

**ESTADO LIBRE ASOCIADO DE PUERTO RICO
DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES
Y AMBIENTALES**

**Condición Hidrogeológica
de los Acuíferos de la Región Sur
de Puerto Rico
y
Estrategias para su Restauración**

**Preparado por
Oficina del Plan de Aguas,
Departamento de Recursos Naturales y Ambientales
Ferdinand Quiñones, PE
*Sigfredo Torres, Hidrólogo***

Octubre de 2003

RESUMEN EJECUTIVO

Este informe presenta una descripción de los acuíferos de la Región Sur de Puerto Rico y su condición actual relativa al uso y disponibilidad de agua subterránea. Los acuíferos de la Región Sur se extienden desde Patillas hasta el Valle de Lajas en una serie de “abanicos” individuales formados por depósitos de arena, piedra y grava transportados por los ríos (material denominado “aluvión”), así como rocas calizas y depósitos 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 y más productivos están en los valles aluviales de Patillas-Arroyo; Guayama y Salinas; Coamo; y Juana Díaz-Ponce. Aunque el sector de Patillas a Salinas incluye acuíferos independientes en los valles aluviales de Patillas, Arroyo, Guayama y Salinas, los datos existentes limitan su evaluación individual, y fueron agregados en una sola unidad. 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 producción, 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.

El rendimiento sustentable de cada acuífero es un valor dinámico que varía dependiendo de la recarga neta y estrategia de uso. No existe una “vida útil” para un acuífero, sino que el mismo es similar a un embalse, que puede rendir una cantidad de agua dependiendo de su capacidad de almacenaje, recarga y extracciones actuales. Esto varía de año a año con los períodos de sequía. Es posible “minar” un acuífero hasta extraer totalmente el agua almacenada en el mismo, y luego esperar a que se recargue nuevamente. Esto no es una práctica recomendable, particularmente en los valles costaneros, donde puede inducirse intrusión salina.

Los acuíferos de la Región Sur son una fuente importante de agua para consumo humano y actividades agrícolas, produciendo aproximadamente el 31 % 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.

El uso total de agua en el 2002 en la Región Sur fue de aproximadamente 161 millones de galones por día (mgd), provenientes de embalses, canales y pozos profundos. Este total incluyó 89 mgd para usos agrícolas, 70 mgd para producción de agua potable por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA), y dos (2) mgd para usos industriales.

Los acuíferos proveyeron 50 mgd, o el 31 % del total, de los cuales la AAA extrajo 25 mgd, las fincas agrícolas 23 mgd, y las industrias dos (2) mgd.

El balance de agua usada en la Región (111 mgd) provino de ríos, canales y embalses, principalmente de los sistemas de riego de la Autoridad de Energía Eléctrica. La agricultura utilizó 66 mgd de estas fuentes, mientras que la AAA utilizó 45 mgd.

En promedio, la extracción máxima de los acuíferos de la Región Sur no debe exceder aproximadamente 60 mgd. El balance anterior indica que se extraen al momento aproximadamente 50 mgd. Esto no implica que exista un residual de 10 mgd, ya que en varios lugares existen focos de contaminación que impiden extracciones adicionales. Además, al presente la Región Sur sufre una sequía extendida que ha mantenido los niveles freáticos bajo el promedio histórico, limitando el potencial de extracción. Es posible que en el futuro, al rehabilitarse los acuíferos contaminados y cesar la sequía, pudieran llevarse a cabo extracciones menores en los acuíferos aluviales de Guayama, Salinas, Juana Díaz, Ponce y Yauco. Existe el potencial inmediato de poder extraer cantidades de hasta dos (2) mgd en la zona de Ponce y un (1) mgd en la zona de Yauco.

El rendimiento de los acuíferos de la Región Sur podría aumentarse mediante recarga artificial proveniente de aguas de escorrentías de los ríos de la zona, así como de aguas usadas tratadas y esterilizadas. La AAA contempla llevar a cabo estudios pilotos de recarga artificial en las zonas de Santa Isabel y Ponce.

Paralelamente, es necesario implantar las siguientes medidas para optimizar el uso del agua y conservar los acuíferos de la Región Sur y de toda la Isla:

Reducir las pérdidas en los sistemas de distribución de la AAA a un máximo de 20-25 % de la producción. Esto permitiría reducir la operación de muchos de los pozos en la Región Sur, permitiendo a los acuíferos recuperar sus niveles freáticos. Optimizar los sistemas de riego agrícola, para minimizar las extracciones de los acuíferos, contribuyendo a que estos se recuperen. El uso de riego por inundación, o cultivos que requieren cantidades altas de agua, tales como el arroz, no son compatibles con la realidad de los abastos de agua de la Región Sur. Sin embargo, estos métodos de riego contribuyen a la recarga de los acuíferos, en comparación con el riego por goteo, que no contribuye significativamente a la recarga.

Optimizar las operaciones de los embalses de la AEE y revisar las prioridades de uso de los mismos, ya que en varias cuencas existen conflictos entre las demandas para agua potable, el uso agrícola y la generación hidroeléctrica.

Completar análisis más detallados de los acuíferos para optimizar su manejo, uso y conservación.

TABLA DE CONTENIDO

1.0	Trasfondo y Objetivos	1-1
1.1.	Trasfondo del Desarrollo de los Acuíferos Costaneros de la Región Sur	1-3
1.2.	Situación Actual de los Acuíferos Costaneros del Sur	1-4
2.0	Clima de la Región Sur	2-1
2.1.	Precipitación	2-1
2.2.	Evapotranspiración	2-2
2.3.	Geología	2-3
2.4.	Usos de Terrenos	2-5
2.5.	Distrito de Riego	2-6
2.6.	Hidrografía	2-9
3.0	Acuíferos de la Región Sur	3-1
3.1.	Balance de Agua en Cada Acuífero Aluvial de la Región Sur	3-7
3.2.	Acuífero aluvial de Patillas a Salinas	3-8
3.3.	Acuífero aluvial de Coamo (Río Descalabrado a Río Jueyes)	3-9
3.4.	Acuífero aluvial de Juana Díaz a Ponce	3-10
3.5.	Acuífero aluvial de Tallaboa	3-11
3.6.	Acuífero aluvial de Yauco	3-12
3.7.	Acuífero Aluvial de Guánica	3-13
4.0	Calidad de Agua	4-1
5.0	Uso de Agua	5-1
6.0	Plantas de Filtración de la AAA	6-1
7.0	Plantas de Tratamiento de Aguas Usadas de la AAA	7-1
8.0	Sinopsis de la Situación de los Acuíferos en la Región Sur y Medidas Potenciales para la Conservación de las Aguas Subterráneas	8-1
9.0	Referencias	9-1

Lista de Figuras

Figura 1	Acuíferos de la Región Sur de Puerto Rico	1-2
Figura 2.	Producción de azúcar refinada en Puerto Rico	1-3
Figura 3.	Precipitación pluvial promedio en Puerto Rico	2-1
Figura 4.	Evapotranspiración promedio actual en Puerto Rico	2-2
Figura 5.	Geología generalizada de Puerto Rico)	2-3
Figura 5a.	Acuíferos de la costa sur de Puerto Rico	2-4

Figura 5b. Sección transversal generalizada del acuífero aluvial de la costa sur.....	2-5
Figura 6. Mapas generalizados de uso de terrenos en la Región Sur.....	2-6
Figura 7. Embalses principales de la Región Sur de Puerto Rico	2-7
Figura 8. Acuíferos aluviales de la Región Sur de Puerto Rico.....	3-2
Figura 9a. Mapa potenciométrico de condiciones hidrológicas existentes durante la sequía de 1968.....	3-4
Figura 9b. Mapa potenciométrico de condiciones hidrológicas existentes durante 1986.....	3-5
Figura 9c. Mapa potenciométrico de condiciones hidrológicas existentes durante 1997.....	3-6
Figura 10. Niveles freáticos en pozos de observación en la Región Sur.....	3-15
Figura 11. Extensión de interfase de agua salada en acuíferos, incluyendo áreas.....	4-2
Figura 12. Áreas con problemas de contaminación en acuíferos de la Región Sur	4-3
Figura 13. Producción de agua para abasto público en la Región Sur	5-1
Figura 14. Ubicación de plantas de filtración en la Región Sur de Puerto Rico.	6-1
Figura 15. Ubicación de plantas de tratamiento de aguas usadas en la Región Sur ..	7-1

Lista de Tablas

Tabla 1. Crecimiento de la población en los municipios de la Región Sur desde 1960 al 2000, y proyecciones de crecimiento hasta el 2030	1-6
Tabla 2. Características principales de los embalses en el sur de Puerto Rico	2-8
Tabla 3. Datos hidráulicos (descarga mínima y máxima, descarga promedio) en los ríos principales de la Región Sur de Puerto Rico	2-10

1.0 Trasfondo y Objetivos

El Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA) actualiza al presente el “Plan Integral de Conservación, Desarrollo y Uso de los Recursos de Agua de Puerto Rico (Plan de Aguas). La Ley de Aguas de Puerto Rico (Ley 136 del 3 de junio de 1976, o Ley de Aguas) delega al DRNA la preparación y actualización de dicho Plan de Aguas, adoptado en 1996. El DRNA, con la asistencia de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA) y la Autoridad de Energía Eléctrica (AEE), ha organizado la Oficina del Plan de Aguas, la cual actualiza el plan reflejando las condiciones presentes de los recursos de agua de la Isla y aplicando tecnologías modernas. Al completarse en el 2004, el Plan de Aguas incluirá una base de datos amplia y actualizada sobre los recursos de agua de la Isla, la cual utilizará sistemas computarizados de información geográfica (GIS, por sus siglas en inglés).

Paralelamente con la actualización del Plan de Aguas, la Honorable Legislatura de Puerto Rico solicitó al DRNA información reciente sobre los acuíferos de la Región Sur de la Isla. Esta solicitud surge de información parcial publicada en los medios noticiosos y de otras fuentes que refleja preocupaciones sobre el uso de los acuíferos, su condición y sustentabilidad a largo plazo para suplir las demandas de agua de la región.

Los acuíferos costaneros de la Región Sur de Puerto Rico son de suma importancia como fuente de agua potable a los municipios de la zona, así como para actividades agrícolas que datan desde el siglo 19 (Figura 1). Aproximadamente una tercera parte del agua potable que se consume en la Región Sur proviene de los acuíferos de la zona, incluyendo los municipios de Patillas, Arroyo, Guayama, Salinas, Santa Isabel, Coamo, Juana Díaz, Ponce, Peñuelas, Guayanilla, Yauco, Guánica, y Lajas. Desde el comienzo del siglo pasado, en la Región Sur de Puerto Rico se han desarrollado sistemas de riego diseñados para promover la agricultura en los valles aluviales de la región

Uno de los elementos del Plan de Aguas constituye el “Inventario de los Recursos de Agua de Puerto Rico”. El inventario incluirá un diagnóstico de cantidad y calidad de los recursos de agua superficiales y subterráneos en la Isla. Este análisis proveerá un marco de referencia actual de la condición de los acuíferos, ríos y embalses en todo Puerto Rico. El inventario incluirá información detallada sobre los acuíferos de la Región Sur, que representan uno de los recursos hidrológicos más importantes en la Isla.

Ante la solicitud de la Legislatura, la Oficina del Plan de Agua preparó este informe resumiendo las características de los acuíferos de la Región Sur. El resumen incluye el uso actual de agua, la condición de los acuíferos relativa a su rendimiento sustentable o seguro en cada zona de los acuíferos desde Patillas hasta Guánica, y su capacidad residual para extracciones futuras de agua. El informe también identifica estrategias para la conservación de los acuíferos y proyectos potenciales para la restauración de sectores de los mismos.

El objetivo de este documento es establecer las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas existentes y la viabilidad en la implementación de varias medidas de restauración de los acuíferos del sur de Puerto Rico.

- Establecer las razones que han acelerado el deterioro de los acuíferos en la costa sur de Puerto Rico y las consecuencias en la planificación de desarrollo, conservación y uso de los mismos,
- Documentar las condiciones hidrogeológicas de los acuíferos aluviales del Sur de Puerto Rico incluyendo la Provincia de la Costa Sur y los acuíferos aluviales costeros de Tallaboa, Yauco (excluye área de Guayanilla) y Guánica.
- Indicar posibles alternativas o estrategias para la restauración y operación sustentable de extracción de agua subterránea en los acuíferos aluviales del Sur de Puerto Rico.

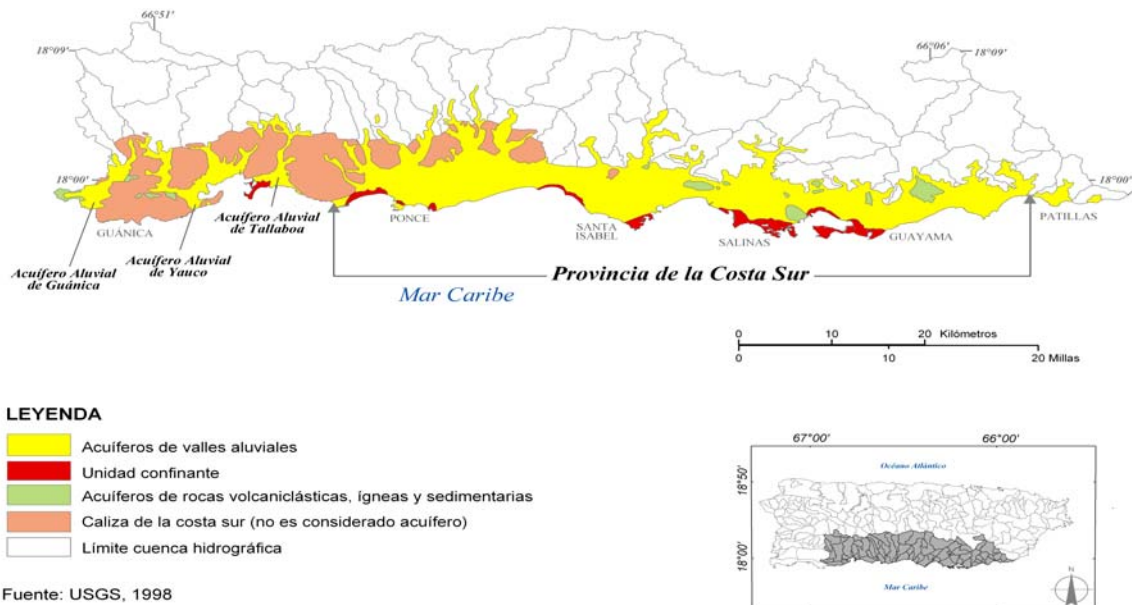


Figura 1 Acuíferos de la Región Sur de Puerto Rico, ilustrando la Provincia de la Costa Sur (acuífero aluvial principal comprendido entre los municipios de Ponce a Patillas y los acuíferos aluviales costeros de Tallaboa (Peñuelas), Yauco (excluye área de Guayanilla) y Guánica.

1.1. *Trasfondo del Desarrollo de los Acuíferos Costaneros de la Región Sur de Puerto Rico*

Durante el período de 1910 a 1914 comenzó la operación del Distrito de Riego de la Costa Sur por parte de la antigua Autoridad de las Fuentes Fluviales de Puerto Rico, hoy en día parte de la AEE. Este distrito de riego incluye los canales de Juana Díaz, Patillas, Guamaní Este, Guamaní oeste, y el Canal de Lajas. El sistema de canales incluye una red de aproximadamente 90 millas con cerca de 1,000 tomas reguladas por la AEE. Estos canales se nutren de los embalses de Patillas, Carite, Coamo, Toa Vaca, Guayabal, Cerrillos, Garzas, Yahuecas, Guayo, Luchetti y Loco. Los embalses de Yahuecas, Guayo, Luchetti y Loco son parte del Distrito de Riego del Valle de Lajas, que inició operaciones en 1955. La mayor parte de estos embalses ubican en las laderas sur de la Cordillera Central, excepto los embalses de Carite, Garzas, Yahuecas y Guayo, que ubican en las laderas norte. Un sistema de túneles desde las laderas norte y canales desde las laderas sur permite el flujo de agua por gravedad a la mayor parte de los valles costaneros de la región.

El sistema de embalses y canales se diseñó y construyó inicialmente para proveer abastos de agua para la agricultura y la generación de energía hidroeléctrica. El sistema provee un promedio anual de 65,000 acres-pies (equivalente a 58 millones de galones por día (mgd), o aproximadamente 24 pulgadas de lluvia anuales adicionales) a los valles costaneros de la Región Sur. Inicialmente el riego agrícola se concentró en la industria de la caña de azúcar (figura 2), pero al presente existe una variedad de actividades agrícolas incluyendo frutas, vegetales, pastos, e industrias avícolas, ganaderas, porcinas y potrereros.

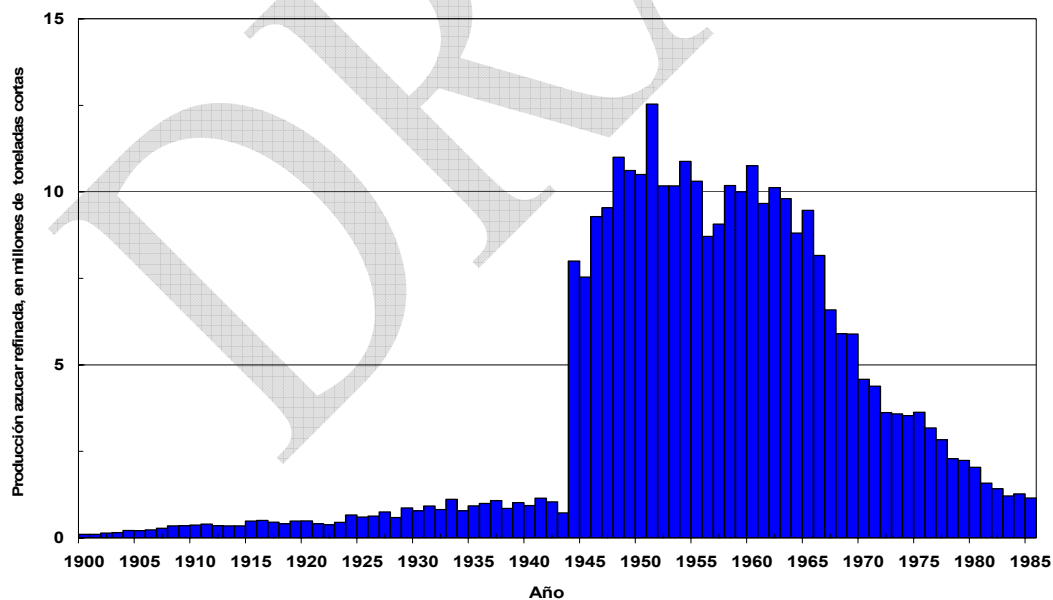


Figura 2. Producción de azúcar refinada en Puerto Rico, 1925 a 1985
(Fuente: Departamento de Agricultura, 1990).

Durante el desarrollo de la industria azucarera y la electrificación de la isla comenzando en 1930, se construyó una red de pozos profundos para extraer agua subterránea en

los valles costaneros del sur y otras regiones de la Isla. Estos pozos se utilizaron para suplir agua principalmente para riego a aquellos sectores que no recibían agua superficial del sistema de canales. Se hincaron cientos de pozos principalmente en los acuíferos aluviales costaneros para actividades agrícolas y uso doméstico. El desarrollo industrial comenzando en la década de 1950 promovió el hincado de pozos para los complejos petroquímicos en las zonas de Guayama y Guayanilla, así como otras industrias de manufactura y construcción en toda la región. El desarrollo socioeconómico de la región en los últimos 25 años promovió el crecimiento poblacional, resultando en la necesidad de extraer agua subterránea en cantidades cada vez mayores para uso doméstico. Estas actividades diversas en la región compiten por el uso de los recursos de agua disponibles.

1.2. Situación Actual de los Acuíferos Costaneros del Sur

Los acuíferos aluviales de la costa sur son comúnmente referidos como el “Gran Acuífero del Sur”. No existe un acuífero continuo en la costa sur, sino una serie de valles aluviales separados por ríos en dos segmentos principales independientes hidráulicamente. Esto quiere decir que cada valle aluvial se comporta independiente del otro, y las actividades de extracción de agua o recarga en un valle no afectan el otro directamente. Desafortunadamente, se ha creado la impresión errónea de que todos los acuíferos del sur están interconectados, y que la extracción de agua en un sector, o la contaminación o intrusión salina, puede afectar directamente otro sector.

El USGS define la Provincia de la Costa Sur como la región hidrológica desde Patillas hasta Ponce. El sector desde Peñuelas hasta Guánica no es parte de esta provincia, sino una serie de acuíferos aluviales independientes. Para efectos de este informe y análisis, la región se divide en “acuíferos aluviales” de los sectores individuales, incluyendo:

- 1.0** Patillas a Salinas;
- 2.0** Coamo (Santa Isabel y Coamo);
- 3.0** Juana Díaz a Ponce;
- 4.0** Tallaboa (Peñuelas);
- 5.0** Yauco a Guayanilla; y
- 6.0** Guánica

La zona desde Ensenada hasta el Valle de Lajas no es parte de la Provincia de la Costa Sur, ni de los acuíferos aluviales de la región. En esta zona ocurren depósitos calizos, marinos y volcánicos de baja permeabilidad que no forman acuíferos productivos. Los recursos de agua subterráneos en esta zona del Valle de Lajas son limitados, lo que requiere importar agua para los desarrollos agrícolas y el uso doméstico de la zona.

Los acuíferos aluviales del sur constituyen una fuente importante de agua para uso doméstico, agrícola e industrial en la Región Sur.

Datos del USGS y la AAA establecen que en la Región Sur se utilizaron aproximadamente 160 millones de galones de agua por día (mgd) en el 2000 de todas las fuentes superficiales y subterráneas, incluyendo embalses, canales de riego alimentados de los embalses, y pozos domésticos y agrícolas.

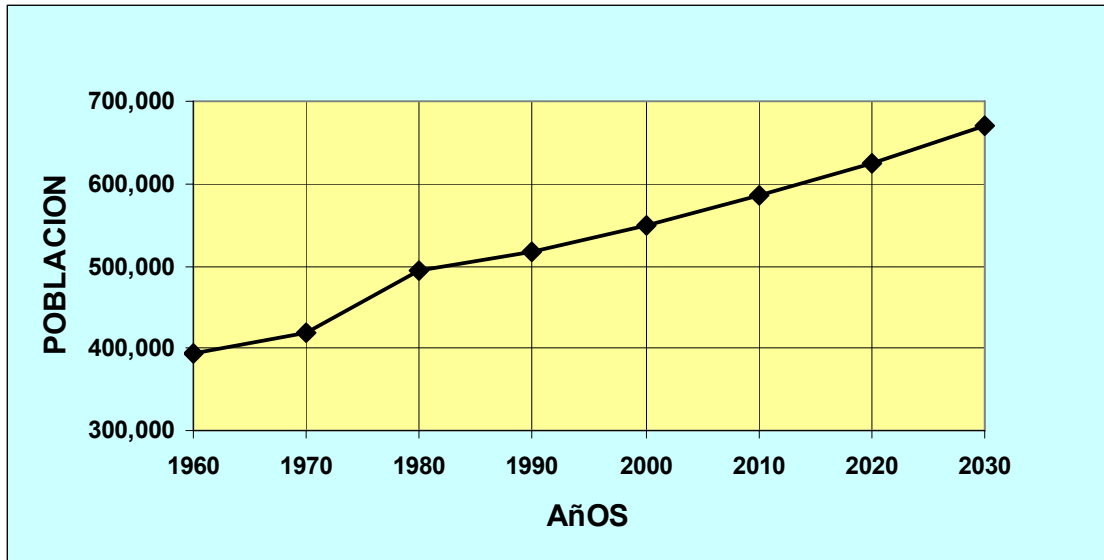
Las fuentes superficiales, incluyendo los embalses y canales de riego, proveen aproximadamente el 69 % del uso total de agua en la Región Sur, aproximadamente 110 mgd. Esto incluye 65 mgd para riego agrícola y 45 mgd son para usos domésticos. El desarrollo del Distrito de Riego del Sur desde 1914, incluyendo el sistema de canales de riego y pozos profundos, ha permitido proveer agua en cantidades adecuadas para sustentar empresas agrícolas y suplir la demanda de agua potable.

Las aguas subterráneas suplen aproximadamente el 31 % del uso total de agua en la Región Sur, aproximadamente 50 mgd. Este total incluye aproximadamente 25 mgd para agua potable, 23 mgd para riego agrícola y dos (2) para usos industriales.

El uso de agua para riego agrícola en la Región Sur, incluyendo agua de pozos y de los canales de riego, ha disminuido sustancialmente en las últimas décadas. El colapso de la industria azucarera redujo sustancialmente la demanda de agua para riego (Figura 2). El desarrollo de otros cultivos incluyendo frutas y vegetales, utiliza principalmente riego por goteo, técnica que requiere una fracción del agua que utilizaban los cultivos de caña de azúcar.

En 1960 el uso de agua para agricultura en la Región Sur era de aproximadamente 120 mgd, en comparación con un estimado de 89 mgd en el 2000. En comparación, el uso doméstico (agua potable) ha aumentado sustancialmente. En 1960, la AAA producía aproximadamente 43 mgd de agua potable de pozos y acueductos alimentados de canales y embalses, mientras que en el 2002, la producción total era de aproximadamente 70 mgd. La AAA estima que en el 2002 esta producción era de aproximadamente 76 mgd (para los municipios en los valles costaneros, sin incluir a Lajas, Sabana Grande y San Germán). Incluyendo estos municipios, la AAA produjo aproximadamente 86 mgd en el 2002. Este incremento en la producción de agua potable por la AAA se debe al aumento sustancial que la población de la Región Sur ha experimentado, aumentado de aproximadamente de 393,000 habitantes en 1960 a un total de 548,000 en el 2002 (Tabla 1).

Tabla 1. Crecimiento de la población en los municipios de la Región Sur desde 1960 al 2000, y proyecciones de crecimiento hasta el 2030.



Nota: Incluye municipios de Arroyo, Coamo, Guánica, Guayanilla, Juana Díaz, Lajas, Patillas, Peñuelas, Ponce, Salinas, San Germán, Santa Isabel y Yauco (Fuente Censo Federal 2000 y Junta de Planificación).

Estos cambios en el uso de agua han resultado en deterioro de la calidad del agua, mermas en la producción y el cierre de pozos.

Las concentraciones de sales en pozos en Salinas, Santa Isabel, Coamo, Juana Díaz y Ponce, han aumentado a niveles que en algunos casos exceden el estándar del Departamento de Salud para agua potable, forzando a la AAA al cierre de decenas de pozos. Esto ha forzado a sustituir esta fuente de agua de pozos con acueductos alimentados del sistema de riego.

En zonas de Salinas, Santa Isabel, Juana Díaz y Ponce, los niveles freáticos en sectores de los acuíferos aluviales han disminuido hasta 40 pies, induciendo intrusión salina y flujo de aguas de mayor profundidad cuya calidad es menor.

En sectores de Santa Isabel y Coamo, el DRNA ha suspendido la adjudicación de nuevas permisos para hincado de pozos.

La reducción en riego agrícola con la desaparición de la caña de azúcar e implantación de riego por goteo han contribuido a alterar el balance hidrológico en los acuíferos costeros. Al reducirse el riego disminuyó la infiltración de agua a los acuíferos. A la misma vez, las extracciones de agua subterránea para uso doméstico provocaron descensos en los niveles freáticos de hasta 40 pies. Durante el período de 1964-68, una sequía severa contribuyó a limitar más aún la cantidad de agua disponible para infiltrarse a los acuíferos (Gómez-Gómez, 1980). Estos dos eventos, combinados con la extracción de agua para consumo humano, son las causas principales del deterioro de los acuíferos de la región.

2.0 Clima de la Región Sur

El clima en la Región Sur, incluyendo la lluvia y temperatura, es uno de los factores principales que afectan directamente los acuíferos aluviales de la zona. La lluvia induce escorrentías que se infiltran a los acuíferos, recargándolos para reponer el agua que se extrae. Sin embargo, una parte sustancial de la lluvia y la escorrentía se evapora del terreno o se transpira por las plantas debido a las altas temperaturas de la zona.

El clima de la Región Sur de Puerto Rico es clasificado como tropical marino seco. Las temperaturas de esta región promedian 88° F, con extremos de hasta 95° F. Tanto la temperatura como la precipitación pluvial en la región están influenciadas por los vientos del sur y del sureste, que en general son cálidos y secos. La ubicación geográfica de la Región Sur, aislada del efecto orográfico de los vientos Alisios del este, promueve temperaturas más elevadas y una precipitación promedio menor que en las otras regiones costaneras y el interior de Puerto Rico.

2.1. Precipitación

La precipitación promedio anual en los valles costaneros de la Región Sur es de aproximadamente 40 pulgadas (Calvesbert, 1980, Figura 3). La lluvia aumenta significativamente en las laderas de la Cordillera Central que drenan hacia el sur, con un promedio anual de 77 pulgadas. Aún cuando en las laderas del sur la lluvia es comparable a la de la Región Norte, el área de captación de las cuencas en el sur es mucho menor que en el norte, lo que ocasiona que la escorrentía promedio también sea menor en el sur que en el norte. Debido a esto, los ríos del sur se secan más rápidamente que los del norte.

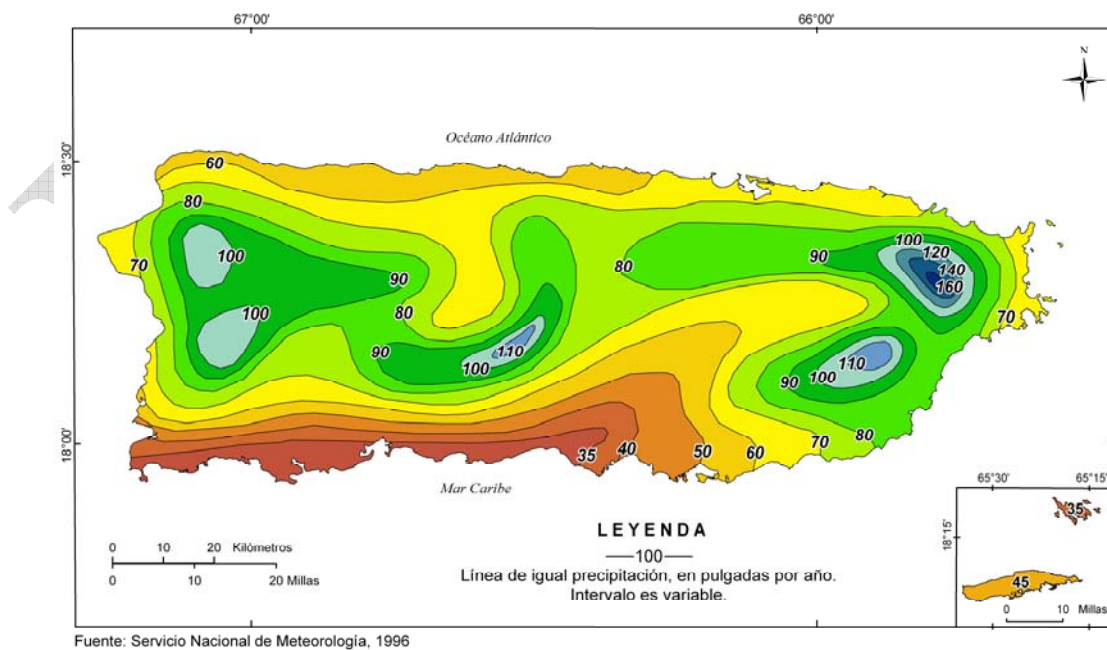


Figura 3. Precipitación pluvial promedio en Puerto Rico (período de record 1899 a 1996, NWS)

La precipitación pluvial en la costa sur de Puerto Rico es cíclica en sus períodos anuales y en períodos de aproximadamente cada 30 años. Durante el año se observa el patrón de sequía intensa en los meses de enero hasta julio y agosto, con algunos aguaceros en mayo. Luego, los frentes de frío y disturbios tropicales en el Caribe inducen un aumento en precipitación desde septiembre hasta diciembre, aumentando la escorrentía sustancialmente. Análisis de los datos de lluvia históricos del NWS en la Región sur establecen que aproximadamente cada 30 años ocurren unos ciclos de sequías más severas que las anuales. Se han registrado sequías severas en la zona en 1930-34, 1964-67 y la más reciente de 1995-98.

2.2. Evapotranspiración

La evapotranspiración es el proceso mediante el cual la lluvia que se precipita sobre una zona se evapora por la radiación solar o se transpira por las plantas que la absorben por sus raíces como parte del proceso de respiración biológica. La evapotranspiración controla la cantidad de agua de escorrentías que puede estar disponible para recargar los acuíferos. En muchos lugares del mundo, incluyendo sectores de la Región Sur como el Valle de Lajas, la evapotranspiración actual puede ser hasta el 90 por ciento de la lluvia promedio anual. Esto implica que aún cuando llueva con relativa abundancia, es posible que muy poca o ninguna agua se infiltre a los acuíferos.

En la Región Sur de Puerto Rico la evapotranspiración actual excede desde el 80 hasta el 90 por ciento de la precipitación pluvial. Esto equivale a valores de evapotranspiración actual que superan las 35 pulgadas por año (**Figura 3**). Esta condición limita la captación de agua de lluvia y por tanto la escorrentía pluvial en aguaceros de poca duración (menos de quince minutos).

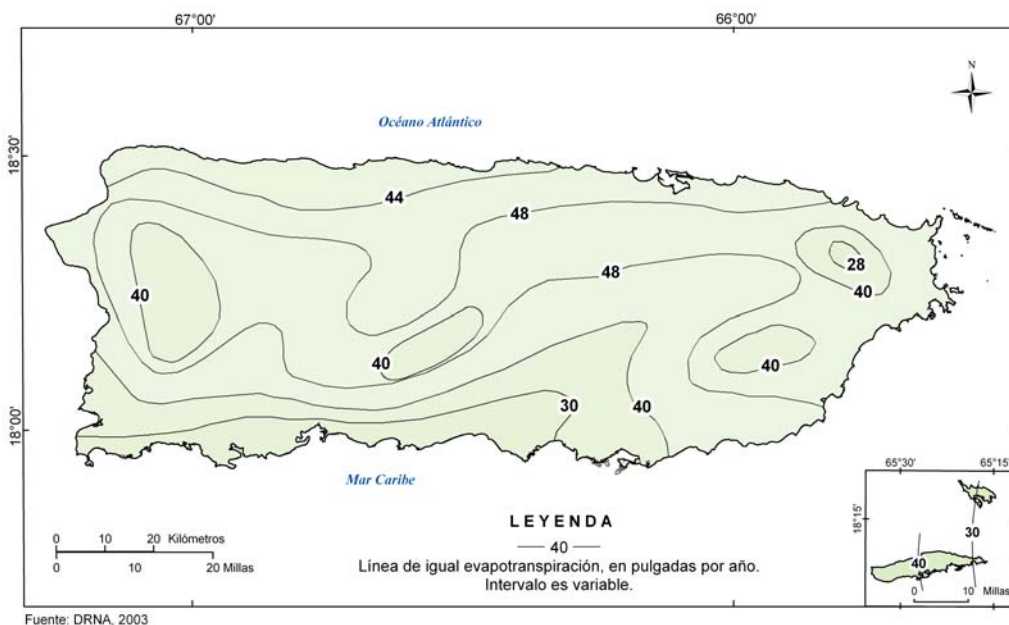


Figura 4. Evapotranspiración promedio actual en Puerto Rico (modificado de Giusti, 1976)

2.3. Geología

La geología de una zona define las propiedades de las rocas e indirectamente su capacidad de almacenar agua que poseen al formar acuíferos. Idealmente, los acuíferos más productivos son aquellos donde abunda el material poroso, tales como arena y grava, así como rocas calizas que contienen cavidades y fracturas. En los poros de los materiales que componen el acuífero se almacena el agua, en proporción a la porosidad promedio. Por el contrario, si la porosidad es baja, como ocurre en las rocas volcánicas de la Cordillera Central, la cantidad de agua que se almacena es relativamente poca, y los acuíferos no son productivos. La cantidad de agua que se almacena depende también del espesor de los depósitos de arena, grava o rocas calizas. Mientras mayor sea el espesor y mayor la porosidad, mayor cantidad de agua se almacena en el material, y mejor es el acuífero.

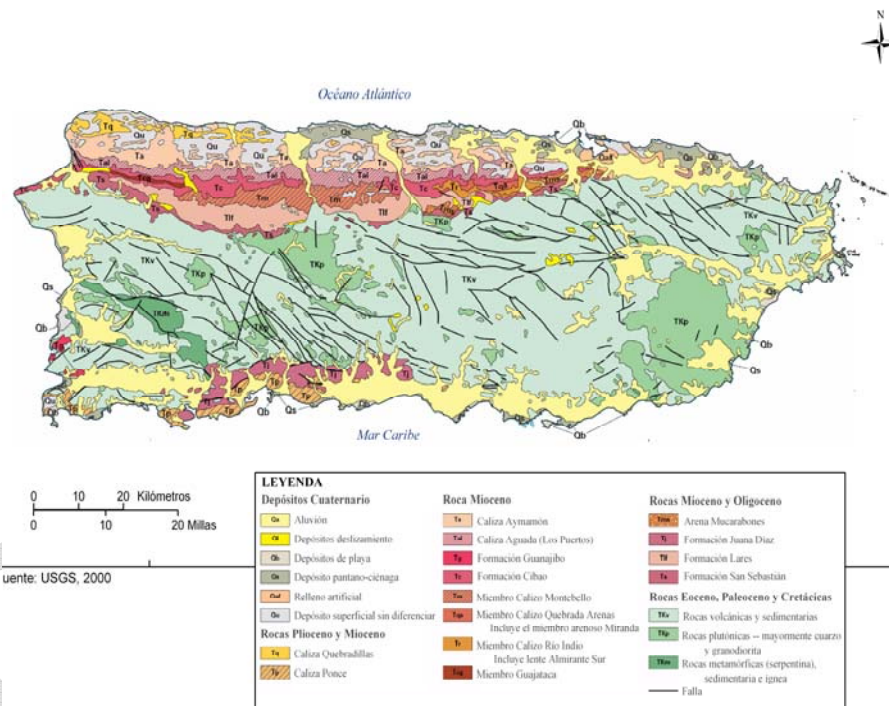


Figura 5. Geología generalizada de Puerto Rico (modificada de USGS, 2000)

En la Región Sur de la Isla, los depósitos o estratos geológicos que forman los acuíferos costaneros desde Patillas hasta Ponce consisten principalmente de arena, grava y rocas (mezcla llamada aluvión) arrastradas por los ríos desde las montañas a través de millones de años (período cuaternario o reciente, de aproximadamente los últimos 1.6 millones de años). Estos descansan sobre rocas calizas de origen marino y rocas volcánicas, ambas de baja porosidad. En la zona de Ponce hasta Peñuelas no existen depósitos aluviales significativos y predominan en la superficie las rocas calizas de origen marino que datan del periodo geológico Terciario, hasta aproximadamente 70 millones de años. Las colinas de caliza que se observan desde la Carretera Núm. 2 al cruzar desde el oeste de Ponce hasta la CORCO son parte de esta formación, y no

constituyen un acuífero productivo. Estructuralmente, los acuíferos costaneros de la Región Sur de Puerto Rico son extensos considerando el tamaño limitado de los valles que los forman. El espesor del aluvión que forman los acuíferos varía desde 100 pies en la zona de Ponce hasta aproximadamente 3,000 pies en sectores cercanos a Santa Isabel. Como se indicara antes, estos depósitos de aluvión descansan sobre rocas calizas o volcánicas más antiguas que no tienen una porosidad alta como el aluvión (Figura 5a y 5b).

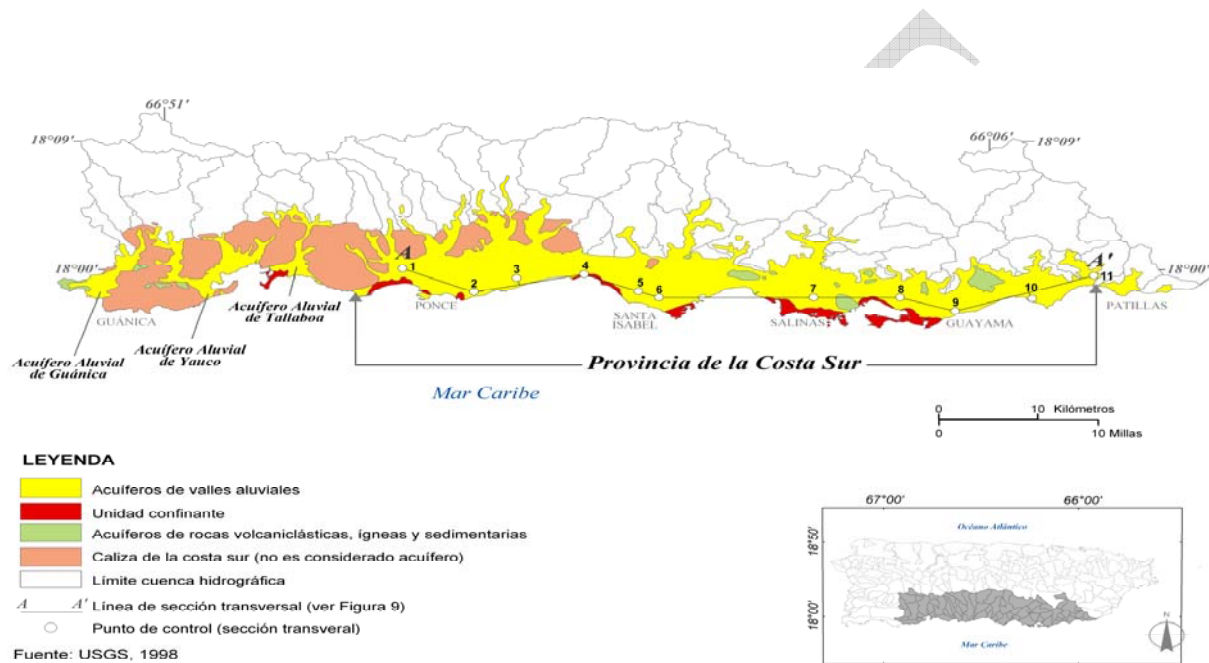


Figura 5a. Acuíferos de la Región Sur de Puerto Rico (refiérase a la Figura 5b, para información de sección transversal)

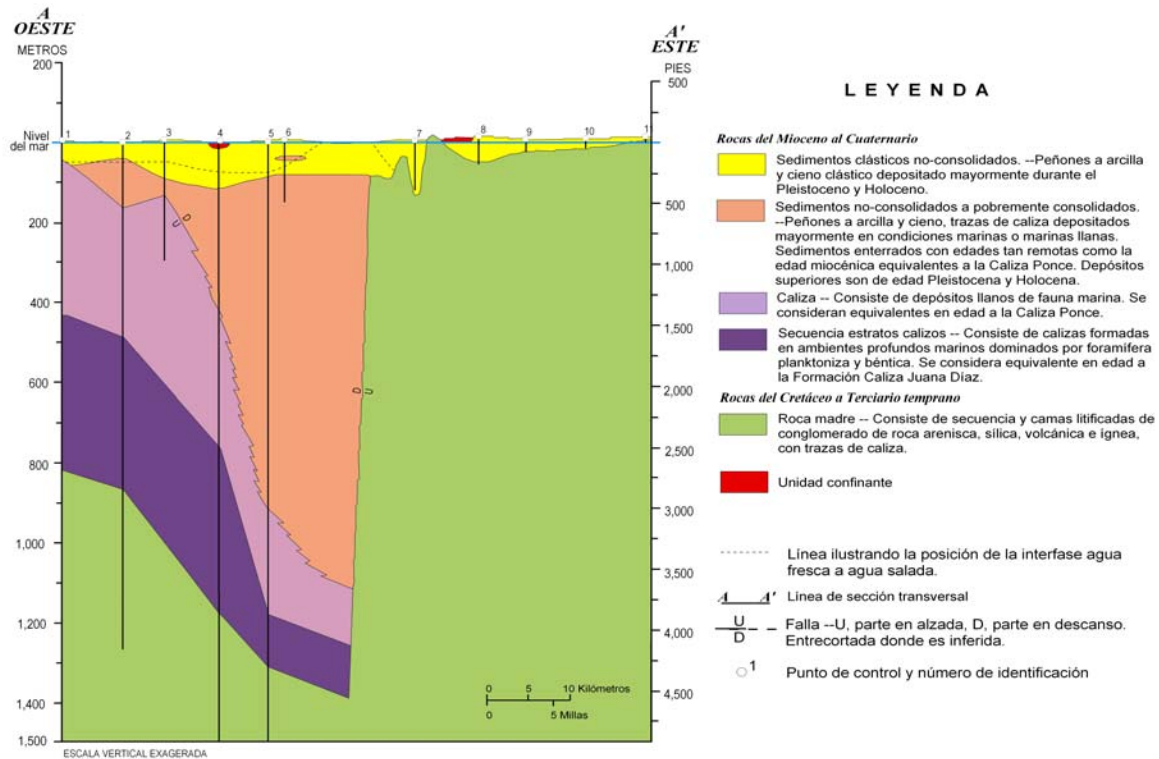


Figura 5b. Sección transversal generalizada del acuífero aluvial de la Provincia de la Costa Sur (refiérase a la Figura 5a, para localización de la sección).

2.4. Usos de Terrenos

El uso de terrenos en la Región Sur es principalmente agrícola, seguido por centros urbanos y zonas industriales-comerciales. Históricamente, predominaba el cultivo de la caña de azúcar desde Patillas hasta el Valle de Lajas y la operación de centrales azucareras en cada valle aluvial. El cultivo de la caña desapareció y ahora predominan los frutos, vegetales y pastos ganaderos. Durante las últimas dos décadas se ha acelerado el desarrollo de terrenos agrícolas para urbanizaciones y otras actividades urbanas. Este cambio en el uso de terreno tiene impactos significativos en los acuíferos de la región. La Figura 6 ilustra el uso de terrenos en la Región Sur en el 1992.

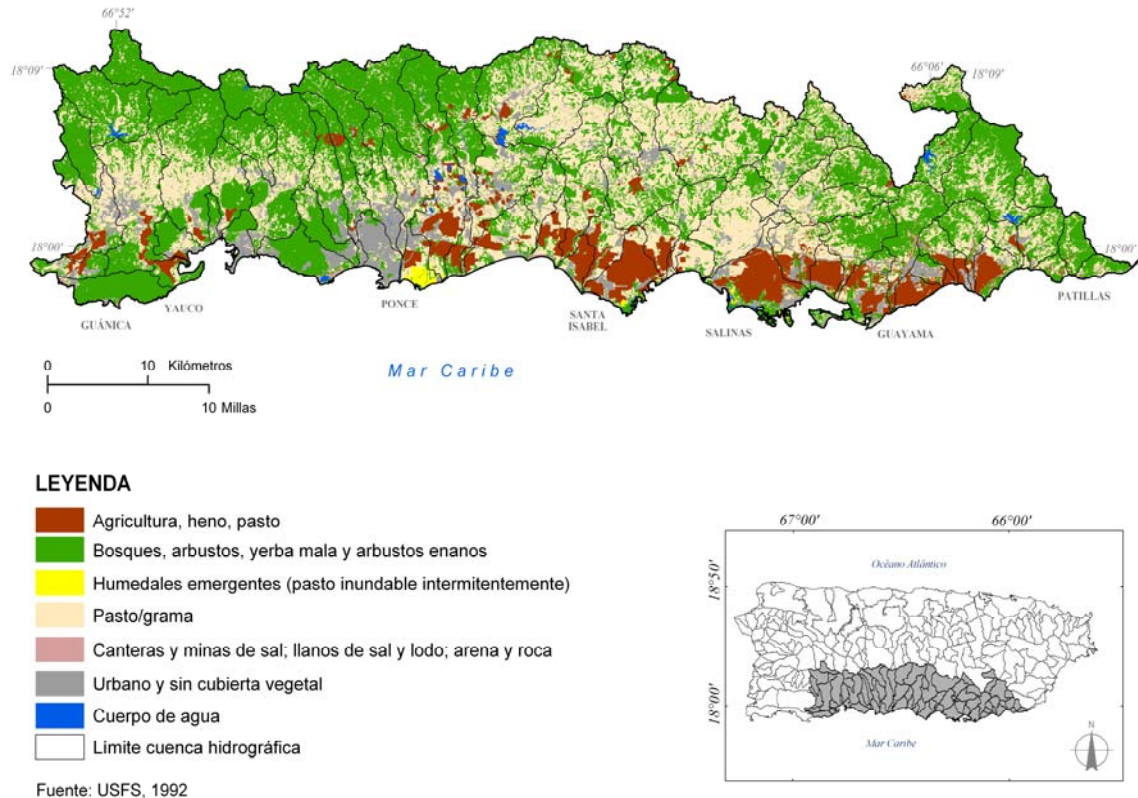


Figura 6. Mapas generalizados de uso de terrenos en la Región Sur de Puerto Rico, 1992 (USFS, 2000)

2.5. Distrito de Riego

Como se indicara anteriormente, el Distrito de Riego de la Costa Sur incluye los canales de Juana Díaz, Patillas, Guamaní Este, Guamaní oeste, y el Canal de Lajas. El sistema de canales incluye una red de aproximadamente 90 millas con cerca de 1,000 tomas reguladas por la AEE. Estos canales se nutren de los embalses de Patillas, Carite, Coamo, Toa Vaca, Guayabal, Cerrillos, Garzas, Yahuecas, Guayo, Loco y Luchetti. La Figura 7 ilustra la distribución de los embalses en el sur de Puerto Rico. Datos importantes de los embalses y Lagunas se resumen en la Tabla 1.

La AEE supe agua al sistema de canales desde los embalses indicados, generalmente luego de generar electricidad en sus unidades hidroeléctricas en los embalses. Sin embargo, debido a condiciones operacionales o climáticas, periódicamente la AEE descarga agua sin generar electricidad directamente a los canales de riego o aguas abajo de los mismos hacia el mar. Esto varía en cada embalse con la regla de operación que utiliza la AEE. Esto es sumamente importante para la condición de los acuíferos, ya que una gran parte de la recarga que reciben proviene de los sistemas de canales directamente y de la infiltración causada por el riego agrícola.

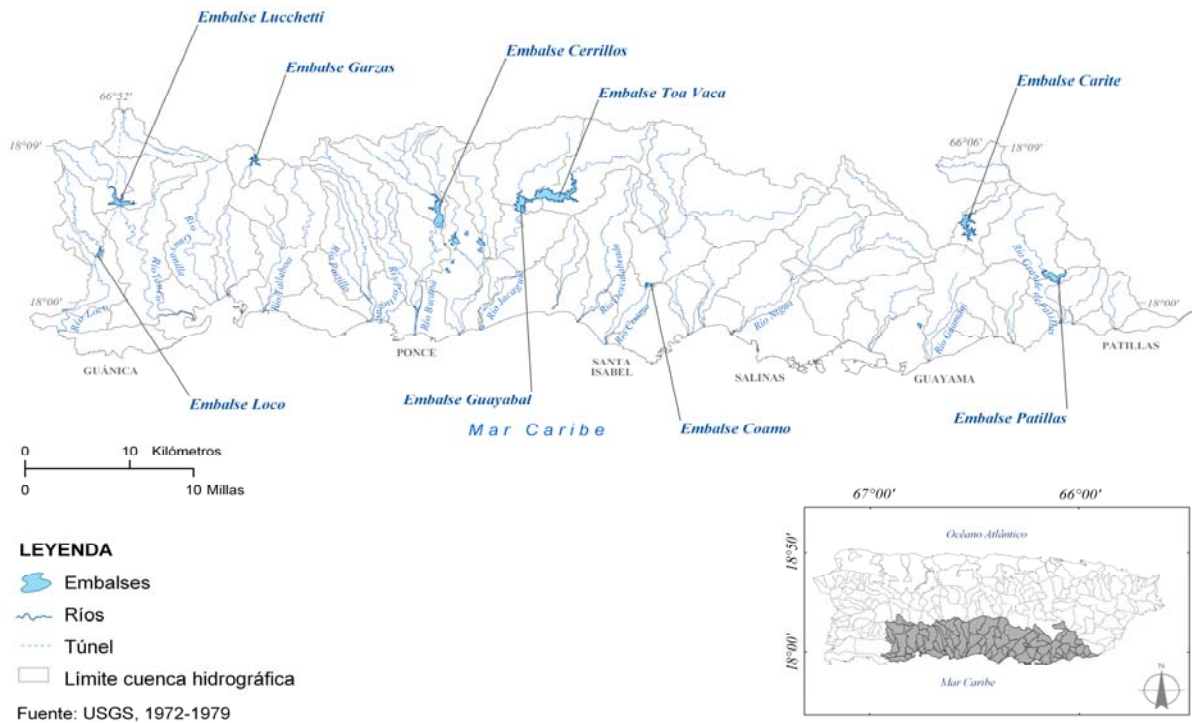


Figura 7. Embalses principales de la Región Sur de Puerto Rico

Tabla 2. Características principales de los embalses en el sur de Puerto Rico

Embalse	Río y Cuenca	Dueño y Año de Construcción	Uso	Área de Drenaje en la Presa (Km ²)	Capacidad Inicial (Acres-pies)	Capacidad Reciente (Acres-pies)	Año de Estudio	Rendimiento Seguro 1975 (mgd)
Toa Vaca	Descalabrado	AAA – 1972	Doméstico	22.4	60,100	50,670	1985	25.7
Patillas	Maunabo	ELA – 1914	Doméstico Agrícola	25.6	14,301	22,220	1997	34.3
Carite	Guamaní	AEE – 1913	Doméstico Agrícola	8.19	11,309	8,705	1999	16.1
Guineo	Arecibo	AEE – 1931	Doméstico Hidroeléctrico Agrícola	1.64	1,860	1,530	2001	3.90
Patrullas	Arecibo	AEE – 1934	Hidroeléctrico Agrícola	4.48	3,010	2,500	2001	8.00
Loco	Loco	AEE – 1951	Hidroeléctrico Agrícola	8.34	1,950	270	2000	2.50
Luchetti	Yauco	AEE – 1952	Hidroeléctrico Agrícola	17.4	16,498	705	2000	13.9
Guayo	Añasco	AEE – 1956	Hidroeléctrico Agrícola	9.61	15,566	13,430	1997	11.5
Garzas	Arecibo	AEE – 1943	Doméstico Hidroeléctrico	15.6	4,702	4,140	1996	10.4
Guayabal	Descalabrado	ELA - 1913	Agrícola	16.3	15,106	15,100 ¹	NE	21.4
Cerrillos	Cerrillos	DRNA - 1991	Doméstico Control de Inundaciones Recreación	17.4	47,900	47,900 ¹	NE	N/A
Yahuecas	Añasco	AEE – 1956	Hidroeléctrico	17.4	1,427	270	1997	0

Fuente: USGS excepto ¹ AEE

NE, No estudiado

mgd – millones de galones por día

2.6. Hidrografía

La Región Sur incluye varios ríos de importancia que impactan directa e indirectamente la condición de los acuíferos. Los ríos principales desde el este a el oeste incluyen el Patillas; Guamaní (Guayama); Majada-Nigüa (Salinas); Coamo; Descalabrado (Juana Díaz); Bucaná, Cerrillos y Portugués (Ponce); Tallaboa (Peñuelas); Guayanilla; Loco (Yauco); y el Guanajibo (San Germán). En la zona del Valle de Lajas no existen ríos significativos, sino varias quebradas que fluyen solamente durante aguaceros intensos. La Tabla 2 resume los datos hidráulicos más importantes de los ríos en la Región Sur.

Debido a la localización geográfica de la Cordillera Central en el interior de Puerto Rico, el drenaje superficial en los ríos en la costa sur es más rápido y de poca duración cuando se compara con las costas norte, este y oeste. Inundaciones repentinas de gran magnitud han sido documentadas durante los últimos 30 años los cuales han ocasionado grandes pérdidas en la agricultura, la propiedad y la vida civil.

Como se indicara anteriormente, la mayor parte de los ríos en la Región Sur han sido represados como parte de los Distritos de Riego del Sur y del Valle de Lajas. Anterior a la construcción de los embalses a principios de siglo, los acuíferos mantenían un equilibrio en sus niveles freáticos gracias a la recarga que recibían de los ríos en su paso de las montañas hacia los valles. Aunque el uso agrícola era significativo, la recarga de los ríos y la lluvia sobre la zona mantenía los acuíferos en equilibrio. Los desarrollos urbanos y la extracción de agua para usos domésticos por la AAA, así como el desarrollo intenso de la agricultura, la industria y el comercio, alteró este equilibrio a las condiciones actuales de deterioro general de los acuíferos.

Tabla 3. Datos hidráulicos (descarga mínima y máxima, descarga promedio) en los ríos principales de la Región Sur de Puerto Rico (USGS, 2002)

(MGD – millones de galones por día; PCS – pies cúbicos por segundo; ND – no determinado; d – río no fluye]; 7Q10 – flujo mínimo representado por siete días consecutivos con una frecuencia de 10 años).

Río	Flujo Mínimo Diario (MGD)	7Q10 ^a (MGD)	Flujo Promedio Anual (MGD)	Flujo Máximo Instantáneo (PCS)
Río Loco aguas arriba del Lago Loco	ND	0.45	14.19 ¹	105 ²
Río Yauco cerca a la represa Lago Luchetti	ND	0.78	7.54 ³	42,000 ⁴
Río Guayanilla	0.50	1.55	14.86	18,700
Río Macaná cerca a Peñuelas	ND	0.19	ND	ND
Río Tallaboa en Tallaboa	ND	3.10	32.61	6,440
Río Matilde	ND	1.23	ND	ND
Río Portugués en Carretera estatal 14, Ponce	0.63	1.10	34.06	16,300
Río Bucaná en Carretera estatal 14, Ponce	1.49	1.81	32.12	17,400
Río Inabón en Real Abajo	0.52	1.03	11.76	19,000
Río Jacaguas en Juana Díaz	0.16	18.10	29.53	40,000
Río Descalabrado cerca a Los Llanos	0.00	<0.06	7.17	30,000
Río Coamo en Coamo	0.43	1.29	13.70	52,700
Río Salinas	D	0.13	4.92	17,700
Río Seco en la Hacienda Juana	ND	D	ND	1,800
Río Guamaní en Guayama	ND	D	12.31	13,300
Río Grande de Patillas	3.10	4.33	37.29	30,900

Fuente: USGS (2002)

- ¹ Datos de flujo promedio publicado para estación de aforo en Río Loco en Guánica
- ² Flujo pico publicado para estación de aforo aguas abajo de la represa del Río Loco
- ³ Datos de flujo promedio publicado para estación de aforo en Río Yauco cerca de Yauco
- ⁴ Flujo pico publicado para estación de aforo en Río Yauco cerca de Yauco

3.0 Acuíferos de la Región Sur

Los acuíferos aluviales de la Región Sur de Puerto Rico se encuentran localizados a lo largo de los valles costaneros formados por los cauces de los ríos principales (Figura 8). Los hidrólogos del USGS han dividido los acuíferos de la Región Sur en dos grupos: la Provincia de la Costa Sur y los acuíferos aluviales de Tallaboa, Yauco (excluye área de Guayanilla) y Guánica. Esta división obedece a las características del material que forma los acuíferos en cada valle entre los ríos anteriormente descritos. La extensión territorial de estas dos regiones hidrológicas se ilustra en la Figura 8.

En general, el agua subterránea fluye de norte a sur en los acuíferos de la Región 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, incluyendo doméstico, agrícola e industrial-comercial.

Datos sobre los cambios en los niveles freáticos en la Región Sur han sido publicados por el USGS desde 1960 hasta mediados de 1990. 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.

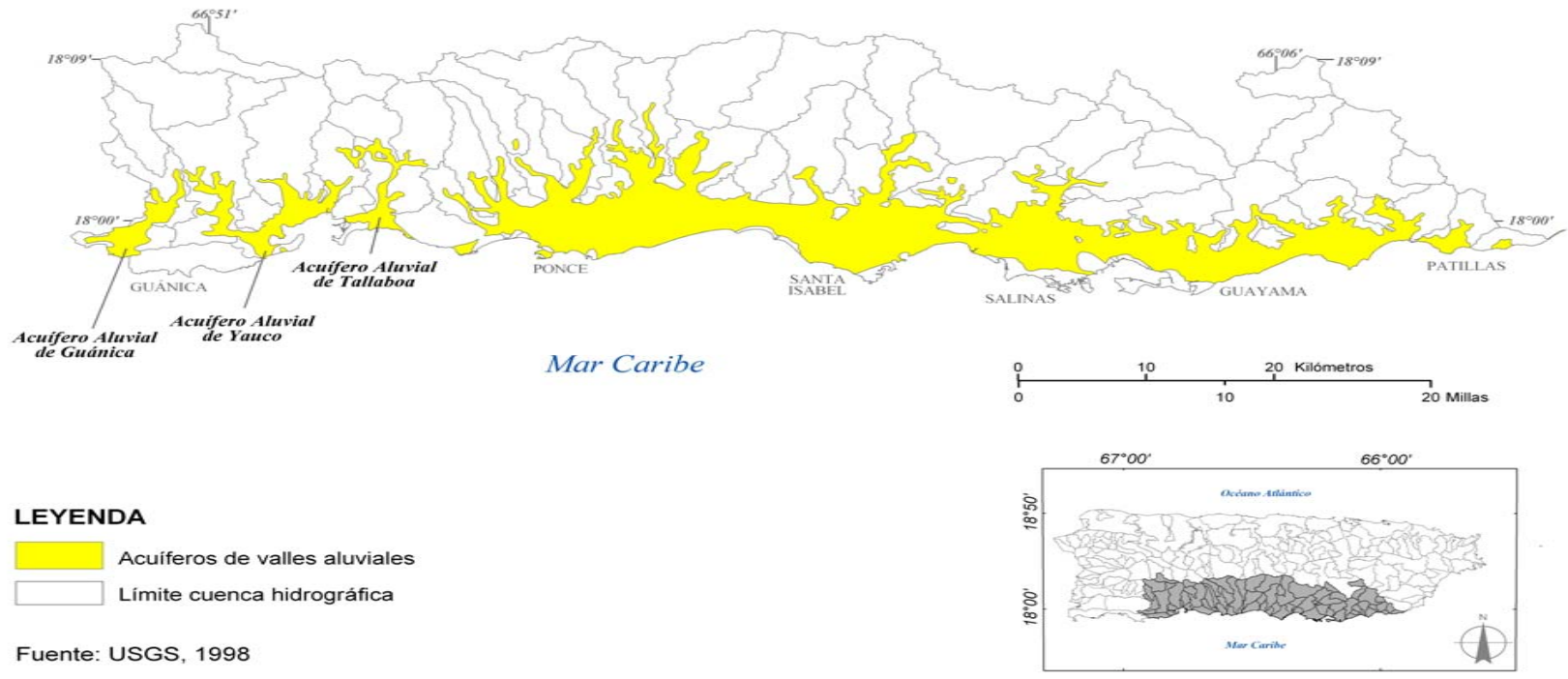


Figura 8. Acuíferos aluviales de la Región Sur de Puerto Rico

Utilizando como ejemplo el acuífero en el área de Santa Isabel, se observan cambios significativos entre los niveles potenciométricos publicados por el USGS para marzo de 1986 en comparación a los mapas de 1997. Durante este período a ocurrido un descenso notable en el nivel de agua subterránea (Figuras 9a-c). En forma similar si comparamos los niveles publicados para la década de los 60 y los niveles más recientes observamos condiciones similares. La Figura 9a muestra los mapas potenciométricos para condiciones hidrológicas de 1968, la figura 9b para condiciones hidrológicas de 1986, ambas para la Provincia de la Costa Sur y la figura 9c para condiciones hidrológicas de 1997 para el área de Santa Isabel. Esta condición de descenso en los niveles de agua subterránea se refleja también en los acuíferos de las áreas de Salinas, Juana Díaz, Ponce, Tallaboa, Yauco y Guánica.

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 el Distrito 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 de pozos domésticos y agrícolas. El riego de la zona que incluye inundación de predios mediante zanjas; riego por goteo que utiliza agua principalmente agua de pozos y se aplica directamente a las plantas o cosechas; y riego aéreo mediante bombas y “cañones” fijos o móviles que aplican el agua directamente a las cosechas.

Más importante aún a la recarga de los acuíferos es el agua que se escapa de los canales de riego de la AEE debido a roturas y desbordes, y que se infiltra a los acuíferos previo a llegar a las zonas agrícolas. En el Distrito de Riego del Sur, la AEE estima que un promedio del 10 por ciento del agua que fluye por los canales de riego se escapa y se infiltra a los acuíferos. En la zona de Salinas y Santa Isabel, esta fuente es posiblemente un 25 % del agua que fluye por los canales. Aunque la reparación de los canales por la AEE aumentará la cantidad de agua disponible para riego agrícola y uso doméstico, tendrá un efecto negativo en disminuir la recarga a los acuíferos de la zona. Para atender este déficit adicional potencial, será necesario reducir las extracciones de los acuíferos, o en su defecto, aumentar artificialmente la recarga. Estas alternativas se evalúan en otras secciones de este informe.

Los acuíferos de la Región Sur también sufren de problemas de calidad de agua. Existen varias razones para el deterioro de la calidad del agua que de un modo u otro afecta en varios grados toda la región desde Patillas hasta Guánica.

- Contaminación química severa: Las industrias que han operado y operan en la Región Sur han contribuido a contaminar los acuíferos de la zona. Existen focos de contaminación química severa en Guayama (Phillips y Fibers); en sectores de Salinas (nitratos de orígenes agrícolas o sanitarios); en Ponce (nitratos y manganeso); y en Guayanilla y Yauco (compuestos petroquímicos).
- Contaminación química menor: Estudios de la EPA, la JCA y el USGS han identificado pozos agrícolas y domésticos ahora cerrados donde la presencia de contaminantes químicos (mayormente solventes) impide el uso para consumo humano. Pozos afectados de este modo existen en Patillas, Arroyo, Guayama, Salinas, Coamo, Juana Díaz, Ponce, Guánica y San Germán.

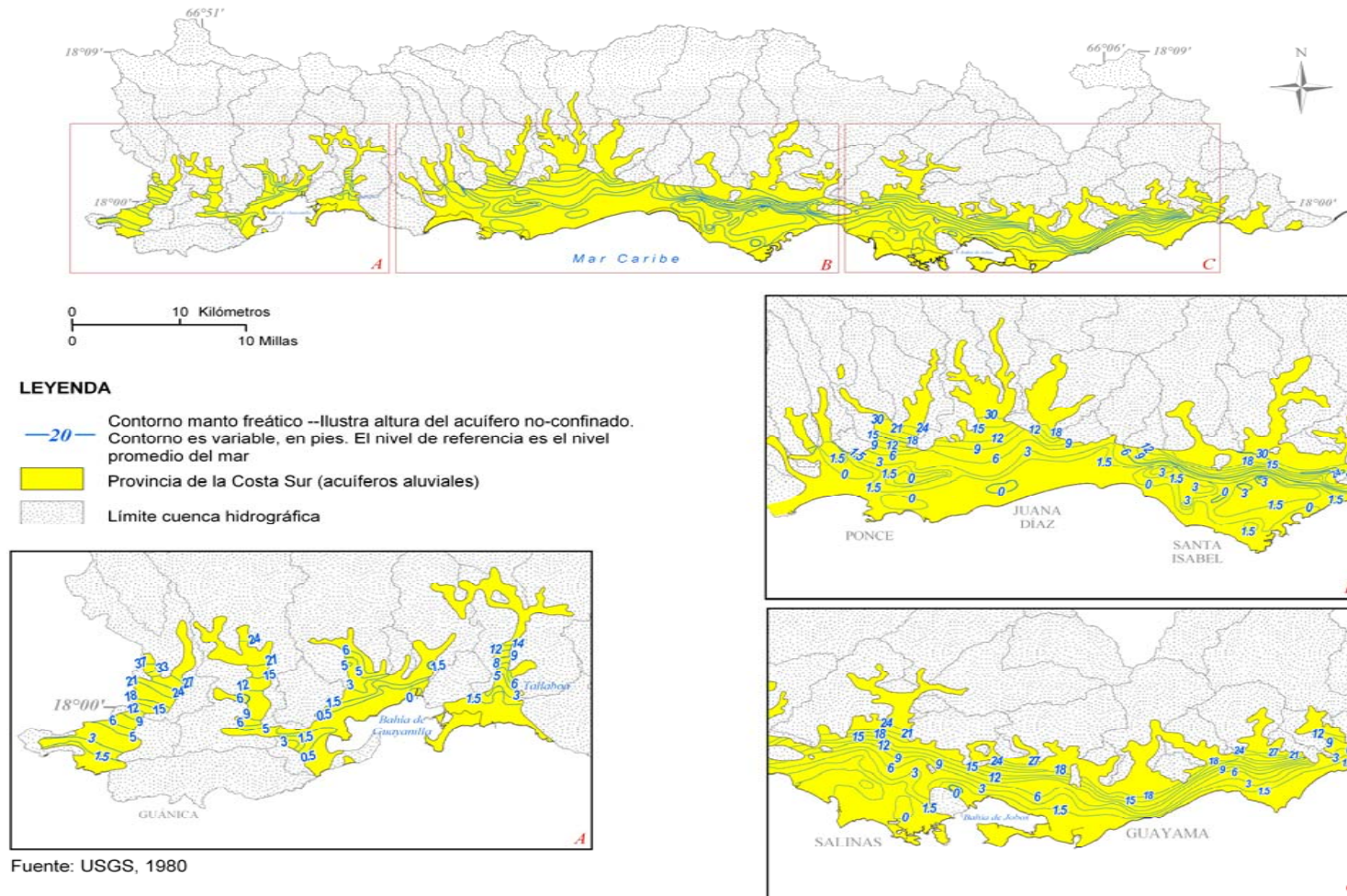
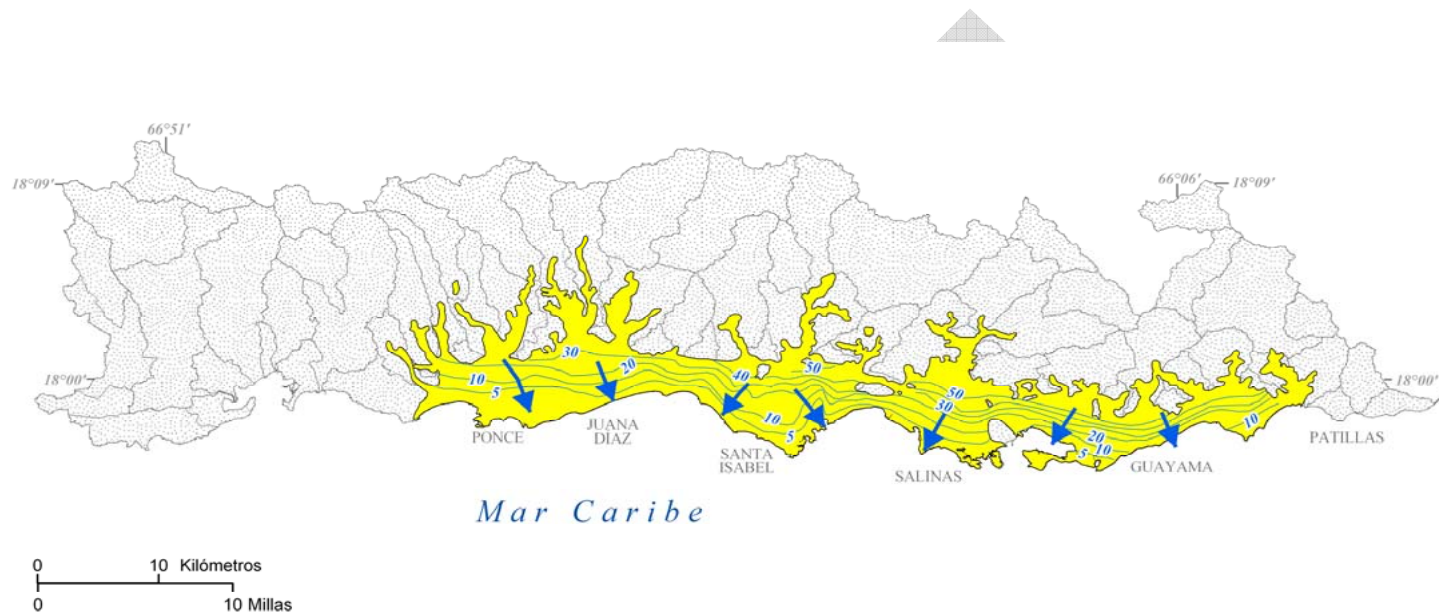


Figura 9a. Mapa potenciométrico de condiciones hidrológicas existentes durante la sequía de 1968 en la Región Sur de Puerto Rico (Gómez-Gómez, 1980)



LEYENDA

- 20— Contorno manto freático -- Ilustra altura del acuífero no-confinado. Contorno es variable, en pies. El nivel de referencia es el nivel promedio del mar
- ➔ Dirección del movimiento de agua subterránea
- Provincia de la Costa Sur (acuíferos aluviales)
- ▨ Límite cuenca hidrográfica

Fuente: USGS, 1999

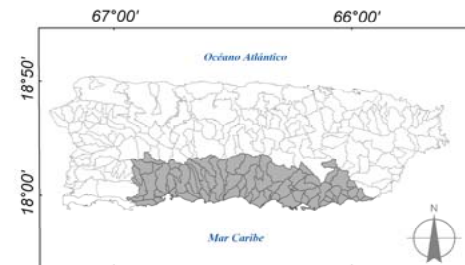
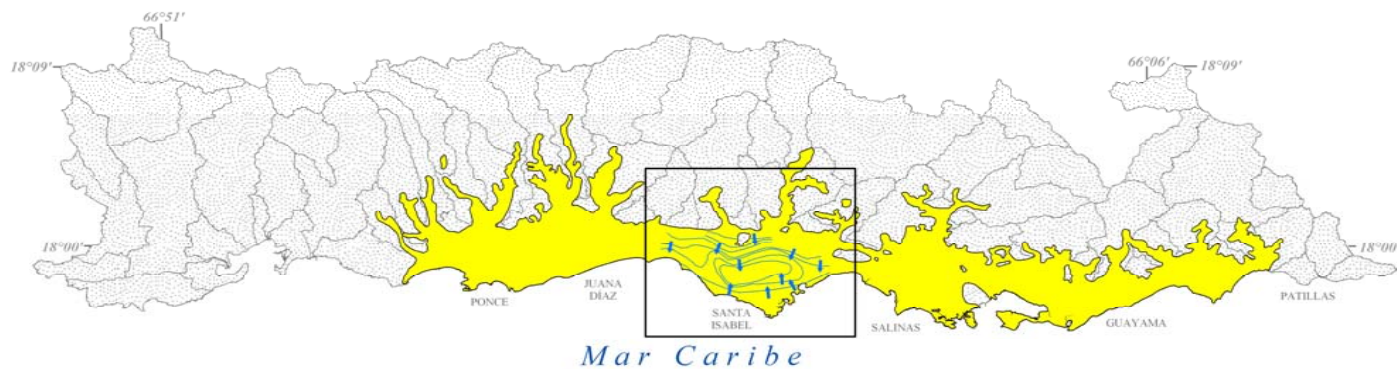
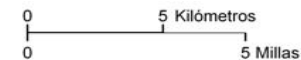


Figura 9b. Mapa potenciométrico de condiciones hidrológicas existentes durante 1986, Región Sur de Puerto Rico



LEYENDA

- 40— Contorno manto freático -- Ilustra altura del acuífero no-confinado. Contorno es variable, en pies. El nivel de referencia es el nivel promedio del mar
- Dirección del movimiento de agua subterránea
- Provincia de la Costa Sur (acuíferos aluviales)
- ▨ Límite cuenca hidrográfica



Fuente: USGS, 2003

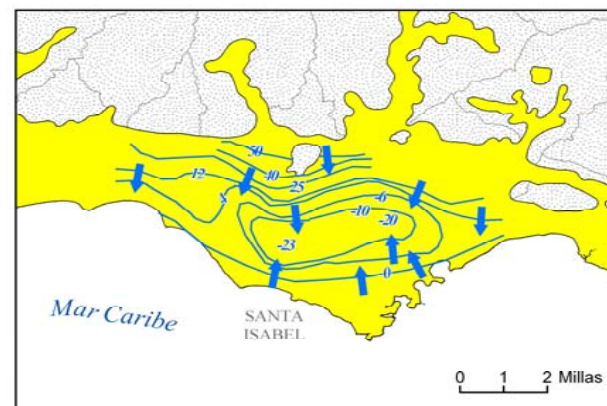
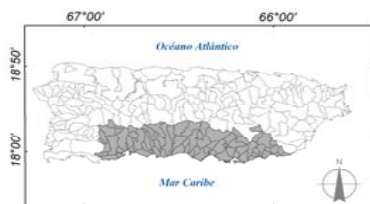


Figura 9c. – Mapa potenciométrico de condiciones hidrológicas existentes durante 1997, Región Sur de Puerto Rico (DRNA, 2003)

- Intrusión Salina: La intrusión salina es el problema más significativo en términos de áreas afectadas en la Región Sur. Existen dos razones para la salinización de la zona de los acuíferos que se utilizan para agua potable o riego en la región:
 - El bombeo excesivo de agua en las zonas de Guayama, Salinas, Santa Isabel, Coamo y Ponce ha resultado en reducciones de hasta 40 pies en el nivel freático (relativo a su condición original previo al desarrollo agrícola intenso de la zona). Bajo la capa de agua fresca en los acuíferos del sur existen depósitos de agua salobre de origen marítimo. Normalmente, si el bombeo no es excesivo, esa agua salobre no se moviliza ni filtra, y no afecta los pozos. Cuando el nivel freático desciende significativamente, el bombeo continuo hace que el pozo hale agua salobre se aspire al pozo, afectando la calidad del agua.
 - En algunas instancias en la Región Sur, el bombeo excesivo hace que la cuña de agua salada pueda moverse tierra adentro, afectando en forma general sectores del acuífero. Pozos en zonas donde la cuña de agua salada avanza tierra adentro producen agua salobre no apta para riego o consumo.

Para entender mejor la condición actual de los acuíferos de la Región Sur detallamos a continuación un balance hidrológico de cada sector documentado con datos del USGS y estimados de flujo de los componentes hidrológicos para el año 2000. Para estos propósitos se ha separado el acuífero de la Provincia de la Costa Sur en las siguientes regiones de los acuíferos aluviales: Patillas a Salinas-Santa Isabel; Coamo; Juana Díaz a Ponce. Además, se incluye también el balance hidrológico de los acuíferos aluviales de Tallaboa, Yauco (excluye área de Guayanilla) y Guánica.

3.1. Balance de Agua en Cada Acuífero Aluvial de la Región Sur

Los datos de uso de agua de los estudios del USGS establecen que en el 2002 se utilizaban aproximadamente 163 mgd de aguas superficiales y subterráneas en los municipios que comprenden la Región Sur. Este total incluyó 113 mgd de fuentes superficiales (canales, ríos y embalses) y 50 mgd de los acuíferos.

- La extracción de los 50 mgd de agua subterránea incluyó aproximadamente 25 mgd para usos domésticos (AAA), 23 mgd para usos agrícolas y dos (2) mgd para usos industriales.
- Se estima que el uso de agua superficial proveniente de canales y embalses en la región es de aproximadamente 110 mgd. Esto incluye 45 mgd para usos domésticos (AAA) y 65 mgd para usos agrícolas (datos de la AEE, 2002-2003).

El balance hidrológico para cada acuífero o región en la costa sur incluye estimados de recarga neta, es decir recarga natural y artificial; infiltración mediante pérdidas y ganancias de agua en los segmentos de ríos, quebradas y embalses; evapotranspiración, de esta afectar el volumen de agua en los acuíferos; extracción de agua subterránea para diversos usos; y flujo hacia el mar. Es importante indicar que

cada uno de los sistemas aluviales ilustrados a continuación poseen particularidades que hacen que el análisis hidrológico sea diferente. Por ejemplo: existen áreas geográficas con extensión urbana significativa, en Ponce; abanicos aluviales extremadamente pequeños, en Guánica y Tallaboa; áreas con cambios drásticos en usos de terrenos, en Santa Isabel y Salinas; y áreas con condiciones hidrológicas similares pero aplicaciones y uso de agua diferentes, en Guayama, Arroyo y Patillas.

A continuación se detallan aquellos flujos hidrológicos documentados por estudios llevados a cabo principalmente por el USGS durante los últimos 35 años. La metodología y forma de análisis no se discuten a modo de simplificación al público general.

3.2. Acuífero aluvial de Patillas a Salinas

El acuífero aluvial de Salinas se extiende desde Río Salinas (Nigua) hasta el Río Patillas, con un área de 67 millas cuadradas. Las condiciones hidrológicas se basan en datos de 1972, 1976, 1986 y estimadas para el año 2000. Los estimados más recientes de flujo en este acuífero aluvial datan de estudios realizados por McClymonds y Díaz (1972), Bennett (1976), y Quiñones-Aponte (1997). Los componentes del ciclo hidrológico para este sistema de acuíferos se resumen a continuación:

--millones de galones por día (mgd)

Componente hidrológico	1972	1976	1986	2000
Recarga de lluvia (llano costanero)	15.2	24.6 ^r	31.1	19.1 ^e
Ganancia-Pérdida descarga de ríos	7.11	3.5	5.7	5.7
Agua superficial aplicada a las fincas	12.3	--	12.3	11.7 ^a
Evapotranspiración	--	6.2	4.0	4.0
Extracción neta agua subterránea	23.3	24.4	27.9	25 ^e
Flujo de agua subterránea al mar	11.6	3.6	4.9	4.7 ^e

r – valor considera recarga de canales

e – valor estimado

a – valor se obtuvo mediante comunicación escrita de la AEE

En esta zona los datos hidrológicos del acuífero demuestran que existe un pequeño excedente de agua de aproximadamente 2.4 mgd. Aunque en la zona de Coquí al norte de Aguirre los datos del USGS reflejan una depresión en los niveles freáticos, en las zonas al oeste y norte de la zona urbana los niveles freáticos permanecen estables. En esta zona existe el potencial de extraer cantidades menores de agua subterránea.

3.3. Acuífero aluvial de Coamo (Río Descalabrado a Río Jueyes)

Este acuífero se extiende desde el Río Descalabrado hasta el Río Jueyes, con un área de 50 millas cuadradas. Las condiciones hidrológicas reflejan datos desde 1930 (predesarrollo), 1966-1968, 1987 y estimadas para el año 2000. Los estimados más recientes de flujo dentro del ciclo hidrológico de este acuífero aluvial datan de estudios realizados por Ramos (1994). Para el año 2000, en la zona de este acuífero existía un déficit anual de aproximadamente 30 mgd, que es el resultado de un descenso promedio acumulado en los niveles de agua en el acuífero de 13.05 pies en el periodo comprendido entre 1987 y el 2000 (13 años).

Los componentes del ciclo hidrológico para este sistema de acuíferos se resumen a continuación:

Balance de agua
---millones de galones por día (mgd)---

Componente hidrológico	1930	1966-1968	1987	2000
Recarga de lluvia (llano costanero)	6.7	6.3	11	11
Ganancia-Pérdida descarga de ríos	3.5	5.0	9.4	5.5e
Agua superficial aplicadas las fincas	16.2	14	4.2	13.43a
Agua subterránea aplicada a las fincas	2.5	23	2.4	2.4
Evapotranspiración	3.4	0.2	0.3	0.3
Extracción para riego por inundación	8.4	77	8.0	10.5e
Extracción para riego por goteo	0	0	9.0	2.2e
Extracción para abasto público	0.1	0.3	4.0	7.8u
Flujo de agua subterránea al mar	17	0.5	5.7	3.7

e – valor estimado

a – valor se obtuvo mediante comunicación escrita de la AEE

3.4. Acuífero aluvial de Juana Díaz a Ponce

El acuífero aluvial en la zona de Ponce a Juana Díaz incluye un área de aproximadamente 58 millas cuadradas. Los datos a continuación reflejan las condiciones hidrológicas durante 1964-1965 y estimadas para el año 2000. Estimados de flujo dentro del ciclo hidrológico de este acuífero aluvial datan de estudios realizados por McClymonds (1972) y Giusti (1968) en Ponce y Juana Díaz, respectivamente. En esta área existen al presente aproximadamente 178 pozos activos.

Los componentes del ciclo hidrológico para este sistema de acuíferos se resumen a continuación:

Balance de agua
----millones de galones por día (MGD)---

Componente hidrológico	1964-1965	2000
Precipitación pluvial (montañas y llano costanero)	252	252
Precipitación pluvial (llano costanero)	--	115 ^e
Evapotranspiración	294	168 ^e
Efluente de los ríos	79	-- ^c
Afluente de los ríos	28	--
Canales de riego	51	2 ^a
Extracción subterránea abasto público	29	5.2 ^u
Extracción por riego por goteo	0	2.7 ^u
Embalses (Cerrillos y Toa Vaca)	0	25.4 ^a
Recarga a los acuíferos	27	12 ^e
Flujo de agua subterránea al mar	--	4.1 ^e

e – valor estimado utilizando área cubierta por depósitos no-consolidados

a – valor se obtuvo mediante comunicación escrita de la AEE

c – sistema controlado por embalse

u – USGS, 2003

3.5. Acuífero aluvial de Tallaboa

El acuífero aluvial de Tallaboa incluye un área de 6.33 millas cuadradas. Las condiciones hidrológicas se basan en datos de 1959-1960 y estimadas para el año 2000: Los estimados más recientes de flujo dentro del ciclo hidrológico de este acuífero aluvial datan de estudios realizados por Grossman (1972). Los componentes del ciclo hidrológico para este sistema de acuíferos se resumen a continuación:

millones de galones por día		
Componente hidrológico	1959-1960	2000
Recarga de lluvia (llano costero)	1.2	1.0 ^e
Ganancia-Pérdida descarga de ríos	5.4	3.6 ^e
Evapotranspiración	10.8	10.8
Extracción riego por inundación	0.06	0 ^e
Extracción riego por goteo	0	1.3 ^u
Extracción uso industrial	3.5	0.2 ^e
Extracción abasto público	<0.5	18.7
Flujo de agua subterránea al mar	2.5	1.2 ^e

^e – valor estimado

^a – valor se obtuvo mediante comunicación escrita de la AEE

^u – USGS, 2003

En esta zona, debido a la alta evapotranspiración, aparenta existir un déficit de aproximadamente 10.7 mgd.

3.6. Acuífero aluvial de Yauco

El acuífero aluvial de Yauco incluye un área de aproximadamente 7.0 millas cuadradas. No incluye el área de Guayanilla, que representa 5.77 millas cuadradas adicionales. Las condiciones hidrológicas se basan en datos del 1986 y estimadas para el año 2000. Los estimados más recientes de flujo en este acuífero aluvial datan de estudios realizados por Quiñones-Aponte (1986). Los componentes del ciclo hidrológico para este sistema de acuíferos se resumen a continuación:

Componente hidrológico	1959-1960	2000
Recarga de lluvia (llano costero)	3.8	4.5 ^e
Evapotranspiración	1.11	2.0 ^e
Ganancia-Pérdida descarga de ríos	7.0	3.1 ^e
Extracción uso agrícola	?	1.0 ^e
Extracción abasto público agua subterránea	7.85	3.5 ^e
Flujo de agua subterránea	0.1	0.08

a – valor se obtuvo mediante comunicación escrita de la AEE

e – valor estimado

G – balance incluye acuífero aluvial de Yauco y Guayanilla

u – USGS, 2003

En esta zona el acuífero está en aparente equilibrio entre las extracciones y la recarga.

3.7. Acuífero Aluvial de Guánica

Los estimados más recientes de flujo dentro del ciclo hidrológico de este acuífero aluvial datan de estudios realizados por McClymonds (1963). El acuífero aluvial de Guánica posee un área de 6.69 millas cuadradas. El análisis volumétrico es similar al análisis de Yauco y Guayanilla con la excepción de que el Río Loco esta controlado por los Embalses de Luchetti y Loco. Los embalses de Yahuecas y Guayo, en las laderas norte, contribuyen agua a Luchetti mediante un sistema de túneles. El sistema abastece el Distrito de Riego del Valle de Lajas a través del Canal de Lajas, así como las plantas de la AAA en Sabana Grande, Lajas y Guánica.

1. La AAA utiliza aproximadamente 10,000 acres-pies al año, mientras que el uso agrícola durante los últimos 6 meses promedio alrededor de 17,000 acre-pies por año.
2. La AAA llevó a cabo un estudio de este sistema en el 2001, y estimó que el rendimiento seguro del sistema de embalses Loco-Luchetti es de aproximadamente 16.6 mgd. Es importante apuntar que este concepto de rendimiento seguro aplica a los usos de agua potable y no a los agrícolas.
3. Datos de los últimos 10 años de la AEE y del USGS indican que la cuenca del Río Loco, incluyendo las transferencias de agua del sistema de Yahuecas y Guayo, produce un promedio anual de 120,000 acres pies de agua.
4. En comparación, el uso de agua para la AAA y la agricultura es menos del 30 por ciento del total, ocurriendo desbordes de aproximadamente 90,000 acres pies en promedio. Esta agua fluye hacia el mar sin aprovecharse óptimamente.
5. Por otro lado, la Legislatura designó gran parte del Valle de Lajas como una reserva agrícola, incluyendo 17,000 acres para posibles cultivos. Las necesidades de agua para riego para esta extensión se aproximan a 50 mgd, o el equivalente a 56,000/acres-pies de agua al año. Los recursos de agua disponibles del sistema de los embalses de Luchetti y Loco no son adecuados para satisfacer esta demanda, a menos que se modifique la operación del sistema hidroeléctrico de la AEE y se capture parte del agua que ahora se descarga al mar aguas abajo del Embalse Loco.

3.8. Concepto de Rendimiento Seguro de los Acuíferos de la Región Sur

Varios sectores en la Isla se refieren frecuentemente al concepto de “vida útil” de los acuíferos, y a referencias de que los acuíferos de la Región Sur están en peligro de agotarse. Los análisis de los acuíferos utilizan el concepto de rendimiento seguro, y no el de vida útil, que es aplicable a los embalses, que al sedimentarse pierden su capacidad de almacenaje paulatinamente. Un acuífero pudiera perder su vida útil si fuera afectado paulatinamente por contaminación química o salina en un periodo de tiempo que permitiera su uso menor a medida que la contaminación avanzara. Varios datos importantes sobre los acuíferos:

Su capacidad de almacenaje no varía significativamente con los milenios. Esto se debe a que la porosidad del material que forma el acuífero ni el espesor del material no cambia sustancialmente con el tiempo. En los poros es que se almacena el agua.

En un acuífero puede mermar la cantidad de agua almacenada debido a extracciones excesivas o aumentar debido a recargas extraordinarias. El rendimiento seguro no se altera, sino que lo que disminuye es la capacidad de producción adicional con cada nueva extracción.

Un acuífero puede contaminarse en su parte inferior, o en zonas de poca producción (ya que la porosidad no es uniforme), sin afectar su rendimiento seguro.

El concepto de rendimiento seguro o “sustentable” es entonces uno dinámico que consiste de una evaluación integral del sistema hidrológico. Esto significa una evaluación sistemática de los siguientes elementos o parámetros que afectan la producción en un acuífero:

1. las condiciones climáticas a corto y largo plazo
2. efecto en los niveles de agua en los acuíferos
3. escurrimiento y almacenamiento de agua en embalses
4. usos de terrenos
5. métodos de riego
6. usos de agua: abasto público, agrícola y otros
7. transferencias de agua entre cuencas
8. tipos de cultivos
9. manejo de aguas usadas, reuso
10. aspectos socio-económicos

Para poder evaluar los cambios históricos en los niveles de agua en un acuífero, e indirectamente su capacidad residual de producción, es necesario observar el historial de extracción de agua y su efecto en los niveles freáticos durante períodos extensos. Preferiblemente debe utilizarse un período que incluya extremos en los ciclos hidrológicos, incluyendo sequías y lluvia abundante. Para esta evaluación se utilizan datos de los niveles freáticos en pozos de observación o de producción medidos a largo plazo.

En la Región Sur de Puerto Rico, existen suficientes datos para evaluar el comportamiento de los acuíferos aluviales de Guánica, Ponce, Santa Isabel y Salinas desde principios de la década de los 1990. Los niveles freáticos en pozos de observación operados por el USGS en estos acuíferos se ilustran en la Figura 10. Estos hidrogramas ilustran un descenso en los niveles de agua en estos acuíferos. Esto es indicativo de una extracción excesiva de agua en la vecindad de los pozos de observación que solamente puede percibirse una vez el deterioro ha ocurrido.

La merma en los niveles freáticos observada evidencia que las extracciones de agua exceden la recarga a estos acuíferos. Este es el concepto de minar un acuífero en exceso a su rendimiento seguro. Las únicas alternativas para alterar esta tendencia son:

- Reducir las extracciones a una cantidad menor que el rendimiento seguro, para permitir la recuperación del acuífero.
- Inducir recargas adicionales de otras fuentes de agua, incluyendo escorrentías pluviales, aguas usadas o aguas de riego.
- Eventos de lluvia intensa y extendida pudieran aumentar la recarga natural en exceso de la extracción.

La falta de planificación efectiva en el manejo de los acuíferos en la Región Sur y otras zonas en Puerto Rico, y aumentos en las necesidades de producción de agua potable por parte de la AAA, impiden al momento aplicar la primera alternativa. Si la AAA pudiera reducir en forma significativa las pérdidas de aproximadamente el 40-45 % del agua que produce, esto permitiría reducir las extracciones de agua subterránea en estos acuíferos, contribuyendo por lo menos a estabilizarlos o restaurarlos.

La alternativa de aumentar la recarga a los acuíferos de la Región Sur se evalúa al presente como parte del Plan Integral de Aguas, incluyendo un análisis del potencial de reuso de parte de las aguas usadas en la región. La AAA opera plantas de tratamiento en los municipios cercanos al Valle de Lajas, y en Ponce, Santa Isabel y Guayama, que descargan su efluente al mar. Esta agua puede utilizarse para recargar los acuíferos en cada zona, luego de llevar a cabo estudios de su viabilidad técnica, económica y ambiental. El Plan Integral de Aguas incluirá recomendaciones a estos efectos.

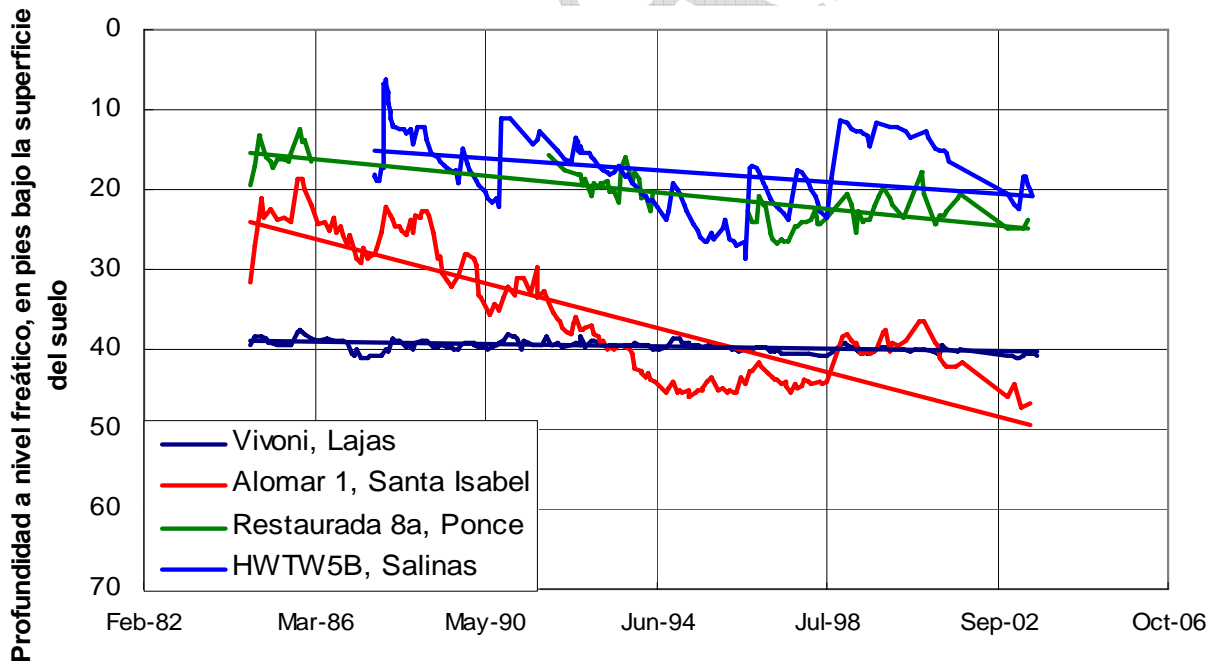


Figura 10. Niveles freáticos en pozos de observación en la Región Sur de Puerto Rico, 1984 – 2002 (USGS, 2003)

En el caso de los acuíferos de Tallaboa (Peñuelas), Guánica y Yauco (incluyendo el sistema de canales del Valle de Lajas), los estudios del USGS establecen que en la zona de Peñuelas a Guánica incluyendo San Germán se extraían aproximadamente 8.8 millones de galones por día (mgd) durante el año 2000. El rendimiento seguro disponible en esta región es del orden de 4 a 5 mgd, concentrados en el Valle de Yauco. En las zonas de los acuíferos mencionados no existen recursos de agua subterráneos adicionales disponibles.

DRAFT

4.0 Calidad de Agua

La calidad del agua se ha deteriorado con el tiempo en varias zonas de los acuíferos aluviales de la Región Sur de Puerto Rico, debido principalmente a aumentos en la salinidad. Las extracciones excesivas de agua subterránea para usos domésticos y agrícolas en la región inducen el movimiento vertical de aguas salobres hacia los pozos, resultando en aumentos en la concentración de sólidos disueltos. El exceso de sal en el agua tiene el potencial de inducir enfermedades gastrointestinales en los seres humanos y mermas en la producción de cosechas que se riegan con esta agua, particularmente cosechas de frutos verdes. Como se indicara anteriormente, existen problemas de contaminación de los acuíferos por químicos provenientes de derrames accidentales, escorrentía urbana, disposición de gallinaza, aplicación de fertilizantes y plaguicidas agrícolas, y la disposición de aguas usadas mediante pozos sépticos. En Puerto Rico más de la mitad de las residencias no cuentan con sistemas sanitarios centrales, y los pozos sépticos no se diseñan o mantienen adecuadamente para prevenir que contaminen los acuíferos.

Las zonas donde más evidentes son los aumentos en sólidos disueltos incluyen sectores del acuífero desde el Río Descalabrado a Río Jueyes (pueblos de Santa Isabel y Coamo), así como en el acuífero aluvial de Salinas. En el Valle de Lajas, los recursos de agua subterráneos son mínimos debido a sales existentes en los suelos y las rocas. Las áreas en la región que potencialmente pueden ser afectadas por problemas de aumento en la concentración de sólidos disueltos en el agua subterránea se ilustran en la Figura 11.

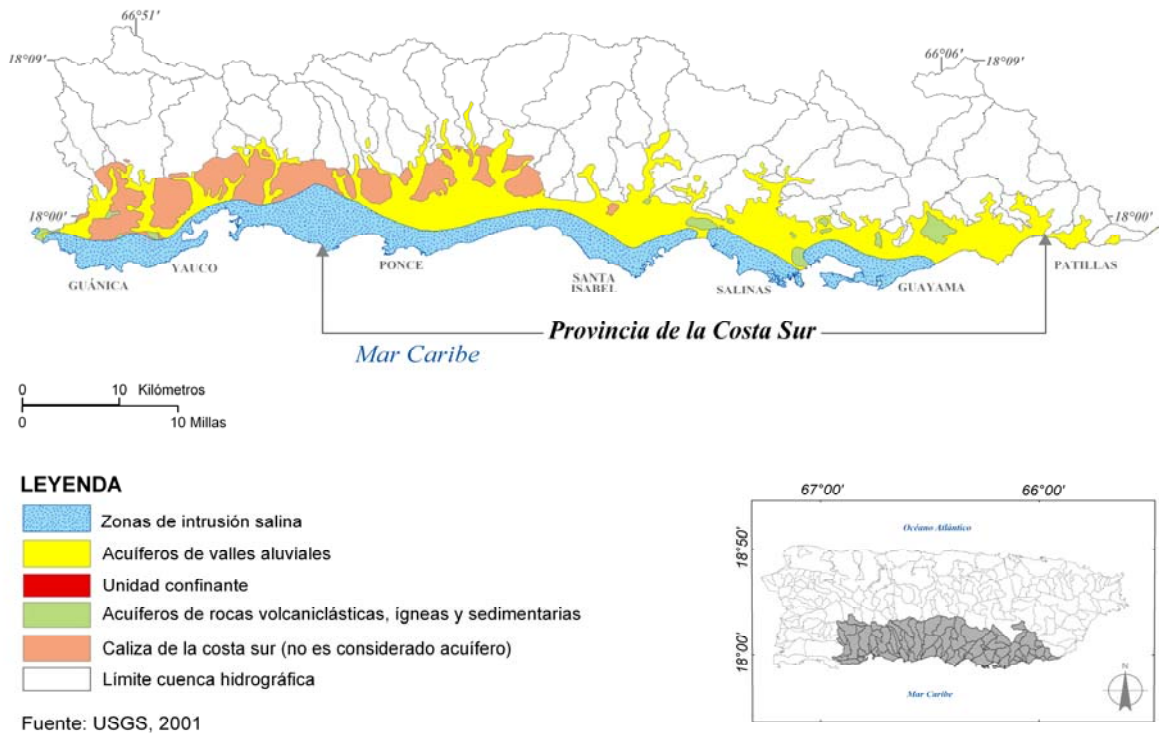


Figura 11. Extensión de interfase de agua salada en acuíferos, incluyendo áreas afectadas por sales de formación de la Región Sur de Puerto Rico que potencialmente puedan resultar en aumentos en concentración de sólidos disueltos.

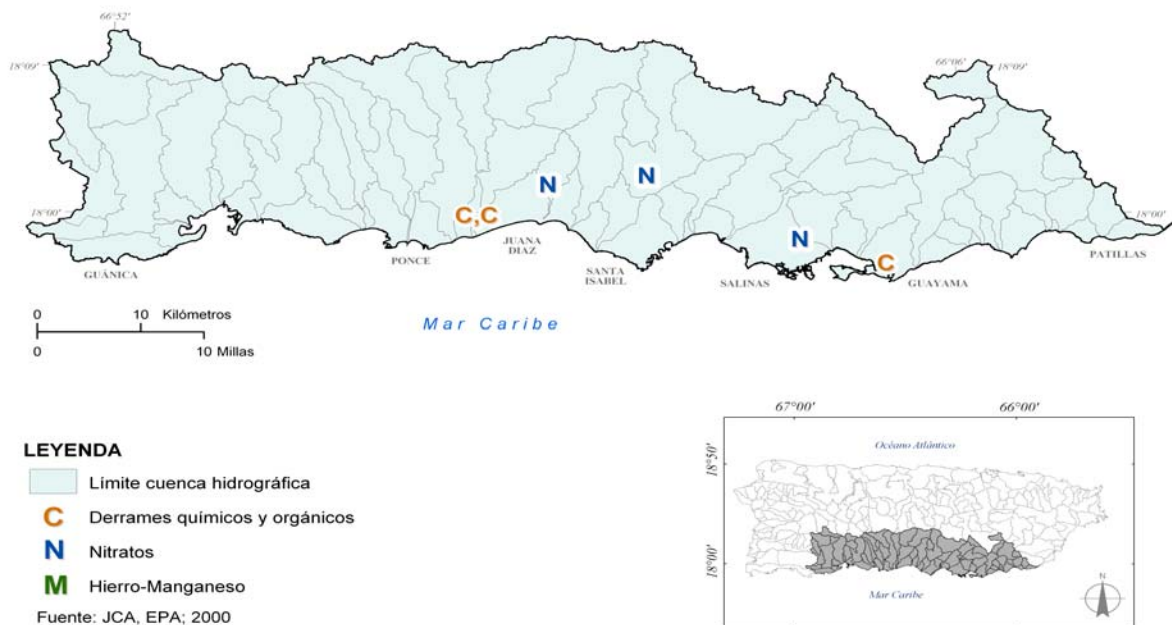


Figura 12. Áreas con problemas de contaminación en acuíferos de la Región Sur de Puerto Rico

Las áreas de los acuíferos de la Región Sur donde la contaminación con compuestos químicos es más severa incluye los sectores de Guayama y Guayanilla. En el sector de Guayama, declarado en 1988 por la EPA como un lugar de “uperhondo” solventes orgánicos carcinogénicos, incluyendo tetracloroetileno (4-TCE) y tricloroetileno (3-TCE) han forzado al abandono de pozos anteriormente utilizados para agua potable y riego. El acuífero en la zona industrial del complejo de Corco y Union Carbide, ahora en desuso, contiene contaminantes petroquímicos que impiden el uso del agua de pozos en la parte baja del valle y en sectores del valle del Río Guayanilla. Aún se desconoce el impacto de la escorrentía superficial en los recursos de agua subterránea en el perímetro de las áreas urbanas de la Región Sur. Estas áreas urbanas, sin embargo, aportan cargas concentradas de nutrientes químicos durante los primeros minutos de lluvias torrenciales que producen escorrentía. De igual forma la disposición de gallinaza y la aplicación de fertilizantes agrícolas representa un problema de contaminación a los acuíferos aluviales del sur debido a la solubilidad de los nitratos que se disuelven en las aguas de escorrentía. Finalmente, la disposición de aguas usadas mediante pozos sépticos ha sido identificada como una fuente significativa de bacterias y nitratos a las aguas subterráneas.

5.0 Uso de Agua

El uso principal de agua en la Región Sur es el agrícola, seguido del uso público o doméstico por parte de la AAA. Los datos del USGS establecen que en el 2002, el sector agrícola utilizó aproximadamente 93 mgd de agua para riego y otras faenas agrícolas, mientras que la AAA utilizó aproximadamente 70 mgd. Es importante indicar que el uso agrícola en la costa sur ocurre esencialmente durante 150 días por año, en tandas de operación de los sistemas de 8 horas por día, 5 días a la semana. El uso doméstico ocurre todo el tiempo, es decir, aproximadamente 350 días al año, 7 días por semana, 24 horas por día. La diferencia en uso doméstico de 15 días sin operación se atribuye a mantenimiento de las bombas de succión y periodos de fallas en servicio eléctrico.

La producción de agua para abasto público, en la Región Sur varía con los períodos de sequía, afectando el servicio que provee la AAA. La producción de las plantas de la AAA en la Región durante la última década (1990-2000) se ilustra en la Figura 11. El uso público en el 2000 fue de aproximadamente 70 mgd. El uso incluye aproximadamente 45 mgd de aguas superficiales mediante transferencias del Distrito de Riego del Sur, y el balance de 25 mgd de pozos profundos.

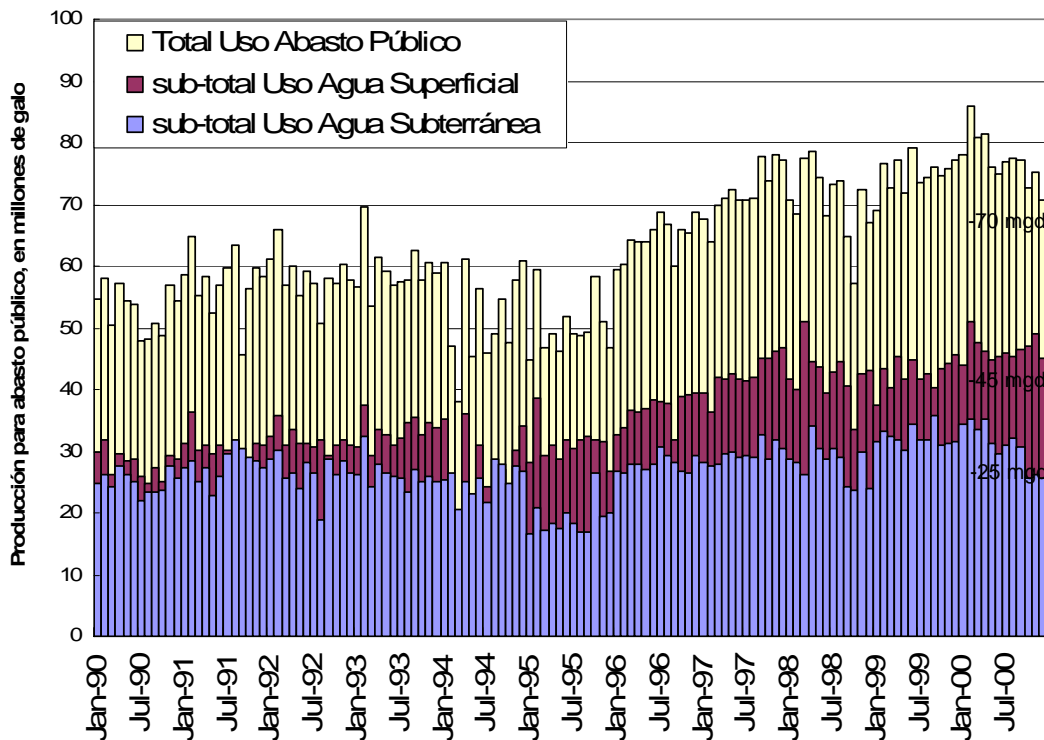


Figura 13. Producción de agua para abasto público en la Región Sur de Puerto Rico, 1990-2000 (USGS, 2003)

La información en la Figura 13 ilustra que durante periodos de sequía, la producción de agua para usos domésticos y agrícolas disminuye sustancialmente. Este efecto ha comenzado a notarse desde mediados de la década de los 1990 en el sur de Puerto Rico. Durante la sequía de 1994-95, la producción de agua de los acuíferos para uso doméstico se redujo a menos de 20 mgd. Posteriormente en el 1996 aumentó la extracción de los acuíferos hasta 28 mgd. Paralelamente se registró en este mismo periodo un aumento en el uso de aguas superficiales para abasto público de 6 mgd/año, de 30 mgd en 1995 a 48 mgd en 1998. Este aumento proviene principalmente de los embalses de Cerrillos y Toa Vaca, que suplen las plantas de filtración de la AAA en Ponce. Desde entonces la producción de agua superficial para propósitos de uso doméstico se ha mantenido en alrededor de 45 mgd en el periodo entre 1998 y el presente.

Los datos del USGS establecen sin lugar a dudas que los abastos de agua provenientes de los acuíferos y sistemas superficiales en la Región Sur no son adecuados para satisfacer las demandas y compromisos de los sectores domésticos y agrícolas. No existen recursos de agua para posibles desarrollos industriales significativos hasta que no se optimicen los sistemas existentes. Existen conflictos también con la operación de los sistemas hidroeléctricos de la AEE, que descargan agua en exceso a la que puede aprovecharse por los sectores domésticos y agrícolas debido a condiciones operacionales, principalmente falta de almacenaje del agua cruda. Es necesario implantar medidas inmediatas que conduzcan a mejorar el manejo de los recursos e agua en la Región en forma integrada. El Plan Integral de Aguas promete proveer estas estrategias.

6.0 Plantas de Filtración de la AAA

En la Región Sur operan 27 plantas de filtración propiedad de la AAA que se nutren de aguas superficiales, con una producción combinada de aproximadamente 45 mgd (USGS, 2003). El uso de agua superficial para abasto público en la región ha aumentado en un 140 por ciento en los últimos 15 años. Este aumento se debe al crecimiento poblacional en los municipios de la Región, que incrementó en un promedio de seis (6) por ciento en la última década (aproximadamente en 30,000 habitantes). La Figura 12 ilustra la localización de las plantas de filtración de la AAA en la Región .

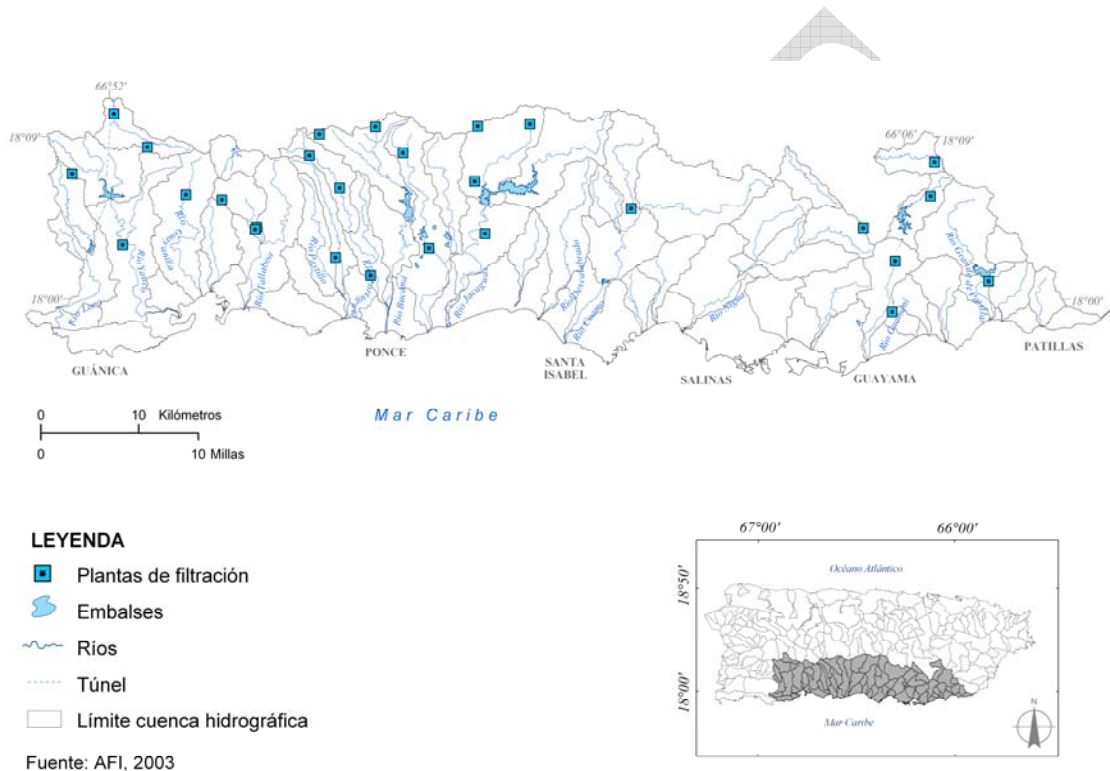


Figura 14. Ubicación de plantas de filtración en la Región Sur de Puerto Rico.

7.0 Plantas de Tratamiento de Aguas Usadas de la AAA

La AAA opera 8 plantas de tratamiento de aguas usadas con una producción combinada de aproximadamente 3.3.8 mgd (Figura 13, AAA, 2003). Estas plantas proveen tratamiento secundario, excepto por la Planta Regional de Ponce. Esta planta provee tratamiento primario a las aguas usadas generadas en la zona, y descarga el efluente primario al Mar Caribe mediante una dispensa de la EPA al requisito mínimo de tratamiento secundario. Esta dispensa se fundamenta en la Sección 301H de la Ley Federal de Agua Limpia, que permite a los estados y territorios operar plantas primarias luego de demostrar que las mismas no causan impactos ambientales adversos. La capacidad de diseño y producción actual de las plantas indicadas se ilustra en la Tabla 10.

Hasta ahora, las aguas usadas en Puerto Rico no se han considerado como un recurso reutilizable y parte importante en el balance hidrológico. Ahora, a medida que se consumen los recursos de agua más accesibles y económicos de extraer, es necesario evaluar el reuso de las aguas usadas. El DRNA, como parte del Plan Integral de Aguas evalúa varios sectores para llevar a cabo proyectos pilotos que evalúen el uso de las aguas usadas para la recarga de los acuíferos en la Región Sur. Estos proyectos incluyen los valles de Santa Isabel, Ponce y Lajas.

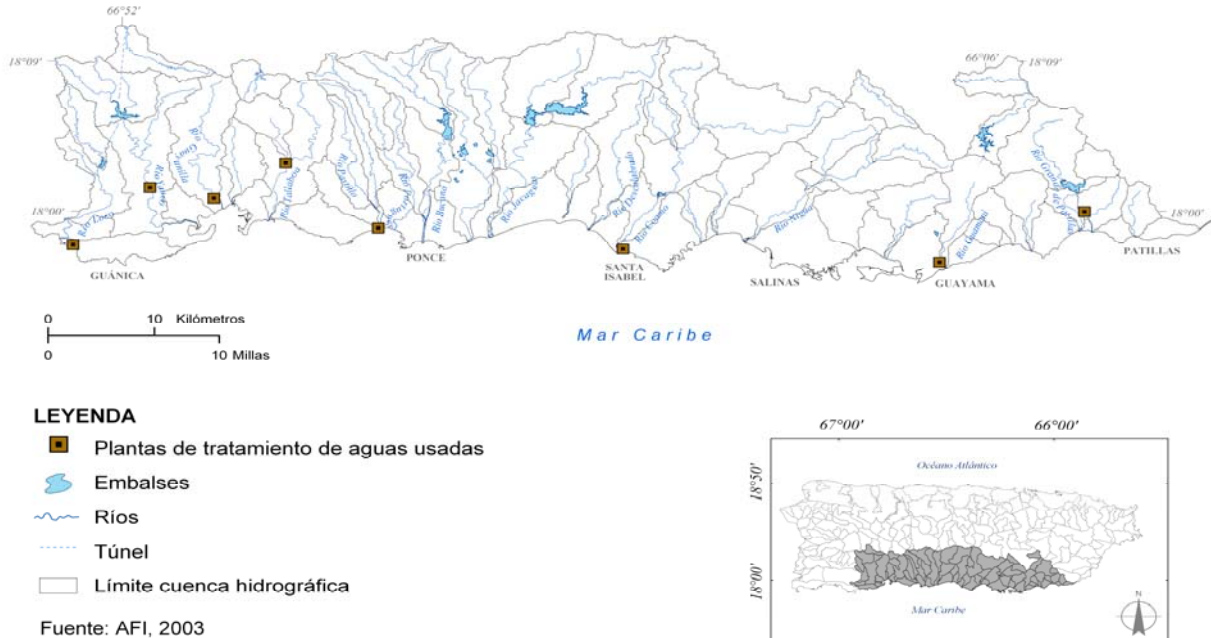


Figura 15. Ubicación de plantas de tratamiento de aguas usadas en la Región Sur de Puerto Rico, 2003

Tabla 10. Características importantes de plantas de tratamiento de aguas usadas de la Región Sur de Puerto Rico, 2003

<i>Plantas de Tratamiento de Aguas Usadas</i>				
Municipio	Nombre de Facilidad	Tipo de Tratamiento	Capacidad de Diseño (mgd)^a	Efluente
Guánica	Guánica	Secundario Lodos Activados	0.80	Bahía de Guánica
Guayama	Guayama Regional	Secundario Biofiltración	10.00	Mar Caribe
Guayanilla	Guayanilla	Secundario Biofiltración y Lodos Activados	0.62	Río Guayanilla
Patillas	Patillas	Secundario RBC	1.10	Río Chico
Peñuelas	Peñuelas	Secundario Lodos Activados	0.75	Ríos Guayanés y Tallaboa
Ponce	Ponce	Primario	18.00	Mar Caribe
Santa Isabel	Santa Isabel Regional	Secundario Biofiltración	1.50	Mar Caribe
Yauco	Yauco	Secundario Biofiltración y Lodos Activados	1.068	Río Coayuco

mgd - millones de galones por día
a - Autoridad de Acueductos y Alcantarillados

DRAFT

8.0 Sinopsis de la Situación de los Acuíferos en la Región Sur y Medidas Potenciales para la Conservación de las Aguas Subterráneas

El análisis anterior de las condiciones físicas, hidrológicas y de uso de agua en la Región Sur de Puerto Rico revelan lo siguiente:

No existe un llamado “Gran Acuífero del Sur”, ni interconexiones entre los valles aluviales que forman los acuíferos de la Región. Existen una serie de valles aluviales que forman acuíferos locales con características únicas de cada zona. En cada acuífero varían sus características, incluyendo la porosidad, el espesor de los materiales y la capacidad de producir agua.

Los acuíferos de la Región Sur son extensos y altamente productivos con una capacidad relativamente alta de producción de agua. Se estima que su rendimiento seguro combinado incluyendo las zonas desde Patillas hasta Ponce es de aproximadamente 60 mgd. La extracción actual es de aproximadamente 50 mgd.

Existen varios acuíferos locales donde las extracciones han excedido y/o exceden la recarga del acuífero, resultante en mermas sustanciales en los niveles freáticos. Esto afecta la productividad de los pozos en la zona e induce aumentos en salinidad en el agua. Las zonas más afectadas por exceso de bombeo son las de Guayama, Salinas, Coamo, Santa Isabel y Ponce. En estos acuíferos no se debe permitir el hincado de pozos adicionales ni extracciones en exceso de las franquicias aprobadas hasta tanto no se determine e implante una extracción renovable. Efectos menores pero también notables se han documentado en Yauco y Guánica.

Existe el potencial de extracciones menores adicionales en zonas aisladas en Guayama, Salinas y Yauco, pero en cantidades no significativas. No existen recursos de agua subterráneos sustanciales adicionales en la Región Sur excepto los que están en uso al momento. Las demandas adicionales a corto plazo de agua en la Región tendrán que satisfacerse de fuentes superficiales, incluyendo embalses y los sistemas de riego.

El control de pérdidas en el sistema de distribución de la AAA es fundamental para reducir a largo plazo las extracciones de los acuíferos de la Región y promover su recuperación.

Es necesario revisar las reglas de operación de los embalses de la AEE donde se genera electricidad, ya que existen conflictos en varias cuencas entre el uso de agua con este fin y las necesidades de los sistemas de la AAA y la agricultura. El uso prioritario de varios embalses, tales como los de Luchetti y Loco, posiblemente tenga que cambiarse para usar el agua principalmente como fuente de abastos de agua potable, reduciendo la generación hidroeléctrica.

El reuso de las aguas usadas tratadas para riego y recarga de los acuíferos en la Región Sur es una necesidad actual. Es necesario desarrollar proyectos de inmediato que inicien el reuso de las aguas usadas en beneficio de los acuíferos y otras fuentes de agua.

El sector agrícola tendrá que adoptar normas de riego más eficientes para expandirse con los recursos de agua limitados existentes.

9.0 Referencias

- Arnow, Ted, and Crooks, J.W., 1960, Public water supplies in Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Bulletin 2, 34 p.
- Bennett, G.D., 1972, Ground water along Río Bucaná at Ponce, Puerto Rico and the effects of a proposed floodway on ground-water quality: U.S. Geological Survey Water-Resources Bulletin 11, 29 p.
- Bennett, G.D., 1976, Electrical analog simulation of the aquifers along the south coast of Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report 74-4, 101 p.
- Bennett, G.D., and Giusti, E.V., 1971, Coastal ground-water flow near Ponce, Puerto Rico: in Geological Survey Research 1971, Chap. D, U.S. Geological Survey Professional Paper 750-D, p. D206-D211.
- Colón-Dieppa, Eloy, 1986, Puerto Rico surface-water resources - National Water Summary 1985: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2300, p. 399-406.
- Colón-Dieppa, Eloy, and González, J.R., 1981, Ground-water levels and chloride concentrations in alluvial aquifers on the south coast of Puerto Rico, February 1979: U.S. Geological Survey Open-File Report 81-641, 21 p.
- Colón-Dieppa, Eloy, and Quiñones-Aponte, Vicente, 1985, Estimates of 7-day, 10-year low flow at ungaged streams in Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 84-4089, 1 sheet.
- Colón-Dieppa, Eloy, and Quiñones-Márquez, Ferdinand, 1985, A reconnaissance of the water resources of the Central Guanajibo Valley, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 82-4050, 47 p.
- Crooks, J.W., Grossman, I.G., and Bogart, D.B., 1968, Water resources of the Guayanilla-Yauco area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Bulletin 5, 55 p., 7 pls.
- Dacosta, Rafael, and Gómez-Gómez, Fernando, 1987, Potentiometric surface of the alluvial aquifer and hydrologic conditions in the Guayama quadrangle, Puerto Rico, March 1986: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 87-4162, 1 sheet.
- Díaz, J.R., 1974, Coastal salinity reconnaissance and monitoring system--south coast of Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report 74-1, 28 p.
- Dopazo, Teresa, and Molina-Rivera, W.L., 1995, Estimated water use in Puerto Rico, 1988-89: U.S. Geological Survey Open-File Report 95-380, 31 p.

- Giusti, E.V., 1968, Water resources of the Juana Díaz area, Puerto Rico - A preliminary appraisal, 1966: U.S. Geological Survey Water- Resources Bulletin 8, 43 p.**
- Giusti, E.V., 1971, Water resources of the Coamo area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Bulletin 9, 31 p.**
- Glover, Lynn III, 1971, Geology of the Coamo area, Puerto Rico, and its relation to the volcanic arc-trench association: U.S. Geological Survey Professional Paper 636, 102 p., 4 pls.**
- Gómez-Gómez, Fernando, 1987, Planning report for the Caribbean Islands Regional Aquifer-System Analysis project: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 86-4074, 50 p., 3 pls.**
- Gómez-Gómez, Fernando, 1990, Hydrochemistry of the South Coastal Plain Aquifer System of Puerto Rico and its relation to surface-water recharge: in Gómez-Gómez, Fernando, Quiñones-Aponte, Vicente, and Johnson, A.I., eds., Aquifers of the Caribbean Islands, Proceedings of the International Symposium on Tropical Hydrology, San Juan, PR, July 23-27, 1990, AWRA Monograph Series no. 15, p. 57-75.**
- Gómez-Gómez, Fernando, and Heisel, J.E., 1980, Summary appraisals of the Nation's ground-water resources - Caribbean Region: U.S. Geological Survey Professional Paper 813-U, 32 p., 2 pls.**
- Gómez-Gómez, Fernando, Quiñones, Ferdinand, and López, Marisol, 1984, Public water supplies in Puerto Rico, 1983: U.S. Geological Survey Open-File Data Report 84-126, 102 p.**
- Graves, R.P., 1991, Ground-water resources in Lajas Valley, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 89-4182, 55 p.**
- Graves, R.P., 1992, Geohydrology of the Aguirre and Pozo Hondo areas, southern Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 91-4124, 43 p.**
- Grossman, I.G., 1961, Ground-water conditions in the lower Tallaboa Valley, Puerto Rico: Geological Survey Research 1961, in Short Papers in the Geologic and Hydrologic Sciences, Article 147-292, U.S. Geological Survey Professional Paper 424-C, Article 222, p. 202-203.**
- Grossman, I.G., 1962, Stratigraphy and hydrology of the Juana Díaz Formation in the Yauco area, Puerto Rico: Geological Survey Research 1962, in Short Papers in Geology, Hydrology, and Topography, Articles 120-179, U.S. Geological Survey Professional Paper 450-D, Article 137, p. 62-63.**

- Grossman, I.G., 1963, Geology of the Guánica-Guayanilla bay area, southwestern Puerto Rico: Geological Survey Research 1963, in Short Papers in Geology and Hydrology, Articles 1-59, U.S. Geological Survey Professional Paper 475-B, Article 29, p. 114-116.**
- Grossman, I.G., Bogart, D.B., Crooks, J.W., and Díaz, J.R., 1972, Water resources of the Tallaboa Valley, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Bulletin 7, 115 p.**
- Guzmán-Ríos, Senén, 1988, Hydrology and water quality of the principal springs in Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water- Resources Investigations Report 85-4269, 30 p.**
- Heisel, J.E., and González, J.R., 1976, Ground-water levels on the south coast of Puerto Rico, February 1976: U.S. Geological Survey Open-File Report 76-705, 13 p.**
- Heisel, J.E., and González, J.R., 1979, Water budget and hydraulic aspects of artificial recharge, south coast of Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 78-58, 102 p.**
- López, M.A., Colón-Dieppa, Eloy, and Cobb, E.D., 1979, Floods in Puerto Rico, magnitude and frequency: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 78-141, 68 p.**
- McClymonds, N.E., 1967, Water resources of the Guánica area, Puerto Rico - A preliminary appraisal, 1963: U.S. Geological Survey Water-Resources Bulletin 6, 43 p.**
- McClymonds, N.E., 1972, Water resources of the Ponce area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Bulletin 14, 26 p.**
- McClymonds, N.E., and Díaz, J.R., 1972, Water resources of the Jobos area, Puerto Rico - A preliminary appraisal, 1962: U.S. Geological Survey Water-Resources Bulletin 13, 32 p.**
- McClymonds, N.E., and Ward, P.E., 1966, Hydrologic characteristics of the alluvial fan near Salinas, Puerto Rico: in Geological Survey Research 1966, Chap. C, U.S. Geological Survey Professional Paper 550-C, p. 231-234.**
- McGuinness, C.L., 1946, Records of wells in Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report, 267 p.**
- McGuinness, C.L., 1948, Ground-water resources of Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report, 277 p.**
- Molina-Rivera, W.L., 1996, Ground-water use from the principal aquifers in Puerto Rico during calendar year 1990: U.S. Geological Survey Fact Sheet 188-96, 3 p.**

- Molina-Rivera, W.L., 1996, Puerto Rico water-use program: public-supply water use and wastewater disposal during 1990: U.S. Geological Survey Fact Sheet 098-96, 3 p.**
- Molina-Rivera, W.L., 1997, Accuracy of data for selected categories compiled in the Puerto Rico Water-Use Information program: U.S. Geological Survey Fact Sheet 141-96, 4 p.**
- Molina-Rivera, W.L., 1998, Estimated water use in Puerto Rico, 1995: U.S. Geological Survey Open-File Report 98-276, 28 p.**
- Molina-Rivera, W.L., and Dopazo, Teresa, 1995, Estimated water use in Puerto Rico, 1986-87: U.S. Geological Survey Open- File Report 95-358, 31 p.**
- Quiñones-Aponte, Vicente, 1986, Simulation of ground-water flow in the Río Yauco alluvial valley, Yauco, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 85-4179, 32 p.**
- Quiñones-Aponte, Vicente, and Gómez-Gómez, Fernando, 1987, Potentiometric surface of the alluvial aquifer and hydrologic conditions in the Salinas quadrangle, Puerto Rico, March 1986: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 87-4161, 1 sheet.**
- Quiñones-Aponte, Vicente, Gómez-Gómez, Fernando, and Renken, R.A., 1997, Geohydrology and simulation of ground-water flow in the Salinas to Patillas area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 95-4063, 37 p.**
- Quiñones-Márquez, Ferdinand, Gómez-Gómez, Fernando, and Zack, Allen, 1984, Puerto Rico ground-water resources - National Water Summary 1984: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2275, p. 367-372.**
- Ramos-Ginés, Orlando, 1994, Effects of changing irrigation practices on the ground-water hydrology of the Santa Isabel-Juana Díaz area, south central Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations 91-4183, 22 p.**
- Ramos-Ginés, Orlando, 1994, Hydrology, water quality, and potential alternatives for water-resources development in the Río Majada and Río Lapa basins near the Albergue Olímpico, southern Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations 91-4174, 35 p.**
- Ramos-Ginés, Orlando, 1999, Estimation of magnitude and frequency of floods for streams in Puerto Rico: new empirical models: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4142, 41 p.,**
- Renken A. R., Ward W. C., Gill, I. P., Gómez-Gómez F., Rodríguez-Martinez J, and others, 2002, Geology and Hydrogeology of the Caribbean Islands Aquifer**

System of the Commonwealth of Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands: U.S. Geological Survey Professional Paper 1419, 139 p., 5 plates.

- Rodríguez-del-Río, Félix, and Gómez-Gómez, Fernando, 1990, Potentiometric surface of the alluvial aquifer and hydrologic conditions in the Santa Isabel-Juana Díaz area, Puerto Rico, March to April 1987: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 89-4116, 1 sheet.**
- Rodríguez-del-Río, Félix, and Quiñones-Aponte, Vicente, 1990, Potentiometric surface of the principal aquifer and hydrologic conditions in the Ponce-Juana Díaz area, Puerto Rico, April to May 1987: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 89-4115, 1 sheet.**
- Rodríguez-Martínez, Jesús, 1996, Hydrogeology and ground-water/surface-water relations in the Bajura area of the municipio of Cabo Rojo, southwestern Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 95-4159, 31 p.**
- Santiago-Rivera, Luis, 1996, Low-flow characteristics at selected sites on streams in southern and western Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 95-4147, 46 p.**
- Santiago-Rivera, Luis, and Quiñones-Aponte, Vicente, 1995, Hydrology of Laguna Joyuda, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 93-4135, 26 p.**
- Soler-López, L.R., 2001, Sedimentation survey results of the principal water-supply reservoirs of Puerto Rico, in Sylva, W.F., ed.: Proceedings of the Sixth Caribbean Islands Water Resources Congress, Mayagüez, Puerto Rico, February 2001, unpaginated CD.**
- Soler-López, Luis, 1998, Sedimentation survey of Lago Guayo, Puerto Rico, October 1997: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4053, 20 p., 1 pl.**
- Soler-López, Luis, 2001, Sedimentation survey of Lago Lucchetti, Puerto Rico, March 2000: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 01-4105, 22 p., 2m pl.**
- Soler-López, Luis, and Carrasquillo, R.A., 2001, Sedimentation survey of Lago Carite, Puerto Rico, October 1999: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4235, 22 p., 1 pl.**
- Soler-López, Luis, and Webb, R.M.T., and Pérez-Blair, Francisco, 1999, Sedimentation survey of Lago Garzas, Puerto Rico, September 1996: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4143, 20 p., 2 pls.**

Soler-López, Luis, and Webb, R.M.T., and Pérez-Blair, Francisco, 1999, Sedimentation survey of Lago Patillas, Puerto Rico, April 1997: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4030, 14 p., 1 pl.

Soler-López, Luis, and Webb, R.M.T., and Pérez-Blair, Francisco, 1999, Sedimentation survey of Lago Yahuecas, Puerto Rico, March 1997: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4259, 15 p., 2 pls.

Torres-González, Sigfredo, 1989, Reconnaissance of the ground-water resources of Vieques Island, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 86-4100, 37 p.

Torres-González, Sigfredo, 1991, Compilation of ground-water level measurements obtained by the United States Geological Survey in Puerto Rico, 1958-1985: U.S. Geological Survey Open-File Data Report 88-701, 163 p.

Torres-González, Sigfredo, and Gómez-Gómez, Fernando, 1987, Potentiometric surface of the alluvial aquifer and hydrologic conditions in the Central Aguirre quadrangle, Puerto Rico, March 1986: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 87-4160, 1 sheet.

Torres-Sierra, Heriberto, and Avilés, Ada, 1986, Estimated water use in Puerto Rico, 1980-82: U.S. Geological Survey Open-File Data Report 85-557, 77 p.

Veve, T.D., and Taggart, B.E., 1996, Atlas of ground-water resources in Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 94-4198, 151 p.

Ward, P.E., and Truxes, C.S., 1964, Water wells in Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Bulletin 3, 249 p.