especies invasoras en los ríos y estuarios. El DRNA ha impedido la introducción de algunas especies de peces en los embalses, basado en experiencias en otras partes del mundo y en el conocimiento de su biología¹³, pero existen amenazas que no han sido controladas efectivamente.

Recomendaciones

Las siguientes estrategias son importantes para preservar y mejorar los ecosistemas acuáticos, prestando atención prioritaria a los ecosistemas y especies nativas.

Establecer prioridades: Es importante mantener o mejorar las condiciones ambientales en los ríos donde aún existen especies nativas. La identificación de áreas con prioridad de protección se debe iniciar con un estudio de los ríos de Puerto Rico para identificar los tramos con las mejores condiciones ecológicas o con el mejor potencial para su protección y restauración. Además, se deben identificar las barreras a la migración y las opciones, si alguna, para su modificación o eliminación como un primer paso en esta dirección. El DRNA

¹³ En este caso, se hace referencia al comportamiento de los peces.

ya ha realizado un inventario preliminar de los tramos de río con potencial de protección y restauración en el río Grande de Manatí, el único río en la costa norte cuyo cauce principal no tiene represa.

El mejorar la calidad de las aguas de escorrentía también debe ser prioridad para mantener el ecosistema y las especies nativas. Una estrategia para trabajar este aspecto lo es el implementar buenas prácticas de manejo para evitar la degradación del cuerpo de agua receptor.

Investigaciones: No se han definido cuáles son las condiciones mínimas necesarias para conservar los ecosistemas acuáticos saludables. El enfoque investigativo de mayor prioridad debe ser el definir y validar en el campo alternativas para mantener rutas migratorias tanto para peces como para camarones, incluyendo el caudal ambiental y las escaleras de peces. Es necesario validar la efectividad de los diferentes modelos de escaleras de peces realizados en los ríos de Puerto Rico y si éstas se ajustan a las necesidades de cada especie en particular, tomando en consideración características morfológicas de las especies nativas y sus capacidades de nado (Knights y White 1998). Se recomienda que a estas estructuras se le realice un mantenimiento constante para garantizar su funcionamiento.

Guías: En el 2009 el Departamento publicó la “Guía para el Manejo de Ríos” en la cual se identifican medidas que son prácticas para la preservación y restauración de los ecosistemas y especies nativas. Esta Guía debe implantarse en la fase de diseño de obras en los ríos. La Guía identifica los impactos potenciales que pueden ocurrir y define diferentes estrategias de diseño y operación que pueden minimizar los impactos ambientales. El objetivo de esta guía es buscar opciones sustentables que combinen tanto la funcionalidad de la ingeniería como la sostenibilidad ambiental.

Control de especies exóticas: Se necesita un control efectivo en la importación e introducción de fauna y flora acuática, así como la actualización de la lista de especies prohibidas. Se debe partir de la premisa de que cualquier especie viva introducida al país eventualmente escapará a los cuerpos de aguas. Este esfuerzo debe enfocarse en las especies consideradas como amenazas, aun cuando no se hayan identificado poblaciones establecidas en los ríos de Puerto Rico.

5.6 Estabilidad de los cauces

5.6.1 Extracción en los cauces

Las intervenciones en los ríos han provocado múltiples consecuencias en sus cauces. El patrón común es el atrincheramiento o degradación del fondo del cauce, bajando su nivel a consecuencia de dos acciones principales. La primera es la extracción de agregados, una actividad llevada a cabo a gran escala desde los años 1950 y aún activa en algunos ríos. Las cuencas en Puerto Rico suplen grandes cantidades de sedimento en suspensión, pero generan una cantidad muy limitada del sedimento grueso que compone el material en el fondo de los cauces. Dado esta situación y el largo historial de extracción de los agregados de los ríos, se puede concluir que ha sido la causa principal del atrincheramiento en los cauces (véase la Ilustración 5.27). La segunda causa está relacionada con el aumento de la energía hidráulica a consecuencia de una combinación de cambios en la cuenca hidrográfica, incluyendo particularmente la urbanización y las obras de encauzamiento y canalización. Al aumentar la energía hidráulica en el cauce, aumenta también su capacidad de transporte de sedimento y la tasa de erosión del fondo y de las riberas. Una vez iniciado el proceso de erosión, la tendencia natural es que éste se acelera. El atrincheramiento del cauce produce un flujo más profundo durante crecidas, aumentando la energía hidráulica e incrementando las fuerzas que socavan el fondo y las riberas del río. La consecuencia más dramática es el desplome de las estructuras de vivienda a consecuencia de la erosión progresiva de las riberas (Ilustración 5.28).

Hasta la fecha las soluciones para este problema han sido las canalizaciones u obras de protección de riberas por métodos tradicionales. Frecuentemente se utilizan gaviones, escollera (“rip rap”) o protecciones con hormigón. Desafortunadamente, estas medidas generalmente no son sustentables. Los gaviones tienden a fallar con mucha frecuencia por lo que no son una alternativa costo efectiva. Las soluciones tradicionales también tienen el efecto de cambiar la morfología de los cauces y las riberas al eliminar la configuración natural de los hábitats disponibles (ejemplo: pozas, rápidos y llanos) esenciales para la supervivencia de peces y camarones.



Ilustración 5.27 Incisión del cauce del río Bayamón a consecuencia de extracción de material del cauce para la construcción de un campo de golf adyacente, poniendo en peligro la presa de la toma de la AAA.



Ilustración 5.28 Deslizamiento de residencias a consecuencia del fallo de protección de los gaviones y la erosión resultante en la ribera del río Turabo en Caguas.

Existen alternativas ambientalmente más favorables que las técnicas tradicionalmente utilizadas en Puerto Rico para el control de inundaciones, las cuales mantienen la complejidad del hábitat tanto en el cauce como en la zona de la ribera. Un ejemplo de este tipo de alternativa es implantar estrategias de control de erosión de los bancos de ríos, utilizando

estructuras de piedras que dirijan el flujo fuera del banco y permitan la formación de pozas en lugares que no interfieran con la estabilidad del banco.

5.6.2 Limpieza de cauces naturales

La acumulación de material vegetativo en los puentes hace necesario su limpieza¹⁴. La limpieza de cauces naturales es una obra que se lleva a cabo en Puerto Rico con frecuencia. Estas intervenciones son esencialmente mini-canalizaciones porque remueven material vegetativo y grandes cantidades de materiales del cauce. Estas obras no cuentan con estudios previos y no producen beneficios a largo plazo, ya que su efecto práctico es reducir la estabilidad del cauce y producen daño y aumentan los riesgos de inestabilidad de los bancos de los ríos.

La limpieza, según se realiza al presente, produce un tramo de cauce artificialmente ancho donde se acumulan los sedimentos durante las crecidas subsiguientes. El efecto es, esencialmente, la creación de una trampa de sedimentos que provoca la “necesidad” de limpiezas repetidas. Las excavaciones repetidas de los sedimentos gruesos reducen su transporte aguas abajo y promueve la erosión del río aguas abajo del tramo intervenido por la limpieza. Algunos trabajos de esta índole también enderezan los meandros aumentando la pendiente hidráulica y velocidad del flujo. A su vez esto resulta en un aumento en el proceso de erosión del fondo del río. El material removido por la limpieza generalmente se deposita al lado de las riberas, lo que reduce la capacidad hidráulica del río. Por ejemplo, a consecuencia de repetidas obras de limpieza en el río Yauco a través de los años, al lado este del río se ha construido un “dique” con el material removido, que ha tenido el efecto de reducir la capacidad hidráulica del río. Además, la limpieza elimina la secuencia natural de pozas y rápidos y llanos en el río, dejando un fondo plano. También remueve el material grueso natural del lecho del río, eliminando así el hábitat acuático natural.

¹⁴ De acuerdo a la Ley 49 del 2003, se define limpieza como la remoción de materiales exógenos del cuerpo de agua que no son producto de procesos geológicos y que obstruyen el libre fluir de las aguas, y conservación se define como obras en los cauces de los ríos dirigidos a restaurar los bancos que están erodados, reducir o eliminar el proceso de erosión. Las obras de limpieza y conservación no podrán alterar la geometría ni el área seccional del cuerpo de agua, o interferir con el ciclo de transporte natural de sedimentos hacia la costa.

5.6.3 Recomendaciones

Se recomienda la adopción de técnicas de control de erosión fluvial que sean más sustentables en términos de su durabilidad y de su capacidad para reducir los daños ambientales en los cauces de los ríos. La información disponible indica que la utilización de gaviones debe limitarse en el ambiente fluvial a aquellos casos que se demuestre, mediante estudios, que es la única opción viable para atender un problema de erosión en lugares donde no han sido instalados previamente.

Las obras de limpieza según se definen en la Ley 49 de 4 de enero de 2003, según enmendada, deben limitarse solamente a las áreas inmediatamente adyacentes a estructuras como canalizaciones formales, puentes o tomas de agua. Las obras de limpieza y conservación no podrán alterar la geometría ni el área seccional del cuerpo de agua o interferir con el ciclo de transporte natural de sedimentos hacia la costa. La Guía para el Manejo de Ríos en Puerto Rico, establece la política pública y manera en que se deben realizar las obras de conservación de cauces naturales y artificiales en Puerto Rico.

5.7 Contaminación de las aguas superficiales

5.7.1 Fuentes de datos

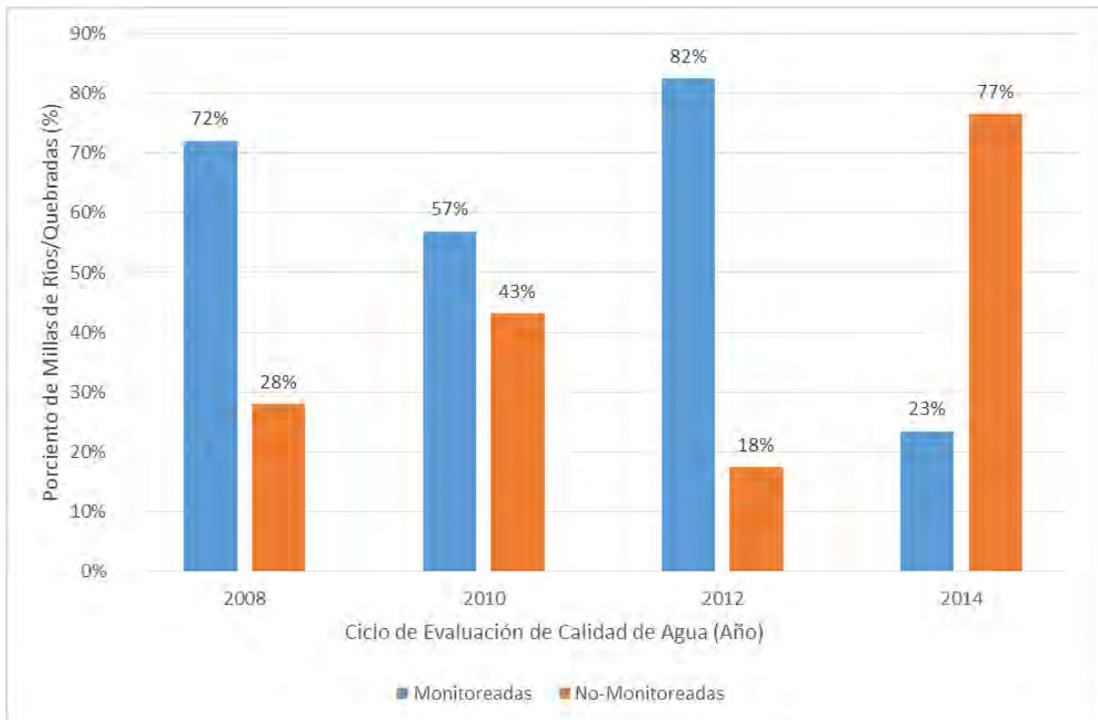
En Puerto Rico el USGS tiene activas en tiempo real solo 3 estaciones de medición de parámetros de calidad para agua superficial. También mantiene datos históricos de 66 estaciones de calidad de agua a través de la isla, en colaboración con el Programa de Calidad de Agua de la JCA. Además, se cuenta con los datos y estudios especiales realizados por otras entidades incluyendo al DRNA y la academia. Los datos del USGS están disponibles en su página de Internet (www.pr.water.usgs.gov). Los datos recopilados por las demás agencias y por estudios especiales, en su mayoría, no están disponibles fácilmente.

5.7.2 Calidad de las aguas

La Junta de Calidad Ambiental (JCA) prepara el Informe Integrado 305(b)/303(d), para cumplir con lo establecido por las Secciones 303(d) y 305(b) de la Ley Federal de Agua Limpia (Clean Water Act of 1970, CWA por sus siglas en inglés). Como parte de éste, se presenta un inventario de los cuerpos de agua de Puerto Rico y se reporta el estado en que se encuentra la calidad del agua. Los cuerpos de agua que no cumplen con los estándares de calidad de agua aplicables, según se establece en el Reglamento de Estándares de Calidad de Agua de

Puerto Rico (RECA) son incluidos en lo que se conoce como la Lista 303(d) de aguas impactadas.

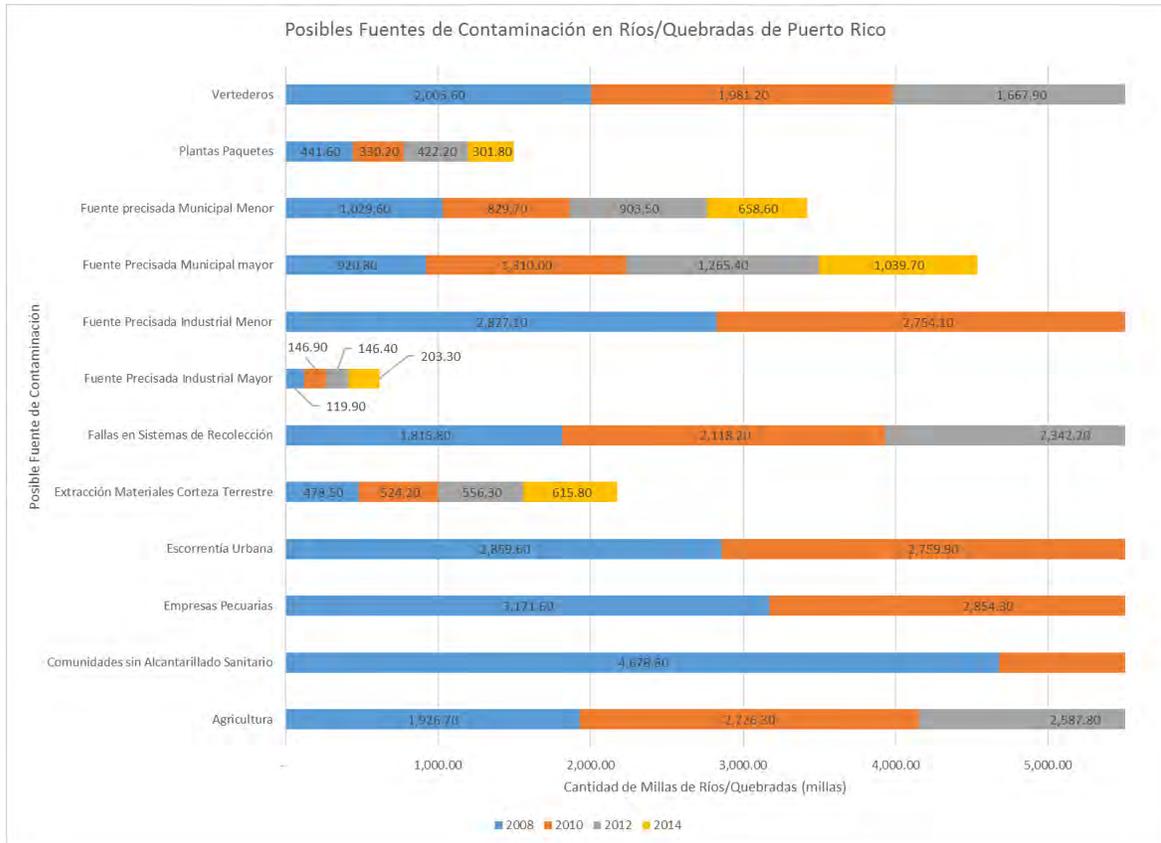
De acuerdo a este informe, Puerto Rico contiene un total de 5,052.80 millas de ríos y quebradas. Entre el 2008 al 2012 se monitorearon más del 57% del total de millas de ríos presentes en Puerto Rico. Ya para el 2014, la cantidad de millas monitoreadas se redujo a un 23% (Gráfica 5.23), principalmente por la falta de fondos o la culminación de proyectos asociados al monitoreo de las aguas. La posible causa de degradación de la calidad del agua en los ríos se asocia, principalmente, con las comunidades sin alcantarillado sanitario, la fuente precisada industrial menor, la escorrentía urbana, las empresas pecuarias y la agricultura (ver Gráfica 5.24). Las posibles causas de contaminación se determinan de acuerdo a la actividad que ocurre cercano al lugar de donde se colectó la muestra de agua. La mayor cantidad de millas de ríos contaminados se debió principalmente a las siguientes causas de incumplimiento: turbiedad, surfactantes (detergentes), oxígeno disuelto, coliformes fecales, cianuro y arsénico (ver Gráfica 5.25).



Gráfica 5.23 Millas de ríos monitoreadas y no monitoreadas por la JCA 2008 - 2014.

Fuente: Información derivada del Informe Integrado 305(b)/303(d) de la JCA para los años 2008-2014 (informe bienal) en comunicación escrita del Sr. Ángel Melendez Aguilar, División Planes y Proyectos Especiales, Área de Calidad de Agua, JCA

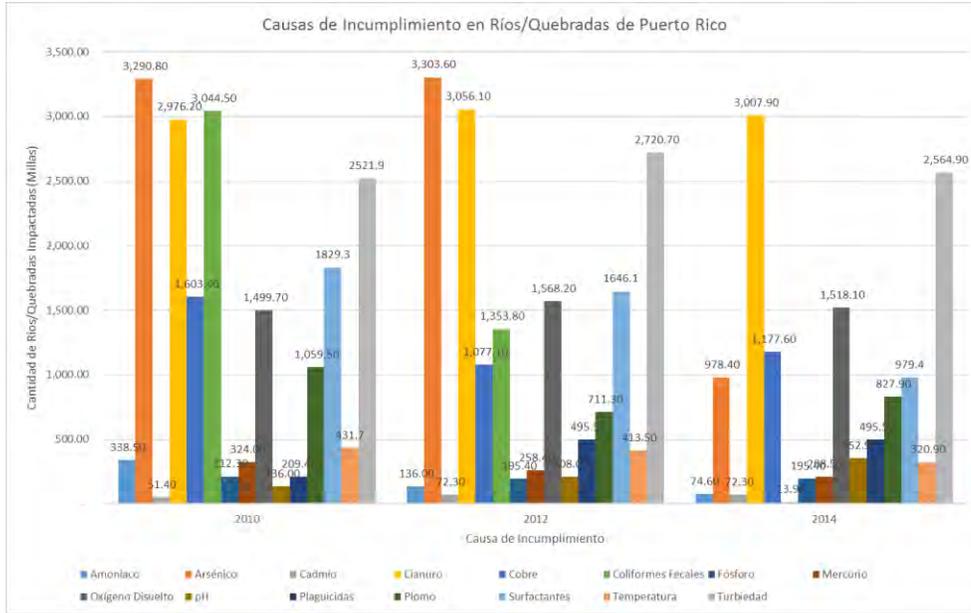
**PLAN INTEGRAL DE RECURSOS DE AGUA
JUNIO, 2016**



Gráfica 5.24 Posibles fuentes de contaminación en ríos y quebradas.

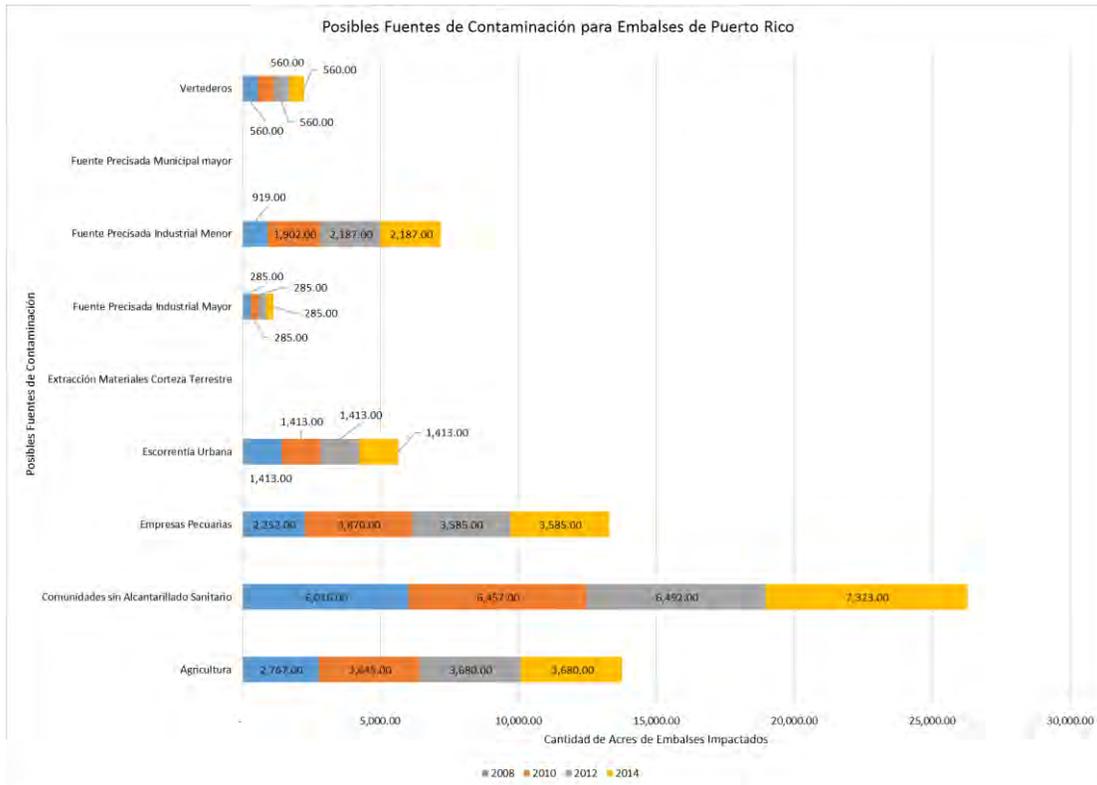
Fuente: Información derivada del Informe Integrado 305(b)/303(d) de la JCA para los años 2008-2014 (informe bienal) en comunicación escrita del Sr. Ángel Melendez Aguilar, División Planes y Proyectos Especiales, Área de Calidad de Agua, JCA

PLAN INTEGRAL DE RECURSOS DE AGUA
JUNIO, 2016



Gráfica 5.25 Causas de incumplimiento en la calidad del agua en los ríos y quebradas de Puerto Rico.

Fuente: Información derivada del Informe Integrado 305(b)/303(d) de la JCA para los años 2008-2014 (informe bienal) en comunicación escrita del Sr. Ángel Melendez Aguilar, División Planes y Proyectos Especiales, Área de Calidad de Agua, JCA



Gráfica 5.26 Posible fuentes de contaminación en los embalses de Puerto Rico.

Fuente: Información derivada del Informe Integrado 305(b)/303(d) de la JCA para los años 2008-2014 (informe bienal) en comunicación escrita del Sr. Ángel Melendez Aguilar, División Planes y Proyectos Especiales, Área de Calidad de Agua, JCA

La JCA también analiza la calidad del agua en los embalses de Puerto Rico. Las principales causas de degradación en estos se relacionaron con la presencia de las comunidades sin alcantarillado sanitario, empresas pecuarias y la agricultura (ver Gráfica 5.25). La principal causa para incumplimiento en los embalses se debió principalmente al oxígeno disuelto. Otras causas de incumplimiento fueron la presencia en las aguas de plaguicidas y de arsénico.

5.7.3 Fuentes de contaminación dispersas

Los contaminantes de fuentes dispersas son aquellos con múltiples puntos de origen y descarga, como son la generación de sedimentos por la erosión de los terrenos y los coliformes fecales del ganado que entran a los ríos y quebradas en diferentes puntos. Las limitaciones de cobertura del servicio de alcantarillado sanitario de la AAA, la falta de controles sobre los métodos autónomos de disposición (pozos muros y descargas directas) también contribuyen a los problemas de calidad. Éstas, junto a las actividades agrícolas, son factores que provocan la contaminación de las aguas superficiales por fuentes dispersas.

En Puerto Rico, casi la mitad de las viviendas y un número indeterminado de comercios no están conectados al sistema de alcantarillado sanitario de la AAA, por lo que recurren a soluciones autónomas para la disposición de sus aguas residuales. Un sistema autónomo a base de un pozo séptico, cuyo diseño, construcción, uso, mantenimiento y el campo de percolación son adecuados, debe proveer un nivel de tratamiento de las aguas usadas de la vivienda satisfactorio. Sin embargo, en Puerto Rico es común encontrar que se construya para tratar las aguas usadas un pozo filtrante, que no siempre es adecuado para este propósito. Principalmente, esto ocurre en las comunidades rurales en las cuales no hay infraestructura sanitaria. Frecuentemente, se observa que descargan los efluentes a las quebradas a través de tuberías ilegales conectadas desde el sistema séptico al cuerpo de agua. Por tal razón, muchos de los sistemas autónomos son fuentes de contaminación. Aún en áreas con servicio sanitario existen problemas a causa de descargas de aguas sanitarias directamente hacia los ríos. Estos incluyen los sistemas de disposición combinados (pluvial y sanitario en un sólo tubo), infiltración de aguas pluviales que hacen desbordar las aguas sanitarias, tuberías sanitarias rotas y desbordes por fallas en las estaciones de bombeo.

Otras fuentes de contaminación dispersa en el ámbito urbano son las descargas ilegales y no autorizadas a los sistemas de alcantarillados pluviales, obras de canalización, entre otros. Este problema se agudiza por la falta de conocimiento de la población general que vierte

pinturas, aceites entre otros compuestos en las alcantarillas pluviales pensando que éstas son alcantarillas sanitarias y que el agua será tratada por la AAA. Por lo cual es necesario continuar con la educación sobre este tema para erradicar este tipo comportamiento nocivo.

Las fuentes de contaminación asociadas con las actividades pecuarias que incluyen aquellas donde hay concentraciones donde los animales están confinados o semi-confinados tales como: granjas de pollos parrilleros, granjas de gallinas ponedoras, vaquerías, granjas de conejos, cabros, cerdos, entre otros. Por ejemplo, una ganadería con 200 vacas puede producir una cantidad de desperdicio orgánico (BOD₅) equivalente a una comunidad de 2,000 personas. Existen sistemas de control para los desperdicios de los animales, pero la combinación de fallas en éstos y la falta de estructuras para evitar que el ganado llegue a los ríos, puede resultar en cargas elevadas de nutrientes y bacterias en los cuerpos de agua. Las cuencas más afectadas por la contaminación de origen pecuario son las de los ríos Guajataca, Grande de Loíza y De La Plata según datos de la JCA.

5.7.4 Contaminación por fuentes puntuales

Las fuentes puntuales son aquellas fuentes que descargan a un cuerpo de agua en un punto en particular, como es la tubería de descarga de una planta de tratamiento. Los puntos de descarga se pueden clasificar en tres grupos:

1. Instalaciones costeras que descargan sus efluentes por medio de tuberías submarinas directamente al mar. En este caso, el impacto de la contaminación se restringe al ambiente marino. Instalaciones que descargan en un cuerpo de agua a pocos kilómetros de la costa. En estos casos, además del ambiente marino, se afectan las aguas superficiales, las costas, las playas y los estuarios.
3. Instalaciones que descargan a cuerpos de aguas en el interior de la Isla. Estas instalaciones frecuentemente descargan aguas arriba de tomas y embalses utilizados para el agua potable. Por ejemplo, la planta de tratamiento regional en Caguas descarga aguas arriba del embalse Loíza, una de las fuentes de abasto para San Juan.

La descarga doméstica e industrial conectada a la red de colectores es tratada por la AAA. La red de plantas de tratamiento de aguas usadas que opera la AAA en la Isla se presenta en la Ilustración 5.29. Los sistemas de tratamiento de las aguas usadas se pueden clasificar en tres niveles (Ilustración 5.30):

1. Tratamiento primario, consiste en la remoción del material que se sedimenta y el material flotante;
2. Tratamiento secundario, consiste en remover la mayor parte de la materia orgánica disuelta que actúa como fuente de alimentación para microorganismos; y
3. Tratamiento terciario, remueve otros contaminantes, particularmente los nutrientes.



Ilustración 5.29 Plantas de tratamiento de aguas usadas.

La mayor parte del volumen de aguas usadas es generado en las ciudades costeras. La disposición hacia el mar representa una alternativa menos costosa para la AAA. Las descargas al océano de efluentes tratados a nivel primario se llevan a cabo mediante dispensas bajo la Sección 301 (h) del CWA. La EPA permite estas descargas sujetas a revisiones periódicas y monitoreo frecuente que demuestre que las aguas descargadas por las plantas primarias no tienen un efecto adverso significativo sobre el medioambiente marino.

Las industrias que descargan a la red municipal no están directamente sujetas a un permiso del Sistema Nacional de Eliminación de Descargas Contaminantes (Permiso NPDES, por sus

siglas en inglés), pero sí están obligadas a lograr un nivel de pre-tratamiento que es reglamentado y supervisado por la AAA y aprobado por la EPA. El propósito del pre-tratamiento es asegurar que los efluentes descargados al sistema de alcantarillado público sean de una calidad que se puedan tratar adecuadamente en las instalaciones municipales. A una industria en particular se le puede exigir límites tan bajos como sea necesario para preservar la calidad de los efluentes de las plantas municipales y así evitar que elementos dañinos interfieran con el proceso de tratamiento.

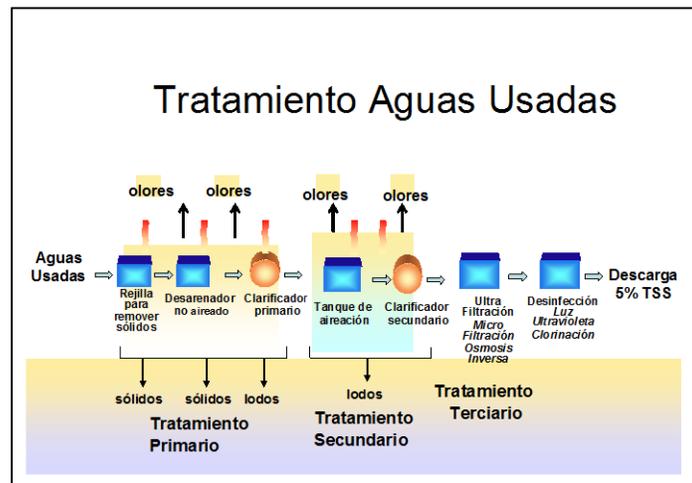


Ilustración 5.30 Tipos de tratamientos de aguas usadas.

5.7.5 Recomendación

El control de la calidad de las aguas es responsabilidad principal de la JCA junto con la EPA. Para apoyar este esfuerzo dentro del contexto del Plan Integral de Recursos de Agua, se recomienda a la JCA asignar prioridad a las actividades de control de calidad tanto de fuentes puntuales como dispersas en las cuencas identificadas como críticas desde el punto de vista del suministro del agua potable, la preservación de los ecosistemas acuáticos y especies nativas.

5.8 Uso y aprovechamiento eficiente del recurso

5.8.1 Conservación de agua por los consumidores residenciales

El mecanismo más efectivo para promover la utilización eficiente del recurso es aumentar el precio. Un precio alto le provoca la necesidad al consumidor de buscar economías en su uso.

Los dos aumentos recientes en el precio del agua impuestos por la AAA tuvieron el efecto de que los abonados redujeron su consumo de agua.

La mayor utilización del agua dentro de la casa es en el baño (el inodoro, lavamanos y la ducha) y el lavado de ropa. En este caso existen opciones para reducir sustancialmente la utilización del agua, sin que el consumidor sufra inconvenientes. La ley federal establece como requisito la instalación de inodoros de bajo consumo de agua, con un máximo de 1.6 galones (6 litros) por uso. Por otro lado, las duchas de flujo reducido (0.5 gpm hasta 1.5 gpm) están disponibles en el comercio local. Efectivo el 24 de julio de 2014 la EPA desarrolló una iniciativa conocida como “WATERSENSE® NEW HOME SPECIFICATION”. Detalles de esta iniciativa y la herramienta diseñada para que el uso del agua en los hogares sea uno eficiente se pueden obtener en el portal de la EPA a través del siguiente enlace: https://www3.epa.gov/watersense/water_budget/. La intención de esta iniciativa es reducir el consumo de agua en el interior y exterior de las nuevas residencias que se construyan o aquellas que se renueven con esta tecnología. La adopción de estas especificaciones tendrá el efecto de reducir el monto de las facturas que reciben los consumidores por el servicio de agua potable, así como fomenta el ahorro de agua y reduce la necesidad ampliar la infraestructura para el manejo de aguas residuales. La meta de la EPA es que las nuevas viviendas con WaterSense utilicen aproximadamente un 20 por ciento menos de agua que un hogar típico.

Los hábitos del uso de agua también influyen en la conservación del recurso. Un grifo abierto consume aproximadamente 1.5 galones por minuto por lo que no cerrarlo mientras se afeita, representa un desperdicio de 5 galones. Los usos del agua fuera de la casa no son sustanciales en Puerto Rico. Sin embargo, este uso también puede mejorar su eficiencia cuando se equipa la manguera con un pistero que quede cerrado, para evitar que la manguera pierda agua por si sola cuando no esté en uso.

5.8.2 Indicador de uso del agua

Actualmente existen herramientas y metodologías que nos ayudan a medir si hacemos un uso juicioso del recurso agua. Entre estas se encuentra la herramienta de la huella hídrica mencionado en los capítulos 1 y 3. Sin embargo, debido a la complejidad de la herramienta y las muchas variables que esta utiliza, no todos los países lo han puesto en práctica. Como se señaló en el capítulo 3, en Puerto Rico el estudio realizado por Ojeda Matos, tema de tesis de maestría en planificación, ha sido el único esfuerzo que se ha hecho en Puerto Rico de

aplicar el concepto de Huella Hídrica a Puerto Rico. Aunque limitado a una cuenca, Ojeda Matos demostró que la herramienta puede ser utilizada como indicador de uso de agua en un área geográfica.

La literatura reseña que esta metodología es una herramienta útil para cuantificar y localizar las huellas hídricas de un país¹⁵, cuenca, gobiernos, organizaciones y procesos, para evaluar si el manejo de agua es sostenible, y así identificar opciones para reducir su magnitud. El hecho de que la gran mayoría de los productos que se consumen en Puerto Rico se producen en otro lugar (son importados) aparenta que la necesidad real de agua pudiera ser mayor de lo que se contabiliza como uso (consumo) de agua en el País.

En el 2014 entró en vigor la Norma Internacional ISO 14046:2014 (Gestión ambiental – Huella hídrica – Principios, requisitos y directrices), en la cual se presentan los principios, requisitos y directrices para la gestión de la huella hídrica. Esta norma facilita el uso del concepto en la gestión del recurso agua que hacen los gobiernos, organizaciones públicas y privadas. Su análisis es bajo la perspectiva de la Análisis de Ciclo de Vida.

Recomendación

Medir la huella hídrica para Puerto Rico es un ejercicio complejo el cual debe hacerse conforme a la ISO 14046:2014 citada. Realizar este estudio requiere la participación de todos los sectores para que sea posible. Esto es un proyecto que puede ser llevado a cabo en Puerto Rico por varios centros de investigación de la academia, pública y privada, como un primer paso de avance para actualizar la forma de medir el uso de agua en el País.

También, hay iniciativas y aplicaciones diseñadas para calcular la huella hídrica personal. Un ejemplo es la conocida como WATERPRINT, (patrocinada por *Water Efficiency: The Journal for Water Resource Management*). Esta puede ser accedida mediante el enlace siguiente: <http://www.waterfootprint.org/?page=cal/WaterFootprintCalculator>.

¹⁵ Los gobiernos de muchos países europeos y varios de Latinoamérica (Argentina, Colombia y otros) ya han medido su huella hídrica

5.9 Fuentes de agua no-convencionales

En Puerto Rico existen varias alternativas de fuentes de abasto no-convencionales. Ante las limitaciones que confrontan las fuentes que sostienen la disponibilidad actual, algunas de estas alternativas pueden representar estrategias útiles para Puerto Rico.

5.9.1 Reutilización de las aguas usadas municipales

Las aguas usadas tienen el potencial de servir como una fuente de abasto suplementaria de agua para diversos usos en Puerto Rico. En la Isla se generaron aproximadamente 232 mgd de aguas usadas en el año 2015 de aguas sanitarias producidas en las plantas de tratamiento que opera la AAA. La mayor parte de las aguas usadas que genera el sector industrial son reutilizadas en los procesos industriales, por lo que las descargas al medioambiente son muy reducidas. De las aguas usadas que genera la AAA sólo se reutiliza el efluente directo de la Planta de Tratamiento de Guayama (hasta 4 mgd) para enfriamiento en la planta de generación de AES-Puerto Rico. Indirectamente se reutilizan hasta 35 mgd de las aguas tratadas por la AAA para suplir abasto público, principalmente en las cuencas del río Grande de Loíza, el río De La Plata y el río Grande de Arecibo.

Existe una variedad de oportunidades para la reutilización de agua, particularmente para riego. Actualmente se están reutilizando aguas tratadas al nivel secundario para el riego de varios campos de golf en la Isla. Sin embargo, el volumen mayor de las aguas tratadas proviene de plantas de aguas ubicadas en la costa que solamente proveen un nivel de tratamiento primario antes de descargar mar afuera y no están próximas a áreas de riego. En la costa sur existen plantas de tratamiento secundario que se podrían considerar como fuente de riego y en el caso de la planta de Santa Isabel, el Departamento de Agricultura ya ha indicado interés en la re-utilización de su efluente para riego. La recarga de acuíferos es otra alternativa que se puede considerar como una opción de reutilización, particularmente en la Costa Sur, pero para este uso sería importante la remoción de nitrógeno antes de realizar la recarga.

La utilización de aguas sanitarias tratadas como posible fuente de abasto para consumo humano necesita mayor estudio debido a la posibilidad de efectos adversos sobre la salud pública. Los sistemas de tratamiento de aguas sanitarias ayudan a reducir los sólidos suspendidos, a desinfectar y en algunos casos como las plantas de tratamiento terciario, a

reducir la concentración de fosfato y nitrato en los efluentes. Los sistemas de filtración de aguas crudas proveen para la reducción de sedimentos suspendidos y la desinfección. Sin embargo, ninguno de estos sistemas provee para la eliminación de contaminantes disueltos, incluyendo compuestos sintéticos relacionados al uso de medicamentos, tales como esteroides, anticonceptivos, antidepresivos y antibióticos que están presentes en concentraciones bajas en las aguas usadas. Algunos de estos compuestos tienen la capacidad de inducir efectos hormonales, provocando cambios neurológicos y fisiológicos en seres vivientes. Aunque al presente se desconoce el efecto de la exposición crónica sobre la salud pública por utilizar aguas sanitarias con estos compuestos, un número creciente de estudios apuntan hacia impactos en la salud de especies acuáticas.

Hay técnicas naturales para la remoción de varios de estos compuestos, por ejemplo, mediante la exposición a la luz solar y por los procesos naturales en humedales. Un nivel adicional de tratamiento es recomendable y puede ser provisto por un sistema natural (humedal).

La descarga hacia cuerpos de agua afluentes a los embalses es la técnica de reutilización indirecta que más se practica en Puerto Rico y a nivel mundial donde muchas plantas de filtración (agua potable) se encuentran aguas abajo de descargas municipales. Como se mencionó anteriormente, los embalses Loíza y La Plata reciben aguas tratadas de las comunidades aguas arriba que descargan en los ríos tributarios de éstos. El embalse de Fajardo ha sido diseñado para aceptar el efluente de la planta de tratamiento regional aumentando así su rendimiento seguro, que por diseño es de 12 mgd hasta 18 mgd. Uno de los aspectos más interesantes de enviar el agua hacia los embalses es que no siempre se requiere un proceso de reciclaje continuo para lograr un aumento significativo en su rendimiento seguro. En el caso de Fajardo la reutilización es necesaria sólo cuando el nivel del lago empieza a bajar, una situación que no ocurre todos los años. De esta manera se puede aumentar el rendimiento seguro con un mínimo de dependencia de agua tratada. Además, en Fajardo se recomendó que las aguas tratadas sean pasadas a través de un humedal artificial para tratamiento adicional antes de ser recicladas hacia el embalse.

La preocupación por el efecto de los productos de farmacia que se descargan a las aguas usadas y de allí a los ríos de Puerto Rico es una que va en aumento. Concurrimos con la Organización Mundial de Salud (OMS) de que es necesario resaltar la importancia de este asunto nuevo y darle prioridad en el contexto general de la administración del agua, en

específico de la calidad de las aguas, que incluye las concentraciones de microbios y otros riesgos químicos que puedan poner en peligro la seguridad del agua potable. Para mayor información refiérase al portal de la OMS a través del siguiente enlace: http://www.who.int/water_sanitation_health/emerging/info_sheet_pharmaceuticals/en/

5.9.2 Desalinización de aguas salinas y salobres

Las aguas de mar tienen una salinidad (concentración de sólidos disueltos totales) de aproximadamente 34,000 mg/L, mientras las aguas salobres se definen como las que contienen entre 1,000 y 10,000 mg/L de sólidos disueltos totales. La EPA y el Departamento de Salud recomiendan que la concentración de sólidos disueltos totales en el agua potable no exceda 500 mg/L. Puerto Rico cuenta con abastos ilimitados de agua salina en el océano. Además, en las zonas costaneras de las Regiones Norte y Sur de la Isla existen áreas con aguas salobres con potencial para alimentar plantas desalinizadoras. La tecnología de Osmosis Invertida (RO, “reverse osmosis” en inglés), es el proceso desalinizador más económico disponible.

Las membranas de osmosis invertida consisten de poros tan pequeños que permiten pasar el agua, pero no las sales contenidas en la misma, aplicando una presión de aproximadamente 600 libras por pulgada cuadrada en el caso de agua del mar (la presión es menor para agua salobre). En términos generales, la eficiencia de los sistemas de desalinización mejora mientras menor es la salinidad del agua. El rendimiento del agua potable en relación al agua de salmuera que regresa al mar es de 30 por ciento al tratar agua del mar. Dicho rendimiento puede aumentar hasta cerca de 60 por ciento al utilizar agua con una concentración menor de 10,000 mg/L de sólidos disueltos en lugar de agua de mar (AWWA, 2003), lo que representa una reducción en costo.

Las membranas son altamente sensibles a taparse de forma irreversible con contaminantes en el agua, incluyendo los sedimentos más finos y moléculas orgánicas. Por tal razón, las plantas de osmosis invertida normalmente requieren de sistemas de filtración con múltiples etapas como pre-tratamiento. Aún las plantas más modernas sufren de este problema. Por ejemplo, la planta de osmosis invertida de 25 mgd construida en Tampa, Florida, empezó con una operación intermitente en 2003, pero su sistema de pre-tratamiento no fue adecuado para manejar la calidad de las aguas y fue necesario cerrar la planta luego de producir un volumen de agua equivalente a unos 200 días de operación. En Puerto Rico, la planta

desalinizadora de Culebra, un sistema de osmosis invertida de 0.1 mgd de capacidad, también sufrió problemas severos relacionados a su sistema de pre-tratamiento.

Varios lugares con potencial para el desarrollo de plantas desalinizadoras utilizando agua salobre que se han identificado, incluyen el Caño Tiburones, la Laguna Tortuguero, los acuíferos costaneros en la Región Norte en Campanillas y Dorado y los acuíferos aluviales de la Costa Sur en las áreas de Coamo-Santa Isabel y Salinas-Guayama.

El agua salobre en el Caño Tiburones y la Laguna Tortuguero contiene concentraciones de material orgánico disuelto cuya remoción es muy difícil, por lo que se anticipan problemas severos con relación al pre-tratamiento. Este problema del material orgánico no existe al utilizar agua salobre de los acuíferos, pero la concentración de la salinidad en la zona de extracción se alteraría una vez se someta el acuífero a un bombeo continuo. Se anticipa un aumento gradual en la salinidad de la zona de bombeo, reduciendo progresivamente el rendimiento del sistema desalinizador.

Los factores principales que limitan el potencial de implantar la desalinización en Puerto Rico se resumen a continuación:

1. El costo de la desalinización de agua es mucho mayor que el producir agua potable de fuentes superficiales y subterráneas.
2. Debido a su requerimiento de alta presión, el costo de bombeo es alto, particularmente con el alto costo de la energía eléctrica en Puerto Rico.
3. La vida útil de las plantas desalinizadoras es menor que la de cualquier fuente convencional, superficial o subterránea. El agua salina o salobre es corrosiva, por lo que afecta con más rapidez todos los componentes de una planta desalinizadora. Las plantas desalinizadoras requieren una operación cuidadosa con un mantenimiento constante, que incluye el reemplazo de las membranas y rehabilitaciones extensivas, para extender su vida útil más de 20 años. El costo de la inversión capital inicial más los costos de operación y mantenimiento incrementan sustancialmente el costo de la desalinización.
4. Otros inconvenientes de la tecnología incluyen la disposición de la salmuera de una planta desalinizadora, la necesidad de pos-tratamiento para estabilizar el agua

desalinizada que es corrosiva y los costos de mejorar los sistemas de transmisión para poder bombear el agua desde el nivel de mar hasta las áreas de servicio.

Hay amplias opciones para suplir todas las necesidades de aguas actuales y proyectadas utilizando una combinación de fuentes superficiales y subterráneas, sin recurrir a la desalinización del mar. Además, también hay oportunidades grandes de reducir la necesidad de abasto mediante la reparación de las filtraciones (pérdidas) en el sistema de transmisión y distribución de la AAA. Ante este panorama, no se vislumbra la necesidad de recurrir a procesos de desalinización, por lo que no se recomienda esta tecnología en Puerto Rico.

5.9.3 Cisternas para recoger agua de lluvia

En áreas donde el suministro de agua por la AAA es intermitente es común colocar pequeñas cisternas (<500 gal) sobre los techos de las casas para mantener una fuente de agua constante. Sin embargo, sistemas que utilizan cisternas en el piso para capturar la escorrentía de los techos se utilizan con poca frecuencia en Puerto Rico. A pesar de que estos sistemas fueron utilizados por siglos en Puerto Rico, hoy en día han sido eliminados en su mayor parte a favor de utilizar el agua de la AAA.

Según dicta el Artículo 9 (c) de la Ley Núm. 136 de 3 de junio de 1976, según enmendada, Ley para la Conservación, el Desarrollo y Uso de los Recursos de Agua de Puerto Rico (Ley de Aguas), el cual lee como sigue: “El Secretario preparará planos modelos de obras menores para el recogido de agua de lluvia que caiga dentro de los límites de una propiedad, tales como charcas, embalses y cisternas, que sería aprovechada para un uso doméstico o agrícola. Los planos modelos serán distribuidos, sin pago alguno, a personas interesadas que así lo soliciten.”. Por esta razón, se propone estudiar alternativas y preparar planos modelos para el recogido o cosecha de agua de lluvia.

Los dos impedimentos principales a la utilización de agua de cisternas de lluvia son el costo y la calidad del agua. Para proveer un sistema de abasto confiable se requiere de cisternas grandes, con más de 2,000 galones por casa, para proveer el volumen necesario y suplir agua durante periodos sin lluvias. Un sistema completo, incluyendo 2,000 galones de almacenaje, bomba para suplir agua a presión a la casa y un sistema de desinfección por luz ultra-violeta, probablemente cuesta \$4,000.00 o más. Para algunas familias esto representaría una inversión grande, a lo que hay que añadir el costo anual de operar y mantener el sistema de

bombeo y desinfección. En general, es más económico hacer una conexión a la AAA. La ventaja del sistema es que el propietario tiene control sobre su propia fuente de agua y durante las sequías, cuando la AAA no puede suplir agua de manera constante, el sistema de cisterna puede representar una fuente de mayor confiabilidad.

En las cisternas¹⁶ que se suplen de esorrentía del techo no existen mecanismos de control de polvo u otro material que cae en el techo, o el acceso al techo de animales que pueden incluir aves y roedores, entre otros. Por tanto, la calidad de la esorrentía del techo no está garantizada. La desinfección se llevaría a cabo casa por casa de forma individual, sin garantía de que se cumpla con los criterios de calidad para agua potable, según establece el Departamento de Salud como medida cautelar para evitar enfermedades o problemas de salud en general.

Los costos altos y la falta de garantía en el control de la calidad de las aguas almacenadas en las cisternas individuales llenadas con agua de lluvia, colocan en ventaja el conectarse al servicio de abasto de agua potable que provee la AAA o un sistema Non-PRASA. Es una decisión individual que se debe tomar teniendo en cuenta los costos económicos y el riesgo a la salud que tiene esta alternativa.

Sin embargo, captar agua de lluvia es la opción que tienen aquellos que no cuentan con este recurso, ya sea porque no tienen un cuerpo de agua superficial perenne cerca, no ubican en zonas con acuíferos productivos ni tienen servicio de agua potable de un sistema privado ni de la AAA. Se pueden construir y operar un sistema de captación de agua de lluvia para consumo humano a nivel de familia. Existe la tecnología y el conocimiento para captar, filtrar, almacenar y hasta envasar agua de lluvia. Se pueden utilizar el agua de lluvia capturada para uso doméstico y agrícola.

Dentro de las ventajas que tiene la cosecha de agua de lluvia es posible construirlo en cualquier lugar de Puerto Rico. Además, el agua de lluvia puede alcanzar los estándares de agua potable si el sistema está bien diseñado y mantenido. Esto es un costo que no puede

¹⁶ En el caso de las cisternas, es necesario instalar una serie de válvulas que eviten la entrada de esta agua al sistema de agua potabilizada por la AAA.

ser evitado si es la fuente de agua para consumo humano, si es para uso no potable, el costo de manejo es relativamente bajo.

Otra alternativa, que ha sido implantada a gran escala, es la de ubicar en los techos tanques cerrados, cuyo volumen representa pocos días de uso, suplidos y llenados por agua de la AAA o sistemas independientes. Esto se utiliza mucho en las zonas donde el servicio de la AAA es deficiente. De esta manera, las familias se aseguran tener servicio de agua potable en sus casas aun cuando el servicio de la AAA falte.

5.10 Solución de conflictos de usos existentes y potenciales

En la actualidad, el conflicto principal en Puerto Rico, respecto al uso de los recursos de agua, se da entre los planes del Departamento de Agricultura de aumentar la producción agrícola bajo riego y las necesidades de los demás usuarios, principalmente el sector municipal. También existe el conflicto entre la utilización de agua de uso doméstico y la necesidad de mantener un caudal ambiental.

Es por esta razón, que el PIRA desarrolla una serie de proyectos en el Capítulo 6 enfocadas a una mejor distribución del recurso entre los diferentes usuarios. Algunos ejemplos de proyectos presentados son: Caudal Ambiental, estudios de demanda por usuario, entre otros.

5.11 Uso del terreno

Resulta incuestionable la relación que existe entre las actividades que se realizan sobre el territorio y su impacto sobre el recurso agua. Algunas actividades sobre el territorio tienen un impacto mayor en la calidad y disponibilidad del agua. La deforestación, para dar paso a construcciones urbanas o a la infraestructura que éstas requieren, tiene consecuencias directas en la erosión de los suelos y en los procesos de sedimentación de los cuerpos de agua y embalses. Esto a su vez afecta la calidad del recurso y abona al deterioro de las condiciones necesarias para el sostenimiento de la biodiversidad asociada. También, tiene consecuencia en los costos en que se tiene que incurrir para procesar el agua para el consumo humano. En cuanto a la extensión del área urbanizada, ésta tiene implicaciones muy perjudiciales, ya que se impermeabilizan las áreas de recarga de los cuerpos de agua subterránea. Como se puede observar en la Ilustración 5.30 las áreas urbanizadas se extienden en corredores

paralelos a las costas norte, sur y oeste y en los valles interiores de la Isla. Muchos de estos terrenos constituyen áreas de recarga de los principales acuíferos del País.



Ilustración 5.32 Zonas de construcción urbana en Puerto Rico.

Con esta situación en mente, la Junta de Planificación propone la creación de un Plan Sectorial de Embalses y Cuencas. El propósito de este plan es el de proteger las cuencas inmediatas de los embalses, rehabilitar y mantener los embalses, reducir la sedimentación de los ríos y promover un mantenimiento adecuado de los ríos, quebradas y riberas. El PIRA acoge los objetivos de este plan ya que es cónsono con las políticas públicas de protección del recurso desarrolladas en este documento.

Planificar el uso de los terrenos es fundamental a la hora de proteger el recurso agua. Por lo cual este plan promueve la planificación del territorio teniendo en cuenta la cuenca hidrográfica. Es necesario que, a la hora de clasificar áreas para distintos usos, se tenga en cuenta la red hidrográfica con sus zonas de amortiguamiento, zonas de recarga y zonas de inundación. Esto con el fin de conservar los recursos de agua que tan necesarios son para el desarrollo del País. El Plan de Uso de Terrenos acoge este planteamiento y ha desarrollado un distrito de calificación Suelo Rústico Especialmente Protegido por su Valor Hídrico (SREP-H). Este distrito protege las áreas de valor hídrico asociadas a los embalses, ríos y zonas de recarga a los acuíferos mediante restricciones al desarrollo de estos terrenos.

5.12 Riesgos de inundaciones

Las obras de control de inundación pueden tener un gran impacto sobre el curso de los ríos y los ecosistemas acuáticos. Cualquier esfuerzo para proteger los ecosistemas acuáticos y manejar el recurso de forma integrada debe tomar en consideración las limitaciones impuestas por los problemas de inundaciones.

5.12.1 Naturaleza de las inundaciones

El desbordamiento de los ríos es un fenómeno natural y necesario para la formación de los valles aluviales. La Junta de Planificación (2005) estima que en la Isla existen cerca de 300,000 cuerdas (455 mi²) de terreno sujeto a inundaciones, de los cuales más de 200,000 cuerdas están ubicadas en la zona costanera.

Las inundaciones dejan de ser un fenómeno natural y se convierten en problemas sociales y económicos, tan pronto la actividad humana se desplaza y ocupa las zonas inundables. Debido a la escasez de terrenos llanos en Puerto Rico muchas actividades económicas y de infraestructura urbana han sido ubicadas en dicha zona.

Los problemas de inundaciones en Puerto Rico se pueden atribuir a las siguientes clases de situaciones.

- **Cascos urbanos y su expansión.** Hay zonas urbanas que fueron construidas en áreas con alto riesgo de inundaciones por falta de conocimiento (por ejemplo, Ponce y Toa Baja), o construcciones anteriores a la disponibilidad de técnicas de ingeniería y reglamentación adecuada (por ejemplo, el sector Puerto Nuevo en San Juan).
- **Construcción por lotificación simple y espontánea.** La población más expuesta al problema de las inundaciones es aquella que vive en áreas de lotificación no regulada, que son áreas donde los estándares mínimos de construcción no se aplican por una combinación de razones económicas, políticas, sociales e históricas. Sin embargo, en estas áreas se continúan construyendo edificaciones nuevas que no cumplen con la reglamentación vigente y que no proveen protección contra las inundaciones. Este problema nunca ha sido resuelto.

- **Errores técnicos.** El Reglamento Núm. 13 (Reglamento de Planificación sobre Áreas Especiales de Riesgo a Inundación) de la Junta de Planificación y los mapas de áreas susceptibles a inundación entraron en vigor en el 1974. No obstante, hay urbanizaciones nuevas que experimentan problemas de inundación, a pesar de que aparentemente cumplen con las normas y las reglamentaciones. Sin embargo, han ocurrido errores en establecer los niveles de inundación o de construcción, en el análisis de áreas no-clasificadas por FEMA, al igual que errores de diseño. Este problema no es frecuente, pero aún persiste. El Reglamento Núm. 13 establece como política pública no favorecer la construcción en áreas inundables. El problema es que el proceso de urbanización se ha limitado a determinar si el terreno es inundable y si la obra propuesta afecta o aumenta el nivel de inundación para determinar si es necesario mitigar por inundación.

Se anticipa que el cambio climático conllevará un aumento en la frecuencia de crecidas grandes de los ríos y quebradas, lo cual afectará todas las áreas ya afectadas por inundaciones recurrentes. El problema de inundación en la zona costanera, incluyendo los tramos de los ríos bajo la influencia del efecto de la marejada, se agrava por el problema del aumento en el nivel del mar a consecuencia del cambio climático. Según la NOAA, la tasa del aumento en el nivel del mar apunta a un incremento continuo. De acuerdo a las estaciones de medición del nivel de la marea, el aumento ha sido: 1.87 mm/año en San Juan y de 1.6 mm/año en La Parguera¹⁷. El problema de la inundación de las áreas costeras se convertirá en uno de los problemas más difíciles de Puerto Rico.

5.12.2 Causas de las inundaciones

Aumento en las crecidas por el desarrollo. Varias etapas del desarrollo afectan la hidrología y contribuyen a aumentar la magnitud de las inundaciones. La impermeabilización de los suelos aumenta el volumen de escorrentía superficial, mientras los sistemas de drenaje pluvial y canalizaciones aceleran la velocidad del flujo. Ambos factores aumentan el caudal de las inundaciones. Sin embargo, los embalses tienen el efecto de reducir levemente los

¹⁷ <http://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends.html>

caudales máximos de las inundaciones aguas abajo, aun cuando se construyeron principalmente para el abasto de agua potable.

Las condiciones hidráulicas en los ríos y sus planicies inundables también han sido alteradas por los procesos de desarrollo. La construcción de infraestructura urbana sobre las planicies inundables conlleva a la colocación de relleno o la construcción de diques. Esto elimina el espacio que antes estaba disponible para almacenar parte del agua de las crecidas y produce un aumento en el nivel de inundación.

Construcciones fuera de ley. De acuerdo a la reglamentación existente, los problemas de inundación no deberían aumentar con el tiempo. Sin embargo, Puerto Rico confronta un problema muy serio con respecto a las construcciones fuera de ley. En ocasiones el gobierno estatal y el municipal han apoyado indirectamente las construcciones ilegales, proveyendo servicios de luz y agua, pavimentando las calles y llevando a cabo mejoras en zonas altamente inundables en violación directa a las leyes y reglamentaciones vigentes. Esto ocurre aún en comunidades donde no existe ninguna posibilidad de eliminar el riesgo de las inundaciones.

Deficiencia en mantenimiento de la infraestructura. Muchas de las inundaciones urbanas son ocasionadas o agravadas por la falta o el pobre mantenimiento de la infraestructura pluvial. También, al momento de aprobar permisos para las construcciones nuevas, no se toma en consideración la capacidad de los sistemas pluviales. Igualmente, ocurren intervenciones ilegales de los pluviales que comprometen su integridad y capacidad.

Diseños inapropiados de atarjeas. El diseño de atarjeas con poca capacidad para manejar eventos de inundación o simplemente mal diseñadas, también es una situación que provoca inundaciones. El DRNA consciente de este problema ha desarrollado un documento guía para el proceso de construcción y reemplazo de atarjeas en Puerto Rico, disponible tanto para el público general como para las agencias y municipios encargados de regular y construir este tipo de estructuras.

Construcción en las planicies de inundación. La construcción inmediata a los cuerpos de agua sin guardar una distancia prudente para que las crecidas no afecten la obra construida es otra de las causas de inundación. Es necesario que como País respetemos los cursos naturales de los ríos y de sus planicies de inundación para de esta manera evitar el aumento de las pérdidas de vida y propiedad a causa de las inundaciones. En aquellos casos donde las comunidades ya estén establecidas dentro de la planicie de inundación de algún río, es

necesario estudiar la costo – efectividad de relocalizar las mismas. De esta manera se evita tener que entrar en proyectos costosos para proteger la vida y propiedad de estas comunidades en tiempos de crisis fiscal.

Aunque el problema de las inundaciones es uno que afecta mayormente a las familias de recursos económicos limitados y la condición de inundabilidad es un componente significativo que contribuye a su pobreza, la incidencia de este problema en sectores económicos de mayor ingreso ha aumentado. La reglamentación para evitar la construcción en áreas inundables fue aprobada debido a los daños económicos y sociales asociados. Es muy difícil lograr que una familia mejore su situación económica cuando está sujeta a las pérdidas asociadas causadas por las inundaciones frecuentes.



Ilustración 5.32 Inundaciones históricas ocurridas en Puerto Rico desde 1928 al 1998.

5.12.3 Estrategias para el control de las inundaciones

Las estrategias para el control de las inundaciones se pueden clasificar en dos grupos principales. Uno de “medidas estructurales” que incluyen obras como canalizaciones, relleno

y embalses y otro de “medidas no-estructurales” como el control de uso del terreno y la relocalización de familias ubicadas en áreas con alto riesgo de inundación.

Las limitaciones en las medidas estructurales han llevado al Gobierno de Estados Unidos a enfocar progresivamente sus esfuerzos de control de inundaciones hacia las medidas no-estructurales. Las medidas estructurales son costosas, requieren mantenimiento y si fallan pueden resultar en daños cuantiosos y catastróficos. Algunos ejemplos de situaciones donde la población ha estado expuesta a los peligros de las fallas estructurales son: las inundaciones del río Mississippi en el 1993 y la inundación de New Orleans luego del huracán Katrina en el año 2005.

Por lo tanto, se recomienda en el tema de control de inundaciones utilizar la implementación de medidas no estructurales que favorezcan tanto a la población como a los cuerpos de agua superficiales del País.

5.13 Referencias

AAA (2015). *Informe de Rendición de cuentas Primer Trimestre Año Fiscal 2015-2016*. (diciembre 2015). Recuperado el 16 de febrero de 2016, de: http://www.acueductospr.com/INFORME/2015d/INFORME_RENDICION_CUENTAS_AÑO_FISCAL_2015_noveno.pdf

Conde-Costas y Gómez-Gómez, F. (1999). *Assessment of nitrate contamination of the upper aquifer in the Manatí-Vega Baja area, Puerto Rico*. (No. 99-4040). U.S. Geological Survey.

CSA (2005). *Viabilidad de Aumentar el abasto de agua para usos domésticos y agrícolas en el Valle de Lajas*. Informe a la AAA, San Juan.

Jasechko, Scott, and Richard G Taylor (2015). *Intensive Rainfall Recharges Tropical Groundwaters*. Environmental Research Letters 10 (12): 124015. doi:10.1088/1748-9326/10/12/124015.

Knights, B. & White, E. (1998). *Enhancing immigration and recruitment of eels: the use of passes and associated trapping system*. Fisheries Management and Ecology 5, 459–471.

Kuniansky, E.L., Gómez-Gómez, Fernando, and Torres-González, Sigfredo (2004). *Effects of aquifer development and changes in irrigation practices on ground-water availability in the Santa Isabel area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 03-4303*. San Juan, Puerto Rico.

Kuniansky, E. L., & Rodriguez, J. M. (2010). *Effects of Changes in Irrigation Practices and Aquifer Development on Groundwater Discharge to the Jobos Bay National Estuarine Research Reserve near Salinas, Puerto Rico* (No. 2010-5022). US Geological Survey.

López, Taina del Mar; Aide, T. Mitchell; Scatena, F.N. (1998). *The effect of land use on soil erosion in the Guadiana watershed in Puerto Rico*. Caribbean Jour. Sci., 34(3-4):298-307.

McClymonds, N. E., & Díaz, J. R. (1972). *Water resources of the Jobos Area, Puerto Rico: A preliminary appraisal*. Water Resources Bulletin, 13.

Morris, G.L. and Fan J. (1997). *Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoir and Watersheds for Sustainable Use*. McGraw-Hill, New York.

Natural Resources and Conservation Service & Puerto Rico Environmental Quality Board. (2005). *Puerto Rico erosion and sediment control handbook for developing areas*. San Juan, Puerto Rico. Publicación de la Junta de Calidad Ambiental de Puerto Rico.

Rodriguez, J. M. (2006). *Evaluation of hydrologic conditions and nitrate concentrations in the Río Nigua de Salinas alluvial fan aquifer, Salinas, Puerto Rico, 2002-03* (No. 2006-5062).

Rodríguez, José M. 2013. *Evaluation of Groundwater Quality and Selected Hydrologic Conditions in the South Coast Aquifer, Santa Isabel Area, Puerto Rico, 2008-09*. USGS Scientific Investigations Report 2012-5254. San Juan. Scatena, F. N., & Johnson, S. L. (2001). *Instream-flow analysis for the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico: methods and analysis*.

Smith, R.M. and Abruña, F. (1955). *Soil and Water Conservation Research In Puerto Rico, 1938 to 1947*. Univ. P.R. Ag. Exp. Sta. Bull. 124, Río Piedras.

Soler-López, Luis (2012). *Sedimentation Survey of Lago Dos Bocas, Utuado, Puerto Rico, January 2010*. Scientific Investigations Map 3217, USGS, San Juan.

Tamir, K. (2007). *Rio Piedras Restoration Project*. Topos: European landscape magazine, (59).

Waller, Roger M. (1982). *Groundwater and the rural home owner*, pamphlet, US Geological Survey.

Williams Jr, E. H., Bunkley-Williams, L. U. C. Y., Lilyestrom, C. G., & Ortiz-Corps, E. A. (2001). *A review of recent introductions of aquatic invertebrates in Puerto Rico and implications for the management of nonindigenous species*. Caribbean Journal of Science, 37(3-4), 246-251.



PLAN INTEGRAL DE RECURSOS DE AGUA

CAPÍTULO 6

Políticas, objetivos y proyectos

RESUMEN

Este capítulo presenta las políticas, proyectos y objetivos que este plan establece para su implantación con el fin de lograr un buen manejo y conservación del recurso. Junto a estos proyectos y objetivos se presentan los indicadores y fuentes de financiamiento.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	6-1
1. Reducción de pérdidas en el sistema de distribución de agua.....	6-3
2. Demanda del recurso agua.....	6-4
3. Conservación y uso eficiente del recurso agua.....	6-8
4. Manejo de los acuíferos.....	6-18
5. Manejo de las aguas superficiales.....	6-22
6. Cambio Climático.....	6-28
7. Educación.....	6-30
8. Instrumentos de apoyo.....	6-32
9. Asignación de fondos.....	6-33
Referencias.....	6-34

Introducción

A partir del diagnóstico y los análisis realizados en los capítulos anteriores, en este capítulo se describen las políticas, objetivos y proyectos a realizarse mediante la implantación de este Plan. Además, se identifican las agencias responsables para llevar a cabo cada uno de los proyectos y el periodo en el cual deberán ser completados así como un preliminar de la fuente de los fondos necesarios para su ejecución. Finalmente, se establecen unas métricas de cumplimiento para cada tarea a realizarse de modo que cuando se revise el plan al cabo de 5 años, se pueda evaluar efectivamente los resultados.

Existen tres dimensiones sobre las cuales articular las políticas, objetivos y proyectos del Plan (véase Ilustración 6.1). Éstas son:

1. manejo y uso del recurso,
2. manejo y uso del territorio e
3. instrumentos de apoyo.

En la primera, son asunto prioritario las acciones dirigidas a lograr niveles óptimos de eficiencia en la infraestructura de distribución y, principalmente, reducir las pérdidas del sistema de distribución de la AAA. Igualmente, es medular manejar la demanda previa a considerar acciones dirigidas en el lado de la oferta. La atención de ambos asuntos tendría el efecto de evitar inversiones públicas dirigidas a ampliar la infraestructura existente y, por tanto, evitar sus impactos económicos, ambientales y sociales.

En la segunda, el manejo de la cuenca hidrográfica y la protección de las áreas de importancia hídrica constituyen acciones cardinales que tienen consecuencias directa y a largo plazo en la calidad y disponibilidad del recurso agua.

En la tercera, el énfasis se dirige a disponer de la información y los datos necesarios para entender y manejar el recurso y que los mismos sean confiables y accesibles.

A continuación se presentan cada una de las políticas, objetivos y proyectos.



“Manejar los recursos de agua de Puerto Rico de manera sostenible con el propósito de apoyar el desarrollo económico, garantizar la productividad agrícola, proteger la salud y el bienestar de la población y de los sistemas naturales y elevar la calidad de vida de los ciudadanos”.



Ilustración 6.1. Diagrama de articulación de los objetivos.

1. Reducción de pérdidas en el sistema de distribución de agua

Política Pública

Fomentar el manejo adecuado, el uso y aprovechamiento del agua de manera eficiente, será una consideración fundamental en la toma de decisiones.

Durante décadas la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados ha tenido problemas de aumento en los niveles de agua no contabilizada. Estos niveles han incrementado de un 25% para el año 1975 (COE & GCPR, 1980) hasta un 61.6 % en el año 2012. Al presente, según informes de la AAA, el por ciento de pérdidas se encuentra en 55.2%, del cual un 76.6% se debe a pérdidas físicas y el 23.4% se debe a hurto, errores de lectura o medición en los metros y consumo autorizado no facturado (AAA, 2015).

Esto significa que en la actualidad, se estima que el nivel de pérdidas físicas se encuentra en un 43%. Este nivel de pérdida es insostenible para el buen manejo del recurso agua en Puerto Rico. La Asociación Americana del Agua (AWWA, por sus siglas en inglés) estima que el por ciento saludable de pérdida fluctúa entre un 10 a un 15%, por lo cual ésta debe ser la meta a la cual se debe aspirar.

En el Capítulo 4 de este Plan, se establecen los requerimientos de producción y demanda del recurso agua en Puerto Rico. En la sección de Conclusiones y Recomendaciones se requiere atender de forma proactiva el problema del agua no contabilizada y minimizar las pérdidas del sistema de distribución. En el Capítulo 5 se discute el detalle de las pérdidas y maneras de reducirlas.

OBJETIVO

Dentro de un periodo de 10 años, tomando en cuenta los datos de la AAA del 2015, se debe reducir en un 18% las pérdidas físicas de agua.

AGENCIA RESPONSABLE

AAA

INDICADOR

Informe anual de reducción de las pérdidas físicas. La reducción anual mínima debe ser de 1.8%.

ACCIÓN

El Plan de Mejoras para el Control de Pérdidas debe dar prioridad a las áreas donde el reemplazo sea costo-eficiente.

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos AAA

2. DEMANDA DEL RECURSO AGUA

Política Pública

Lograr una distribución equitativa y justa del recurso para satisfacer las necesidades de agua de los diferentes usuarios.

De acuerdo al Censo, la población de Puerto Rico se ha reducido en un 2.2% entre los años 2000 y 2010. La Junta de Planificación proyecta que disminuya en un 6.6% para el año 2020. Como consecuencia de esta disminución, se ha observado una reducción de un 12% en el consumo facturado por la AAA durante los años 2006 al 2012 (AAA, 2014). De acuerdo a esta tendencia poblacional, la demanda de agua no incrementará, si no que disminuirá. En el Capítulo 4 del Plan, se discuten las proyecciones poblacionales así como las tendencias económicas proyectadas para el país. A partir de éstas se establecen los estimados de demanda de agua para cada uno de los sectores socioeconómicos y usuarios del recurso agua así como los requerimientos de producción para satisfacer la demanda de agua potable que sirve la AAA.

El único renglón en el que se proyecta un incremento en demanda de agua es en el sector agrícola debido a la política de seguridad alimentaria que impulsa el gobierno. De surgir cualquier otro aumento en demanda por parte de otros sectores, éste deberá ser satisfecho por la AAA, siempre y cuando ésta cuente con la capacidad para suplirla. En consecuencia, se establecen los siguientes objetivos.

PROYECTO 1 SECTOR AGRÍCOLA

OBJETIVO 1

En un periodo de un año, precisar la demanda de agua por cultivo y por región tomando en cuenta el Plan de Seguridad Alimentaria y el PUT. El estudio debe documentar la metodología utilizada.

AGENCIA RESPONSABLE

DA

INDICADOR

Publicar el estudio de demanda

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos DA

2. DEMANDA DEL RECURSO AGUA

OBJETIVO 2

En un periodo de un año, a partir de la publicación del estudio de demanda, realizar una evaluación de capacidad de los abastos actuales para satisfacer la demanda agrícola.

AGENCIAS RESPONSABLES

AEE, DA, AAA, DRNA

INDICADOR

Estudio completado

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos propios de cada agencia

PROYECTO 2

SECTOR INDUSTRIAL, COMERCIAL Y TURÍSTICO

OBJETIVO 1

Actualizar anualmente la demanda potencial de los proyectos puntuales de desarrollo económico.

AGENCIAS RESPONSABLES

CFI, DDEC, AAA, DRNA, Municipios, JP

INDICADOR

Informe anual

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

DDEC

AGENCIAS RESPONSABLES

CT, AAA, DRNA

INDICADORES

Estudio completado

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

CT

OBJETIVO 2

En un periodo de dos años, analizar el potencial de ahorro de agua potable en el sector turístico de Puerto Rico.

2. DEMANDA DEL RECURSO AGUA

PROYECTO 3

OPTIMIZAR LA GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA PARA NO AFECTAR EL APROVECHAMIENTO DE LOS USUARIOS AGRÍCOLAS Y DOMÉSTICOS

OBJETIVO 1

En un periodo de 18 meses, desarrollar e implantar un modelo para operar los sistemas de generación de energía hidroeléctrica para optimizar los usos del recurso agua por todos los usuarios en la cuenca. Se le debe dar prioridad a los sistemas de riego de Carite, Patillas, Valle de Lajas, Caonillas y Dos Bocas.

AGENCIAS RESPONSABLES

AEE, AAA, DRNA, DA

INDICADORES

Estudios completados

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

AEE, AAA, DA

OBJETIVO 2

En un periodo de 3 meses, crear un equipo de trabajo interagencial (AEE, DRNA y AAA) para atender la operación adecuada de los sistemas hidroeléctricos del País, según las recomendaciones de los estudios realizados.

AGENCIAS RESPONSABLES

AEE, AAA, DRNA

INDICADOR

Equipo de trabajo completado

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

AEE, AAA

2. DEMANDA DEL RECURSO AGUA

PROYECTO 4 COSECHA DE AGUAS DE LLUVIA

OBJETIVO 1

En un periodo de 18 meses, realizar un análisis comparativo de las reducciones en la demanda doméstica, si se utiliza la cosecha de aguas de lluvia para el mantenimiento de los hogares.

AGENCIAS RESPONSABLES
AAA, DRNA

INDICADORES
Estudio completado

FUENTE DE FINANCIAMIENTO
AAA, DRNA

OBJETIVO 2

En un periodo de 6 meses, establecer un programa que incentive la instalación de enseres que utilicen menos agua que los convencionales.

AGENCIAS RESPONSABLES
AAA, DRNA

INDICADOR
Programa Desarrollado

FUENTE DE FINANCIAMIENTO
DRNA, AAA

OBJETIVO 3

En un periodo de 12-18 meses, identificar mecanismos para cosechar agua y establecer oasis en la Reserva Natural de Isla de Mona e identificar fuente de fondos para ello.

AGENCIA RESPONSABLE
DRNA

INDICADOR
Informe sobre mecanismos

FUENTE DE FINANCIAMIENTO
DRNA

3. CONSERVACIÓN Y USO EFICIENTE DEL RECURSO AGUA

Política Pública

Promover la conservación y el buen uso del recurso fomentando prácticas que eviten su degradación y pérdida.

Los temas de conservación¹, desarrollo y uso eficiente de los recursos de agua son abarcadores y contienen varios proyectos y sub-proyectos. En esta sección se establecen objetivos dirigidos a atender estos asuntos tomando como base los hallazgos presentados en el diagnóstico y las propuestas discutidas en el Capítulo 5 del Plan. A continuación se describen de manera general cada uno de los proyectos y sus objetivos.

PROYECTO 1

MANEJO DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS

El Plan de Uso de Terrenos (PUT), aprobado en el 2015, establece las clasificaciones en las cuencas hidrográficas de los embalses y cuerpos de agua que sirven de fuentes de abasto de agua potable. Además, el PUT provee una serie de herramientas adicionales para minimizar la contaminación de los cuerpos de agua y fomentar la reforestación. Tomando estas herramientas como referencia, junto a las del DRNA, se presentan los siguientes sub proyectos y objetivos.

SUB-PROYECTO 1

Formalizar acuerdo de asesoramiento institucional entre DRNA y JP

OBJETIVO

En un periodo de seis meses, formalizar un acuerdo de entendimiento para articular la relación de asesoramiento del DRNA a la JP para el manejo de las áreas de valor hídrico.

AGENCIAS RESPONSABLES

DRNA, JP

INDICADOR

Acuerdo formalizado

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondo de Agua (DRNA)

¹Conservación – Es un mecanismo de protección definido como el uso racional y sustentable de los recursos naturales y culturales, sin menoscabo del ambiente, para el disfrute de las generaciones actuales y venideras.

3. CONSERVACIÓN Y USO EFICIENTE DEL RECURSO AGUA

SUB-PROYECTO 2

Fomentar las buenas prácticas de conservación de suelos para la protección del recurso agua en terrenos agrícolas.

OBJETIVO

En un período de dos años, adaptar, actualizar e implantar las guías sobre buenas prácticas de conservación de suelos que promuevan la protección de los recursos de agua.

AGENCIA RESPONSABLE

DA

INDICADOR

Informe anual con la lista de las fincas certificadas, entregado al DRNA

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos DA

SUB-PROYECTO 3

Fomentar las buenas prácticas de construcción que eviten la erosión y contaminación de los cuerpos de agua.

OBJETIVO

En un periodo de dos años revisar y actualizar las guías y reglamentos existentes sobre las prácticas de construcción que eviten la erosión y sedimentación en los cuerpos de agua y establecer nuevos mecanismos para mejorar la fiscalización.

AGENCIAS RESPONSABLES

JP, JCA

INDICADORES

Guías y reglamentos actualizados

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos propios de las agencias

3. CONSERVACIÓN Y USO EFICIENTE DEL RECURSO AGUA

SUB-PROYECTO 4 REFORESTACIÓN DE CUENCAS

OBJETIVO 1

En un período de dos años, actualizar las Guías de Reforestación para las Cuencas Hidrográficas de Puerto Rico, desde la perspectiva de la conservación de los cuerpos de agua.

AGENCIA RESPONSABLE

DRNA

INDICADOR

Guías actualizadas

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondo de Agua

OBJETIVO 2

En un periodo de un año, implantar el Plan de Reforestación vigente en las cuencas de los embalses de abasto principales.

AGENCIAS RESPONSABLES

DRNA, AAA

INDICADOR

Número de proyectos de reforestación por cuenca

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos propios de las agencias

3. CONSERVACIÓN Y USO EFICIENTE DEL RECURSO AGUA

SUB-PROYECTO 5
PLANES DE MANEJO DE CUENCAS

OBJETIVO 1

En un período de cinco años, preparar planes de manejo para dos de las cuencas de abasto prioritarias. Entiéndase cuenca Río Grande de Loíza y Río De La Plata

AGENCIA RESPONSABLE

DRNA, AAA, JP, AEE

INDICADOR

Planes de manejo desarrollados

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos propios de las agencias

3. CONSERVACIÓN Y USO EFICIENTE DEL RECURSO AGUA

PROYECTO 2 MANEJO DE SEDIMENTACIÓN DE EMBALSES

En el Capítulo 5, Sección 5.3, se discuten técnicas de manejo para los embalses que permiten atender el problema de la sedimentación y mantenerlos operacionales. Las técnicas de manejo recomendadas en este Plan están dirigidas a disminuir la posibilidad de periodos de racionamientos en los próximos eventos de sequía. También, redundaría en un mayor volumen de agua disponible en los embalses y se reduciría la tasa de sedimentación.

OBJETIVO

En un periodo de siete años, completar e implantar reglas operacionales que contengan medidas de manejo y control de sedimentación para cada uno de los embalses del País. Se le dará prioridad a: el embalse Loíza, los embalses en la cuenca del río Grande de Arecibo, el Sistema del Valle de Lajas y el embalse De La Plata.

AGENCIAS RESPONSABLES

AAA, AEE y DRNA

INDICADORES

Embalse Loíza: regla operacional para minimizar sedimentación implantada
Sistema río Grande de Arecibo, Sistema del Valle de Lajas y embalse De La Plata: técnicas seleccionadas e implantadas

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos propios de cada agencia dueña del embalse

3. CONSERVACIÓN Y USO EFICIENTE DEL RECURSO AGUA

PROYECTO 3

MANEJO EFICIENTE DE FUENTES DE ABASTO

Se desprende del análisis presentado en el Capítulo 4 del Plan, que debido a las tendencias poblacionales actuales, la demanda del recurso agua no aumentará, si no que se reducirá. Es por esto que se descarta la construcción de nuevos embalses y en cambio se recomiendan diferentes alternativas para maximizar el rendimiento y la vida útil de las fuentes existentes. Los objetivos esbozados en este proyecto están centrados en la optimización e integración de las fuentes superficiales y subterráneas, resultando en un manejo más eficiente y eficaz de las aguas. De esta manera, durante eventos de sequía, la AAA podrá mantener en operación sus sistemas de distribución de agua potable, evitando medidas extremas como es el racionamiento y los costos asociados a éste.

Se aspira a que las fuentes de agua se exploten de acuerdo a su capacidad y manteniendo siempre un caudal superior al flujo mínimo para mantener la integridad de las funciones de los ecosistemas asociados a los cuerpos de agua superficiales. Cumplir con esta regla, aporta al manejo eficiente de las aguas. No obstante, a causa de los nuevos flujos mínimos históricos establecidos en la sequía reciente, es necesario revisar el rendimiento seguro de las fuentes de agua superficial.

Puerto Rico experimenta períodos cíclicos de precipitación baja y alta. Durante los períodos de abundancia los embalses están en su nivel óptimo y los acuíferos se recargan naturalmente. En los periodos de escasez de lluvia, los embalses pierden volumen rápidamente por la sobreexplotación, que sumado a una mayor tasa de evapotranspiración, reducen el volumen de agua en éstos. Si los sistemas de distribución de agua potable integran ambas fuentes de agua, se optimizará el uso de las mismas ya que en tiempos de abundancia de lluvia, los acuíferos se dejarían en reposo y entrarían en funciones de apoyo a las fuentes superficiales cuando la lluvia escasea.

SUB-PROYECTO 1

OPTIMIZACIÓN OPERACIONAL

OBJETIVO 1

En un periodo de un año, actualizar los rendimientos seguros de los embalses y tomas, para incorporar los flujos mínimos históricos establecidos durante la sequía prevaleciente (2013-2016).

AGENCIA RESPONSABLE

DRNA

INDICADOR

Nuevos datos para rendimiento
seguro

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondo de Agua

3. CONSERVACIÓN Y USO EFICIENTE DEL RECURSO AGUA

OBJETIVO 2

En un periodo de dos años, desarrollar y poner en operación el Programa de Uso Combinado de Agua Superficial y Agua Subterránea (según explicado en el Capítulo 5, Sección 5.2.5).

AGENCIAS RESPONSABLES

AAA

INDICADOR

Programa implantado

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos AAA

OBJETIVO 3

En un periodo de dos años, hacer un estudio para optimizar las reglas operacionales de la AAA para maximizar el rendimiento de los abastos. Para esto, se debe partir del análisis regional del Capítulo 4 de este plan.

AGENCIAS RESPONSABLES

AAA

INDICADOR

Reglas operacionales modificadas

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos AAA

OBJETIVO 4

En un periodo de 6 meses, establecer un programa de rehabilitación de los pozos de la AAA.

AGENCIAS RESPONSABLES

AAA

INDICADOR

Número de pozos rehabilitados

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos AAA

3. CONSERVACIÓN Y USO EFICIENTE DEL RECURSO AGUA

SUB-PROYECTO 2 MANEJO DE SEQUÍA

OBJETIVO 1

En un periodo de 2 años, desarrollar y adoptar un Plan Nacional de Respuesta Ante Eventos de Sequía, que incluya: vigilancia, pronóstico, evaluación de riesgos, repercusiones, mitigación, educación y respuesta.

AGENCIAS RESPONSABLES

AEMEAD, AAA, AEE, DRNA, DA, JP

INDICADOR

Plan adoptado

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos propios de las agencias

OBJETIVO 2

Como parte del Plan Nacional de Respuesta Ante Eventos de Sequía desarrollar un sistema de vigilancia y alerta temprana de sequía en un periodo de 1 año que permita pronosticar cuándo comienza un periodo de sequía.

AGENCIAS RESPONSABLES

AEMEAD, AAA, AEE, DRNA, DA, JP

INDICADOR

Sistema de alerta y vigilancia temprana en operación

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos propios de las agencias

OBJETIVO 3

Aumentar la colaboración entre las entidades gubernamentales nacionales e internacionales para facilitar el intercambio de datos y estrategias que permitan un mejor manejo de los eventos de sequía.

AGENCIAS RESPONSABLES

AEMEAD, AAA, AEE, DRNA, DA, JP

INDICADOR

Acuerdo de entendimiento entre las entidades

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos propios de las agencias

3. CONSERVACIÓN Y USO EFICIENTE DEL RECURSO AGUA

PROYECTO 4 AGUAS RESIDUALES

En el Capítulo 5 de este Plan se discuten algunas estrategias y proyectos respecto a la reutilización de las aguas residuales en Puerto Rico. El uso de aguas residuales consiste en utilizar el agua tratada para distintos usos con lo cual se obtienen beneficios económicos o sociales para los diferentes sectores, además de beneficios ambientales. Un ejemplo de la reutilización indirecta de las aguas residuales en Puerto Rico son las descargas de éstas, aguas arriba de los embalses. El DRNA promueve la mejor reutilización de estas aguas, siempre y cuando se consideren las condiciones ambientales y de salud pública. Esto permite minimizar las extracciones de agua y proveer un mejor uso.

SUB-PROYECTO 1 Plan de uso de aguas residuales

OBJETIVO 1

En un periodo de 18 meses, actualizar y adoptar el Plan de Reuso de Aguas Usadas de Puerto Rico.

AGENCIAS RESPONSABLES

DRNA, JCA, AAA, JP

INDICADOR

Adopción del Plan de Reuso de Aguas Usadas de Puerto Rico

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos propios de las agencias

OBJETIVO 2

En un periodo de un año, como parte del Programa de Educación Ambiental y Participación Pública, establecer un módulo cuyo propósito sea exponer los beneficios del uso de aguas residuales, los estándares de calidad, normas a cumplir con JCA y la EPA, e incentivos disponibles.

AGENCIAS RESPONSABLES

DS, DRNA, AAA, JCA

INDICADOR

Creación del Programa de Información Pública

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos propios de las agencias

3. CONSERVACIÓN Y USO EFICIENTE DEL RECURSO AGUA

PROYECTO 5 INVENTARIO DE MANANTIALES

Los manantiales de agua dulce son fuente de abasto de agua para las comunidades en momentos de emergencia y en ocasiones, fuente de abasto permanente para las comunidades que son autoabastecidas. Atendiendo las metas establecidas en el Capítulo 1 de este Plan, se recomienda actualizar el Inventario de los Manantiales de Agua Dulce preparado por el USGS. Este inventario debe incluir, además de las coordenadas de la ubicación, el flujo promedio que emana del manantial, usos que se hace de las aguas, identificar los usuarios del caudal del manantial y un análisis de la calidad del agua.

OBJETIVO 1

En un periodo de tres años, actualizar el Inventario de Manantiales del País.

AGENCIAS RESPONSABLES

DRNA, JCA, DS

INDICADOR

Acuerdo con el USGS para hacer la actualización.
Publicación virtual del inventario

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos propios de las agencias

OBJETIVO 2

Una vez se complete el Inventario de Manantiales, en un periodo de 3 meses, se recomendará a la JP que los municipios protejan los terrenos circundantes a éstos con las calificaciones correspondientes en los Planes de Ordenación Territorial (POT's).

AGENCIAS RESPONSABLES

JP, Municipios

INDICADOR

Adopción de áreas protegidas en los POT's

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos propios de los municipios

4. MANEJO DE LOS ACUÍFEROS

Política Pública

Manejar de forma sustentable los acuíferos para alcanzar el equilibrio entre la extracción y la recarga hasta lograr el balance de éstos.

Los acuíferos representan una fuente importante de agua potable, proveyendo un 16.3% del agua usada a nivel nacional y hasta un 100% en algunas zonas del sur (Molina, 2010). Estos cuerpos de agua también son componentes esenciales en los Programas de Uso Combinado y otras estrategias propuestas en el Capítulo 5 del Plan, lo que hace más importante su conservación. En este capítulo además se presentan los problemas que afectan a los cuerpos de agua, siendo los principales la sobreexplotación, la contaminación con químicos, la intrusión salina y un manejo desarticulado entre las agencias. Los objetivos propuestos en esta sección se enfocan en proteger, mejorar y restaurar las aguas subterráneas con el propósito de dejar una fuente de agua dulce segura para las generaciones futuras.

PROYECTO 1

RECOPIACIÓN DE DATOS DE LOS ACUÍFEROS

OBJETIVO

En un periodo de tres años, estandarizar la metodología y frecuencia de recolección de datos de niveles de todos los acuíferos del País.

AGENCIA RESPONSABLE

DRNA

INDICADOR

Metodología estandarizada

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos DRNA

4. MANEJO DE LOS ACUÍFEROS

PROYECTO 2

PERMEABILIZACIÓN DE ÁREAS DE RECARGA DE ACUÍFEROS

OBJETIVO 1

En un periodo de dos años, desarrollar un estudio para recuperar la condición de permeabilidad de las zonas urbanas en las áreas de recarga.

AGENCIAS RESPONSABLES

JP y DRNA

INDICADOR

Estudio completado

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos propios de las agencias

OBJETIVO 2

Luego de completado el estudio del Objetivo 1, en un periodo de dos años, atemperar el Reglamento Conjunto y los códigos de construcción según las recomendaciones y propuestas del estudio.

AGENCIA RESPONSABLE

JP

INDICADOR

Reglamento enmendado

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos JP

PROYECTO 3

MANEJO DE LOS ACUÍFEROS DEL NORTE

OBJETIVO

A partir del 2016, no se otorgarán permisos nuevos, ni aumento, en las extracciones del acuífero inferior (artesiano).

AGENCIA RESPONSABLE

DRNA

INDICADOR

Volumen de agua autorizado a extraer del acuífero inferior al 2016 deben permanecer igual o reducir

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos DRNA

4. MANEJO DE LOS ACUÍFEROS

PROYECTO 4

MANEJO DE LOS ACUÍFEROS DEL SUR

OBJETIVO 1

En un periodo de 2.5 años, comenzar la recarga artificial de los acuíferos de Santa Isabel y Salinas, según descrito en el Capítulo 5.

AGENCIAS RESPONSABLES

AAA, AEE, JCA, DRNA

INDICADORES

Establecimiento y operación de los sistemas de recarga. Volumen de agua infiltrada.

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

A ser identificados

OBJETIVO 2

La JP debe implantar la Zona de Evaluación Especial.

AGENCIAS RESPONSABLES

JP, OGPe

INDICADOR

Informe de la JP/OGPe sobre el proceso de determinación de los permisos sometidos (aprobados, denegados o condicionados) en no más de 15 días de tomada la decisión.

FUENTE DE FINANCIAMIENTO:

Fondos propios de la agencias

OBJETIVO 3

En un periodo de un año, reducir el volumen de las extracciones de los acuíferos del sur mediante la optimización de los sistemas de extracción y distribución de agua.

AGENCIA RESPONSABLE

DRNA, DA, AAA

INDICADOR

Cuantificación de la extracción

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondo de Agua

4. MANEJO DE LOS ACUÍFEROS

OBJETIVO 4

En un periodo de un año, preparar un informe sobre la situación de los pozos ilegales en operación y sobre las medidas administrativas y legales tomadas para su solución permanente.

AGENCIA RESPONSABLE

DRNA

INDICADOR

Informe completado

FUENTE DE FINANCIAMIENTO:

Fondo de Agua

OBJETIVO 5

En un periodo de seis meses, calibrar con datos nuevos los modelos existentes para los acuíferos de Santa Isabel y Salinas.

AGENCIA RESPONSABLE

DRNA, AAA

INDICADOR

Modelo actualizado

FUENTE DE FINANCIAMIENTO:

Fondo de Agua

OBJETIVO 6

En un periodo de 15 meses, evaluar la red de monitoreo de los acuíferos del sur y hacer recomendaciones para su optimización.

AGENCIAS RESPONSABLES

DRNA y JCA

INDICADOR

Informe con hallazgos y recomendaciones completado

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondo de Agua

4. MANEJO DE LOS ACUÍFEROS

OBJETIVO 7

Ampliar la red de pozos que miden intrusión salina en los acuíferos del sur en un periodo de 5 años pozos para observar las variaciones en la localización del frente de agua salina dentro de los acuíferos.

AGENCIA RESPONSABLE

DRNA

INDICADOR

Aumento en el número de pozos que miden concentración de sales en los acuíferos del sur

FUENTE DE FINANCIAMIENTO:

Fondo de Agua y Externos

OBJETIVO 8

Establecer relación entre aumento en el nivel de mar y la penetración de la cuña de aguas salada una vez se logre el Objetivo 7.

AGENCIA RESPONSABLE

DRNA, AAA

INDICADOR

Investigación realizada

FUENTE DE FINANCIAMIENTO:

Fondos propios de las agencias

OBJETIVO 9

Establecer mecanismo para que la AAA informe al DRNA el volumen de agua subterránea que extrae diariamente de los pozos de los acuíferos del sur.

AGENCIA RESPONSABLE

DRNA, AAA

INDICADOR

Informes semanales de extracción diaria de los pozos de la AAA en los acuíferos del Sur.

FUENTE DE FINANCIAMIENTO:

Fondo propios de las agencias

5. MANEJO DE LAS AGUAS SUPERFICIALES

Política Pública

Velar por la protección y conservación, de forma integral y planificada, de las funciones naturales de los cauces, las riberas de los ríos y quebradas de forma que se viabilice su funcionalidad y biodiversidad.

PROYECTO 1

CONSERVACIÓN DE LOS CAUCES DE AGUA SUPERFICIAL Y FAUNA ACUÁTICA

Tal como fue establecido en los Capítulos 4 y 5 de este Plan, los diferentes sectores compiten por las aguas superficiales, limitando la cantidad disponible para mantener el funcionamiento y los servicios que proveen los ríos como ecosistemas. Por tal razón, es necesario incluir los componentes geomorfológicos, hidrológicos y biológicos presentes, tanto en la zona de la ribera como en los cauces de las aguas superficiales, en los procesos de manejo, conservación y protección. De esta forma, al rescatar el valor natural de sus aguas, se logra aumentar la valorización económica, recreativa y estética que éstos ofrecen.

SUB-PROYECTO 1

Caudal Ambiental

OBJETIVO 1

En un periodo de un año, estudiar la necesidad de modificar la red de aforo.

AGENCIA RESPONSABLE

DRNA

INDICADOR

Estudio completado

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos del DRNA y Externos

AGENCIA RESPONSABLE

DRNA

INDICADORES

Estudios completados

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos del DRNA y Externos

OBJETIVO 2

En un periodo de 4 años, realizar estudios de patrones migratorios, ciclos de vida y requisitos abióticos (sustratos, hábitat, etc.) para peces y decápodos nativos en los ríos Grande de Manatí e Inabón.

5. MANEJO DE LAS AGUAS SUPERFICIALES

OBJETIVO 3

En un periodo de 3 años, a base de la información obtenida del Objetivo 2 de este Sub-proyecto, desarrollar una metodología que establezca los requisitos de caudales ambientales que requieren las especies acuáticas nativas de Puerto Rico, en particular peces y decápodos.

AGENCIA RESPONSABLE

DRNA

INDICADORES

Estudios completados en río Grande de Manatí e Inabón

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondo de Agua y Externos

OBJETIVO 4

En un periodo de dos años, hacer estudios en los embalses que sean refugios de vida silvestre con el propósito de manejar la biota en periodos de sequía.

AGENCIA RESPONSABLE

DRNA

INDICADORES

Estudios completados

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondo de Agua y Externos

OBJETIVO 5

En un periodo de un año, bosquejar un estudio sobre el impacto de las descargas de fármacos sobre la calidad del agua y biota acuática, en el río Grande de Loíza en Caguas y en el río De La Plata en Cayey.

AGENCIAS RESPONSABLES

DRNA, JCA

INDICADOR

Bosquejo del estudio y aviso de solicitud de propuesta para hacer el estudio.

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos propios de las agencias

5. MANEJO DE LAS AGUAS SUPERFICIALES

SUB-PROYECTO 2

Programa de Ríos Patrimoniales

OBJETIVO 1

En un periodo de seis meses, formular los mecanismos y los tipos de designación que se harán en el Programa.

AGENCIA RESPONSABLE

DRNA

INDICADOR

Documento completado y adoptado

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondo de Agua

OBJETIVO 2

En un periodo de un año, desarrollar el documento de información científico-técnica (Suplemento Técnico), requerimientos de designación y guías para la elaboración de los planes de manejo de ríos o tramos de estos.

AGENCIA RESPONSABLE

DRNA

INDICADORES

Guías, requerimientos y Suplemento Técnico completados y adoptados

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondo de Agua

OBJETIVO 3

Una vez completados los Objetivos 1 y 2 de este Sub-proyecto, en un periodo de un año, designar como Ríos Patrimoniales los tramos de los ríos que discurren por las áreas protegidas por el DRNA y otras entidades.

AGENCIA RESPONSABLE

DRNA

INDICADOR

Tramos designados de los ríos que nacen en las áreas protegidas del DRNA y otras entidades

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondo de Agua y fuentes externas

5. MANEJO DE LAS AGUAS SUPERFICIALES

OBJETIVO 4

En un periodo de cuatro años, designar ríos o tramos de ríos en las cuencas prioritarias fuera de las áreas protegidas.

AGENCIA RESPONSABLE

DRNA

INDICADOR

Ríos o tramos de ríos designados en las cuencas prioritarias fuera de áreas protegidas

FUENTE DE FINANCIAMIENTO:

Fondo de Agua y fuentes externas

SUB-PROYECTO 3

Restauración de cauces urbanos

OBJETIVO 1

En un periodo de 1 año, realizar la planificación e identificación de los fondos necesarios para llevar a cabo un proyecto demostrativo sobre restauración de cauces urbanos en el río Humacao.

AGENCIAS RESPONSABLES

DRNA, Municipio de Humacao, JP

INDICADOR

Fondos adjudicados

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

A ser identificada

OBJETIVO 2

En un periodo de 1 año, realizar un inventario para identificar oportunidades de restauración en otros ríos urbanos.

AGENCIA RESPONSABLE

DRNA

INDICADOR

Inventario completado

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos DRNA

5. MANEJO DE LAS AGUAS SUPERFICIALES

PROYECTO 2 CONEXIÓN FLUVIAL

SUB-PROYECTO 1

Diseño y adopción de obras sustentables en los sistemas fluviales.

OBJETIVO 1

En un periodo de cinco años, desarrollar normas de diseño para las estructuras en los cauces (tomos, presas, represas, obras de canalización y estructuras de control de erosión fluvial) utilizadas en Puerto Rico, para, entre otros, permitir el paso de especies migratorias, tomando en cuenta los caudales ambientales.

AGENCIA RESPONSABLE

JP, AEE, AAA, DRNA

INDICADOR

Normas completadas

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos propios de las agencias

AGENCIAS RESPONSABLES

JP, DRNA AAA AEE

INDICADOR

Proyecto demostrativo completado

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

A ser identificada

OBJETIVO 2

En un periodo de dos años, realizar un proyecto demostrativo de modificación, reemplazo o remoción de barreras artificiales.

SUB-PROYECTO 2

Protección de especies nativas

OBJETIVO

En un periodo de cinco años, hacer un inventario de especies exóticas e invasivas, tanto de flora como de fauna, que incluya distribución geográfica y nivel de peligrosidad para las especies nativas y los ecosistemas de agua dulce de Puerto Rico.

AGENCIA RESPONSABLE

DRNA

INDICADOR

Inventario completado

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondo de Agua

5. MANEJO DE LAS AGUAS SUPERFICIALES

PROYECTO 3 VALLES INUNDABLES

OBJETIVO 1

En un periodo de un año, desarrollar en conjunto con la JP, una recomendación para administrar los valles inundables desde el aspecto de preservación ecológica y seguridad pública ante inundaciones.

AGENCIA RESPONSABLE

DRNA, JP

INDICADOR

Norma completada

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

JP, DRNA

6. CAMBIO CLIMÁTICO

Política Pública

Establecer medidas de adaptación que propicien el aprovechamiento sostenible del recurso y fortalezcan la resiliencia de la sociedad.

De acuerdo a la información presentada en el Capítulo 2, se desconocen los posibles efectos que tendrá el Cambio Climático en la biota acuática y en los sistemas de abasto de agua. Como existe mucha incertidumbre en el tema, se utilizan diversos escenarios para modelar sus posibles efectos. Para Puerto Rico, se recomiendan dos escenarios distintos. En el mejor escenario, conocido como RCP 4.5, se proyecta un aumento de 1.8°C en las temperaturas promedio del Planeta, mientras que en el peor escenario, el RCP 8.5, asume un aumento de 4°C. El análisis de estas proyecciones permitirá establecer medidas de adaptación que propicien el aprovechamiento sustentable del recurso y fortalezcan la resiliencia de la sociedad.

PROYECTO 1

MODELO DE ESCORRENTÍAS BASADO EN PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

OBJETIVO

Realizar estudios que analicen los efectos del cambio climático sobre la escorrentía media anual en las principales cuencas hidrográficas, bajo los escenarios 4.5 y 8.5, utilizando modelos regionales de clima sobre el territorio de Puerto Rico.

AGENCIA RESPONSABLE

DRNA, JP

INDICADOR

Estudio completado en dos años

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos Externos

PROYECTO 2

MODELAJE DE EVENTOS CLIMATOLÓGICOS EXTREMOS

OBJETIVO 1

En un periodo de dos años, realizar un estudio para identificar la recurrencia e intensidad de eventos climatológicos extremos para Puerto Rico.

AGENCIAS RESPONSABLES

DRNA y UPR

INDICADOR

Estudio completado

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos externos

6. CAMBIO CLIMÁTICO

PROYECTO 3

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GEOMORFOLOGÍA Y LA ECOLOGÍA DE LOS CUERPOS DE AGUA

OBJETIVO

En un periodo de 5 años, caracterizar los efectos de los eventos extremos en la geomorfología y biología (plantas e insectos) en un tramo de los ríos Inabón y Grande de Manatí.

AGENCIA RESPONSABLE

DRNA

INDICADOR

Estudio completado

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondo de Agua

PROYECTO 4

MODELOS DE INUNDACIONES

OBJETIVO

En un periodo de tres años, revisar los modelos de inundaciones utilizados actualmente, tomando en cuenta los posibles efectos del Cambio Climático.

AGENCIAS RESPONSABLES

JP, DRNA-PMZC-CCC

INDICADOR

Modelos revisados

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Cada agencia identificará los fondos disponibles

7. EDUCACIÓN

Política Pública

Promover y divulgar el conocimiento sobre el recurso agua, patrones de uso y su aprovechamiento sostenible.

La educación es un tema imprescindible para el uso adecuado del recurso agua. El conocimiento que tiene la ciudadanía sobre los recursos de agua y sus ecosistemas acuáticos, es limitado. No existen programas formales continuos de educación sobre los recursos de agua y los ecosistemas asociados, excepto cursos a nivel universitario en algunas instituciones. Un pueblo educado protege y utiliza sosteniblemente los recursos de su país. Por esto, esta sección se encamina a desarrollar y divulgar conocimiento sobre el tema del recurso agua.

OBJETIVO 1

Ampliar el conocimiento y mejorar la comprensión ciudadana sobre el recurso agua y sus manifestaciones, de forma continua, utilizando los sistemas de difusión de información pública.

AGENCIAS RESPONSABLES

AEMEAD, AAA, AEE, DRNA, DA, JP

INDICADOR

Publicidad educativa generada

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Cada agencia identificará la procedencia de los fondos disponibles

OBJETIVO 2

En un periodo de dos años, desarrollar una guía operacional para ser utilizada por el personal técnico en el campo, a la hora de intervenir con cuerpos de agua superficiales.

AGENCIA RESPONSABLE

DRNA

INDICADORES

Documento Técnico completado y cantidad de personas adiestradas con la guía

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondo de Agua

7. EDUCACIÓN

OBJETIVO 3

En un periodo de dos años, desarrollar una guía para maestros de los tres niveles (elemental, intermedia y superior) sobre el tema del agua, que sea impartida en los salones de clase.

AGENCIAS ENCARGADAS

DRNA, DE

INDICADORES

Guías completadas y cantidad de maestros de cada nivel adiestrados en el uso de la guía

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondo de Agua (DRNA)

OBJETIVO 43

En un periodo de tres años, la Universidad de Puerto Rico, desarrollará un proyecto educativo nacional que fomente la revalorización del agua en todas sus dimensiones.

AGENCIAS ENCARGADAS

DRNA, DE, UPR

INDICADORES

Cursos creados

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

UPR, DE

OBJETIVO 5

En un periodo de tres años, calcular la huella hídrica a nivel del País y comparar la misma con la capacidad de producción de nuestros cuerpos de agua.

AGENCIAS RESPONSABLES

UPR y entidades privadas

INDICADOR

Estudio Completado

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos propios de cada entidad.

8. INSTRUMENTOS DE APOYO

Política Pública

Fortalecer el proceso de recopilación sistemática y análisis de la información hidrológica y garantizar su disponibilidad y divulgación.

De acuerdo a lo establecido en los Capítulos 4 y 5, el análisis de los datos hidrológicos permite identificar patrones y tendencias en los procesos que ocurren en las aguas superficiales y subterráneas. La base de datos hídricos es un instrumento de apoyo fundamental para el proceso de planificación. Por lo tanto, es de suma importancia contar con información precisa, actualizada y organizada de una serie de parámetros hídricos, ambientales y socioeconómicos, para así realizar los estudios e investigaciones técnicas que propiciarán un manejo adecuado de los recursos de agua en Puerto Rico.

PROYECTO 1

BASE DE DATOS HIDROLÓGICOS

En este proyecto es imprescindible incorporar los adelantos en la tecnología de informática, particularmente los desarrollos ocurridos en los sistemas de información geográfica, estadística y modelaje hidrológico.

OBJETIVO 1

En un periodo de dos años, optimizar la red de datos hidrológicos.

AGENCIAS RESPONSABLES

DRNA, JCA, AEE, DA, JP

INDICADOR

Ampliación del porcentaje de cobertura

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondos propios de las agencias

OBJETIVO 2

En un periodo de dos años, desarrollar una herramienta para hacer estimados del uso del agua en Puerto Rico.

AGENCIA RESPONSABLE

DRNA, JP

INDICADOR

Herramienta desarrollada

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Fondo de Agua

9. ASIGNACIÓN DE FONDOS

Política Pública

El Fondo Especial de Agua se utilizará para la implantación del Plan Integral de Recursos de Agua.

La implantación del Plan requiere que el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales tenga disponible los fondos necesarios para cubrir los costos de las tareas propuestas. La Ley Núm. 136 de 1976, según enmendada por la Ley Núm. 408 del 2004, establece que los fondos recaudados por concepto del quinto de centavo por galón de agua subterránea extraído mediante franquicia, se emplee en la creación e implantación del Plan de Aguas. A continuación se desglosa cómo se debe distribuir el dinero recaudado por concepto del quinto de centavo.

El Fondo Especial de Agua se distribuirá de la siguiente manera:

Investigación	20%
Reforestación	5%
Capacitación del personal DMPA	5%
Administración DMPA	10%
Proyectos internos	50%
Educación Ciudadana	5%
Tecnología	5%

Referencias

AAA. (2015). Informe de Rendición de Cuentas Año Fiscal 2015. San Juan: Puerto Rico.

AAA. (2014). Plan Estratégico: Energía y Control de Pérdida de Agua. San Juan: Puerto Rico.

COE & GCPR. (1980). Puerto Rico Islandwide Water Supply Study. San Juan, Puerto Rico.

DRNA. (2008). Plan Integral de Recursos de Agua. San Juan: Puerto Rico.

JP. (2015). Plan de Uso de Terrenos de Puerto Rico. San Juan: Puerto Rico.

Molina, W. (2010). *Estimated Water Use in Puerto Rico, 2010*: U.S. Geological Survey Open – File Report. San Juan: Puerto Rico.

United States Census Bureau. (2010). Censo del 2010.

**Departamento de Recursos Naturales y Ambientales
Estado Libre Asociado de Puerto Rico
San Juan, Puerto Rico
2016**

