

2.0 Clima

El clima de Puerto Rico incluye los vientos, la temperatura y la precipitación (lluvia). Aunque la evaporación y la evapotranspiración se consideran en otra parte de este informe, son importantes componentes del clima que varían con las temperaturas, el viento y la lluvia. El clima de la Isla, particularmente la lluvia, es diverso para su extensión territorial relativamente pequeña. Esta diversidad en el clima es causada por varios factores, pero principalmente por los vientos y la geografía de la Isla, que resultan en el efecto orográfico. Este efecto resulta en lluvias intensas en las laderas de las montañas de donde proviene el viento. Las lluvias son causadas por la condensación de la humedad de origen marino en el aire a medida que se enfría al ser impulsado por los vientos hacia las cimas de las cordilleras. El efecto ocurre en todas las regiones costaneras de la Isla, aunque en menor grado en la Región Sur. En la Región Oeste, vientos provenientes del oeste crean el mismo efecto en las montañas de la zona, causando lluvias vespertinas frecuentes. La intensidad mayor del efecto orográfico es en la Región Norte, debido a que los vientos del este-noreste prevalecen sobre la Isla la mayor parte del año. El efecto en la Región Norte contribuye también a que la lluvia sea menos abundante en la Región Sur. Una vez el aire cruza por encima de la Cordillera Central hacia los valles de la Región Sur, pierde parte de su humedad al producir lluvia en las laderas del norte. El aire que desciende por las laderas de la Región Sur es más seco que el que fluye en el norte, lo que contribuye a menor lluvia. La temperatura controla estas interacciones, pero es a su vez afectada por los vientos.

Además de las interacciones del viento y temperaturas que influyen el efecto orográfico, el clima de la Isla es afectado por frentes de frío y disturbios tropicales incluyendo vaguadas, tormentas y huracanes. Estos sistemas climáticos pueden inducir lluvias de alta intensidad y larga duración, resultando en inundaciones que afectan la Isla. A continuación se resumen los mecanismos y condiciones climáticas de Puerto Rico.

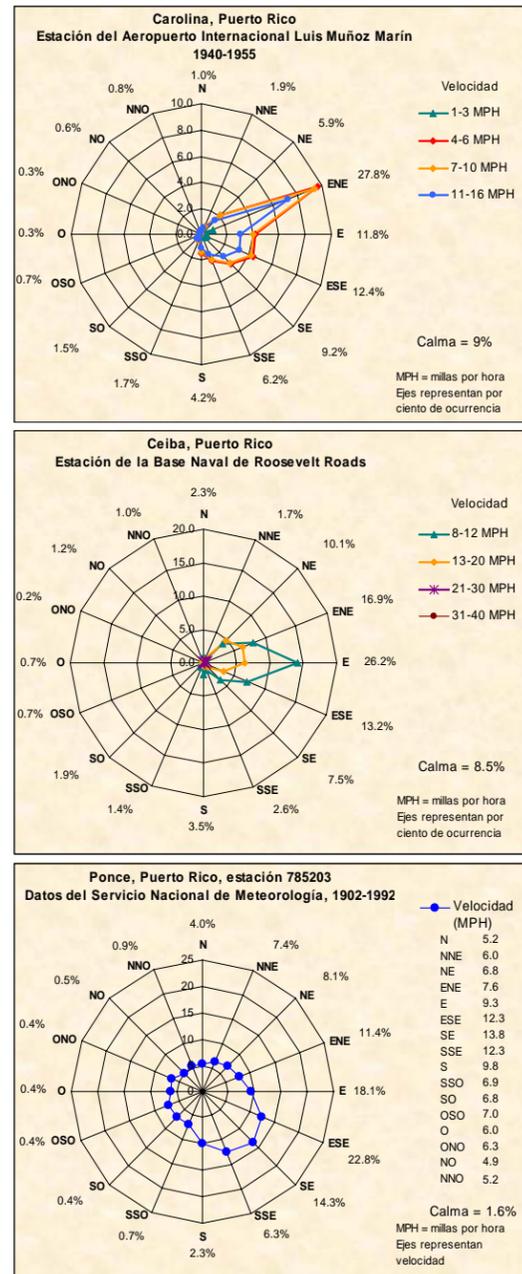
El clima de la Isla es también afectado por la deforestación y la impermeabilización de las zonas urbanas. Los bosques también contribuyen humedad a la atmósfera al transpirar agua en el proceso de fotosíntesis. Igualmente, la impermeabilización de los terrenos altera los patrones de escorrentía y de evaporación, lo que también impacta el clima. En las zonas urbanas costaneras las temperaturas son más elevadas debido a la combinación de los procesos de evaporación y ausencia de vegetación. Sin embargo, en Puerto Rico no se han llevado a cabo estudios sistemáticos que determinen con precisión el efecto de estos factores en el clima.

2.1 Vientos

Los vientos que fluyen en el Caribe y en las costas de Puerto Rico afectan el clima general y local de la Isla. El efecto principal lo ocasionan los Vientos Alisios, que fluyen primordialmente desde

el noreste hacia Puerto Rico a una velocidad que varía de 10 a 15 millas por hora (Figura 2-1). Estos vientos son quizás mejor conocidos por facilitar la travesía de Cristóbal Colón al Nuevo Mundo en 1492. Los Vientos Alisios son ocasionados por la elevación de masas de aire caliente en el Océano Atlántico cerca del ecuador, las cuales se desplazan hacia el norte, donde se enfrían y descienden hacia el mar. El aire más frío y denso ocasiona un aumento en la presión atmosférica en la zona donde desciende. Esta convección de masas de aire frío, conjuntamente con el movimiento rotacional de la Tierra, inducen corrientes de aire del noreste al suroeste desde las zonas subtropicales de altas presiones hacia las zonas tropicales de bajas presiones. Periódicamente, sistemas de alta presión cerca de las Islas Azores en el Atlántico se mueven hacia la parte central de dicho océano (hacia el sur de su posición normal), forzando cambios en la temperatura y dirección de los Vientos Alisios. Vientos más calientes y secos provenientes del sur y el sureste predominan hacia el Caribe, resultando en sequías periódicas que pueden durar varios meses, como ocurrió en el 1994. Durante esta sequía, los patrones de viento en el Caribe se alteraron por espacio de un año. En vez de acoger los Vientos Alisios más húmedos, la región del Caribe recibió vientos más secos, lo que resultó en una reducción significativa en la lluvia sobre Puerto Rico. En general, las sequías periódicas que sufre Puerto Rico se deben a estos cambios en los Vientos Alisios y ocurren en promedio cada 30 años, pero pueden ocurrir en cualquier año. La complejidad de las interacciones climáticas en el Mar Caribe y el Atlántico dificulta predecir con precisión la verdadera frecuencia de sequías o períodos de lluvia en Puerto Rico.

Además de los efectos de los Vientos Alisios, el clima de Puerto Rico es también afectado por los efectos de las brisas de mar-tierra y loma-valle. El primero de estos efectos ocurre en las zonas costaneras como resultado de la capacidad calorífica del agua (capacidad del agua de absorber calor y mantener su temperatura). Durante la mañana la tierra se calienta más rápidamente que el mar debido al calentamiento solar. El resultado es que la masa de aire sobre la tierra se eleva al calentarse, lo que induce un flujo de aire más frío y denso proveniente del mar, creando así la brisa marina matutina. Durante la noche se produce el efecto inverso aunque más débil, ya que la brisa más fría proviene de la tierra hacia el mar, debido al enfriamiento más rápido de la tierra en comparación con el mar. El efecto loma-valle es similar al mar-tierra, pero ocurre en terrenos montañosos cuando la ladera de una colina, al recibir de manera más directa la radiación solar, se calienta más rápidamente que su entorno. Esto produce una elevación de la masa de aire más caliente desde las laderas. El aire más frío en los valles se desplaza hacia las laderas, induciendo una brisa más fresca desde el valle hacia las laderas. Durante la noche el proceso se invierte, debido a que el aire sobre las laderas se enfría más rápidamente, creando una corriente ladera abajo. Estos fenómenos resultan en microclimas locales que no se reflejan en los patrones típicos de toda la Isla. Esto a su vez tiene un efecto directo en la hidrología de las cuencas, resultando en diferencias marcadas entre cuencas cercanas.



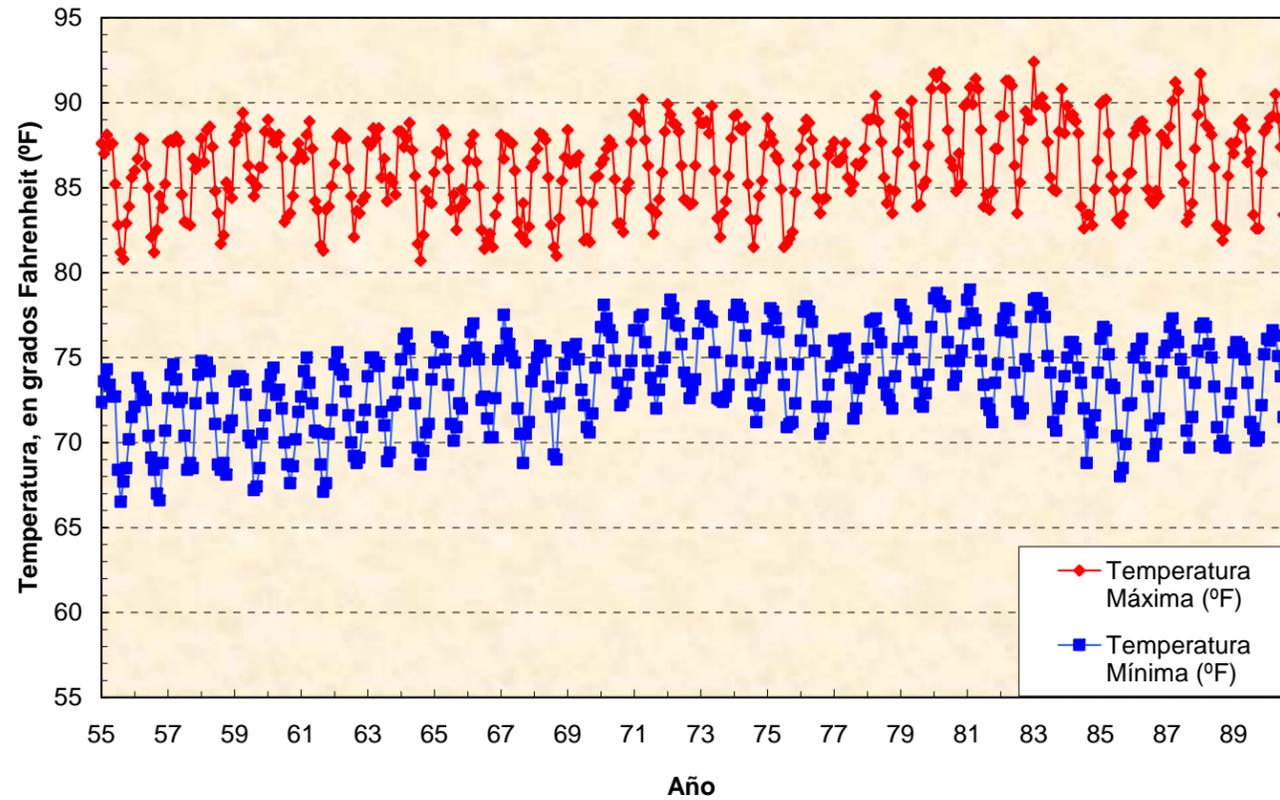
2.2 Temperatura

La temperatura atmosférica es resultante del clima sobre un área, pero a su vez afecta los cambios a corto y largo plazo en otros factores que influyen el clima. La temperatura que se observa o mide en Puerto Rico representa la elevación donde se ubican los sensores que la miden, los que varían desde el nivel del mar hasta las cimas de las montañas. El aire que fluye sobre la Isla impulsado por los Vientos Alisios mantiene temperaturas resultantes de los procesos de calentamiento por el sol y enfriamiento que ocurren en el océano, el aire y la tierra. Las temperaturas existentes en una masa de aire determinan los cambios en la temperatura de las zonas donde se desplazan. En el caso de islas montañosas como Puerto Rico, las temperaturas del aire cambian con la elevación y los procesos de condensación, evaporación y transpiración en las laderas de las montañas. La interacción de estos y otros procesos regulan la temperatura final que se observa de día a día en Puerto Rico y sus islas adyacentes.

El *NWS* es la agencia federal responsable de determinar temperaturas en estaciones meteorológicas en la Isla. En estas estaciones se determina también la precipitación diaria o continua. Separadamente, el *USGS* determina la precipitación y temperatura en algunas de sus estaciones hidrológicas en ríos y embalses. Estos datos permiten evaluar las tendencias de temperatura en la Isla en tiempo y espacio.

Los datos de temperatura atmosférica obtenidos por el *NWS* establecen que la temperatura promedio en Puerto Rico es de 82 grados Fahrenheit ($^{\circ}$ F), con una variación entre 78° y 88° F la mayor parte de los días del año (Figura 2-2). Extremos instantáneos o diarios desde 40° F hasta 102° F ocurren a través de la Isla. En general, las temperaturas son más altas en los valles costaneros que en las montañas, así como en la Región Sur en comparación con la Región Norte. Los datos históricos de temperaturas a través de la Isla sugieren que los promedios han aumentado en las regiones costaneras, siendo la Región Sur el área con registros de temperatura más elevados, seguida de las regiones costaneras Oeste, Este y Norte. Los aumentos generales en temperatura son evidentes de datos de la estación meteorológica que opera el *NWS* en el Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín en San Juan. Valores de temperaturas máximas y mínimas en dicha estación desde 1955 a 1990. El promedio de las temperaturas máximas y mínimas para esta estación meteorológica es de 86° y 74° F, respectivamente.

Figura 2-1. Distribución de los vientos en el Aeropuerto Internacional Luis Muñoz-Marín en la Zona Metropolitana, San Juan-Carolina; la antigua Base Naval de Roosevelt Roads, Ceiba y el Puerto Las Américas, Ponce (datos del Servicio Nacional de Meteorología, 1951-1960, 1980 y 1902-1992, respectivamente).



Fuente: Servicio Nacional de Meteorología, 1955-1990.

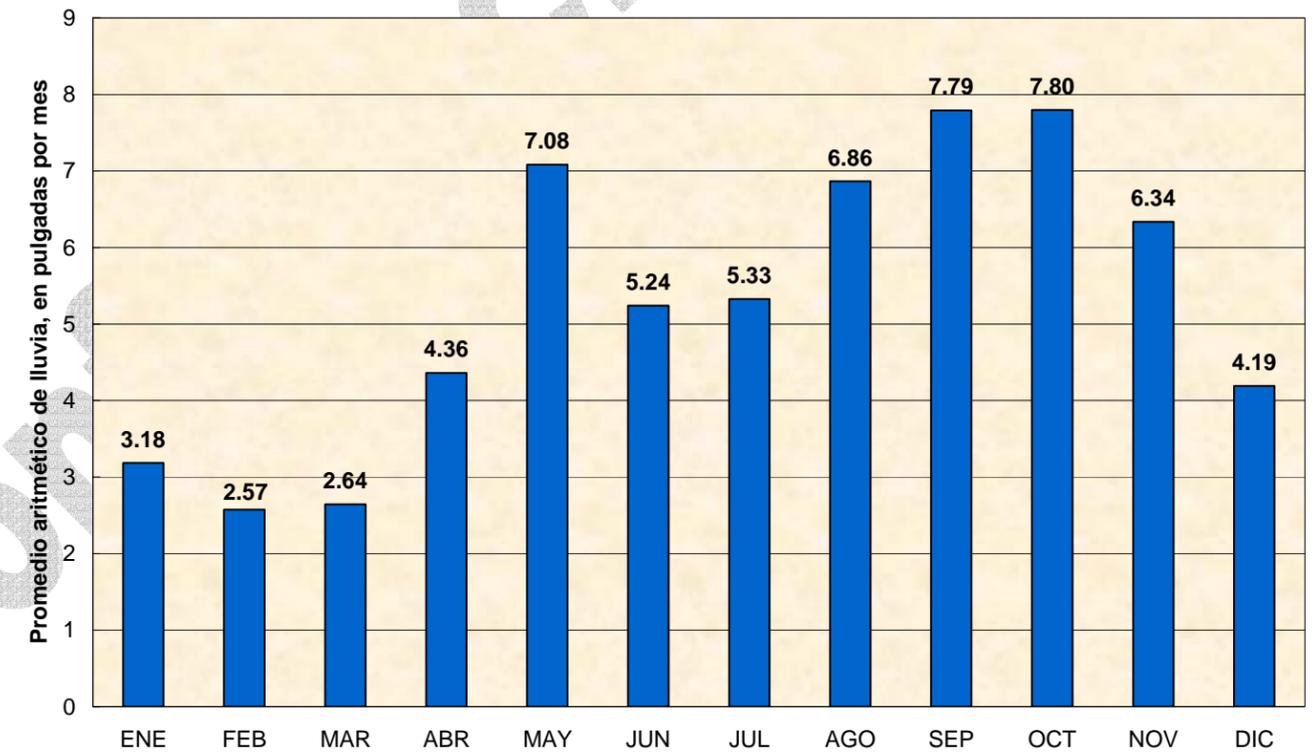
Figura 2-2..Temperaturas máximas y mínimas en el Aeropuerto Internacional Luis Muñoz-Marín en el periodo de 1955-1990.

Los aumentos aparentes en temperaturas registrados en la Isla pueden deberse a cambios globales en el clima, pero también a cambios locales causados por los efectos combinados de deforestación y urbanización. El clima de Puerto Rico es controlado primordialmente por las masas de aire marino, saturadas de humedad en su paso desde el Océano Atlántico hacia el Mar Caribe. No existen datos que permitan concluir con certeza si los aumentos en temperatura que se observan en la Isla responden a los cambios globales o locales.

2.3 Precipitación

La precipitación pluvial (lluvia) en Puerto Rico es altamente variable en su carácter temporal y espacial. Temporalmente, un periodo relativamente seco comienza generalmente en diciembre y finaliza en marzo o abril, usualmente seguido de un periodo de lluvias intensas tarde en abril y a principios de mayo. La lluvia disminuye sustancialmente en junio y julio, hasta que comienza el período tradicional húmedo de lluvias abundantes que se extiende desde agosto hasta noviembre. Estos patrones pueden variar regionalmente y anualmente, dependiendo de los

Vientos Alisios y los sistemas climáticos que afectan la Isla. En general, aproximadamente el 50 % de la lluvia anual ocurre durante este período a finales del año. La distribución mensual promedio de la lluvia en la Isla basada en datos del NWS durante los últimos 96 años se resume en la Figura 2-3.



Fuente: Servicio Nacional de Meteorología, 1900-1996.

Figura 2-3. Distribución de lluvia promedio mensual en Puerto Rico.

2.3.1 Efecto Orográfico

El efecto orográfico es significativo en Puerto Rico debido a las montañas en la parte central de la Isla que forman la Cordillera Central, la Sierra de Cayey y la Sierra de Luquillo. Estas cadenas de montañas sirven de barreras a los Vientos Alisios del noreste y causan lo que se conoce como un "umbral" o sombra de lluvia en la Región Sur. Las montañas en las cordilleras de la Isla incluyen picos con elevaciones promedio de 2,800 pies sobre el nivel del mar (snm) y máximas de hasta 4,390 pies snm, formando una barrera a los vientos. Esta barrera causa el diferencial de

precipitación entre las regiones Norte y Sur de la Isla. Mientras que en la Región Norte la precipitación promedio anual es de 70 pulgadas, en los valles costaneros de la Región Sur es de solamente 45 pulgadas al año (Calvesbert, 1970; DRNA, 2004). Esta diferencia se debe principalmente a que los vientos son predominantemente del este-noreste, y el aire húmedo se condensa en su ascenso por las laderas norte de las cordilleras. Una vez la humedad en el aire se condensa en forma de lluvia en las laderas norte, el aire más seco continúa su paso hacia el sur, desprovisto de suficiente humedad para causar lluvias equivalentes a las que ocurren en las laderas norte. Esto no quiere decir que el efecto orográfico no ocurra en la Región Sur. Cuando los vientos predominan del sur-sureste y la humedad es alta, el mismo fenómeno ocurre en las laderas sur. Las variaciones en la lluvia promedio con cambios en elevación en la Isla se resumen en la Figura 2.4 (Giusti, 1968) y la Figura 2.5. La distribución espacial de la lluvia promedio a través de Puerto Rico se ilustra en la Figura 2.6 (Calvesbert, 1984; Olcott, 1999).

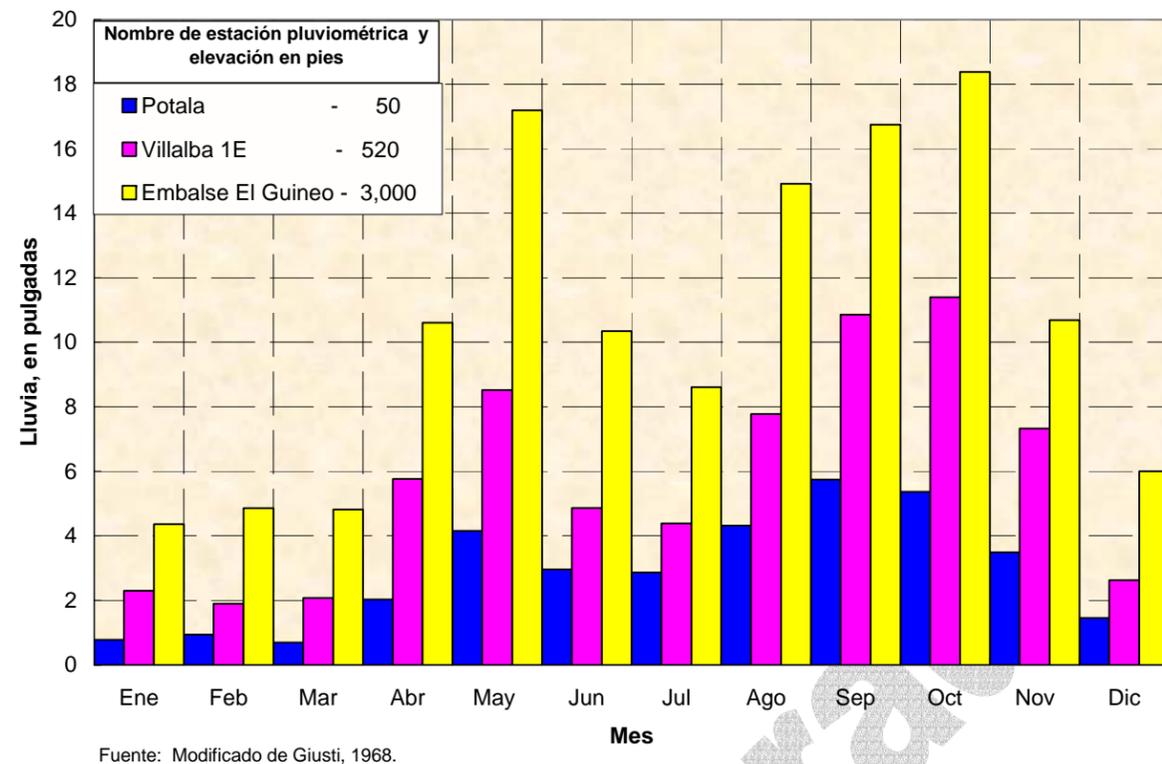


Figura 2-4. Variación en precipitación con la elevación en Puerto Rico.

Espacialmente, el efecto orográfico causa que el promedio de lluvia aumente en proporción con la elevación del terreno en la dirección de los vientos (Figura 2-5).

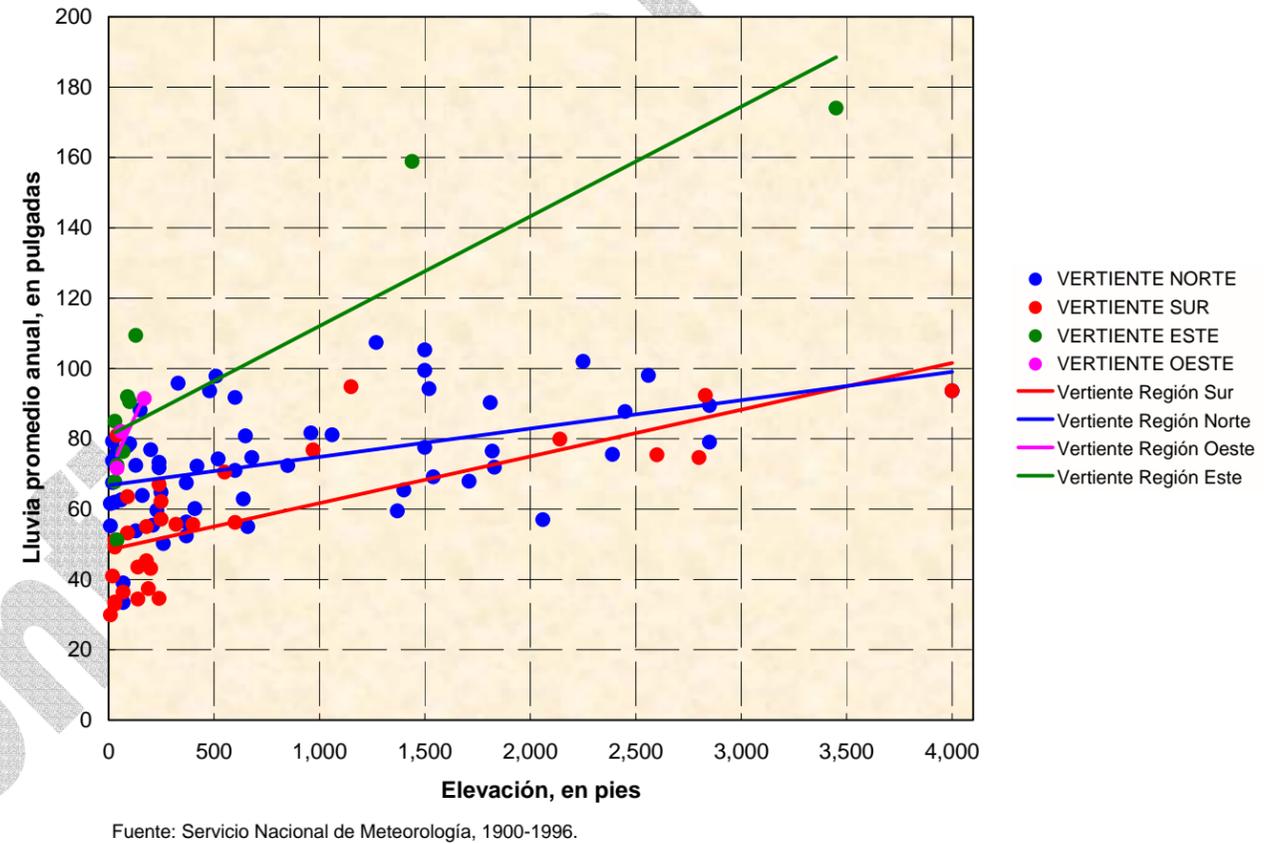
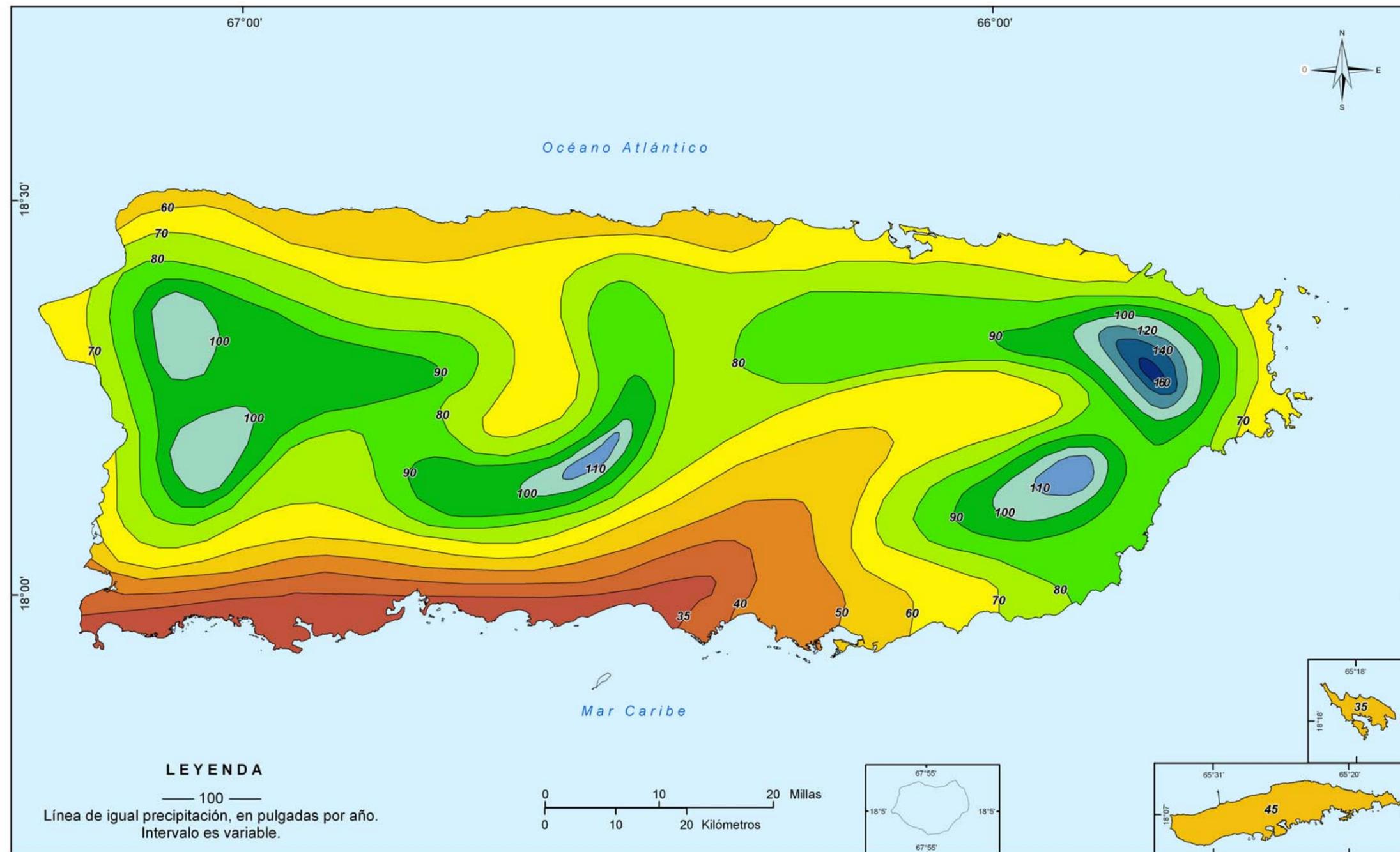


Figura 2-5. Efecto orográfico, lluvia promedio por vertientes de las cordilleras en Puerto Rico.

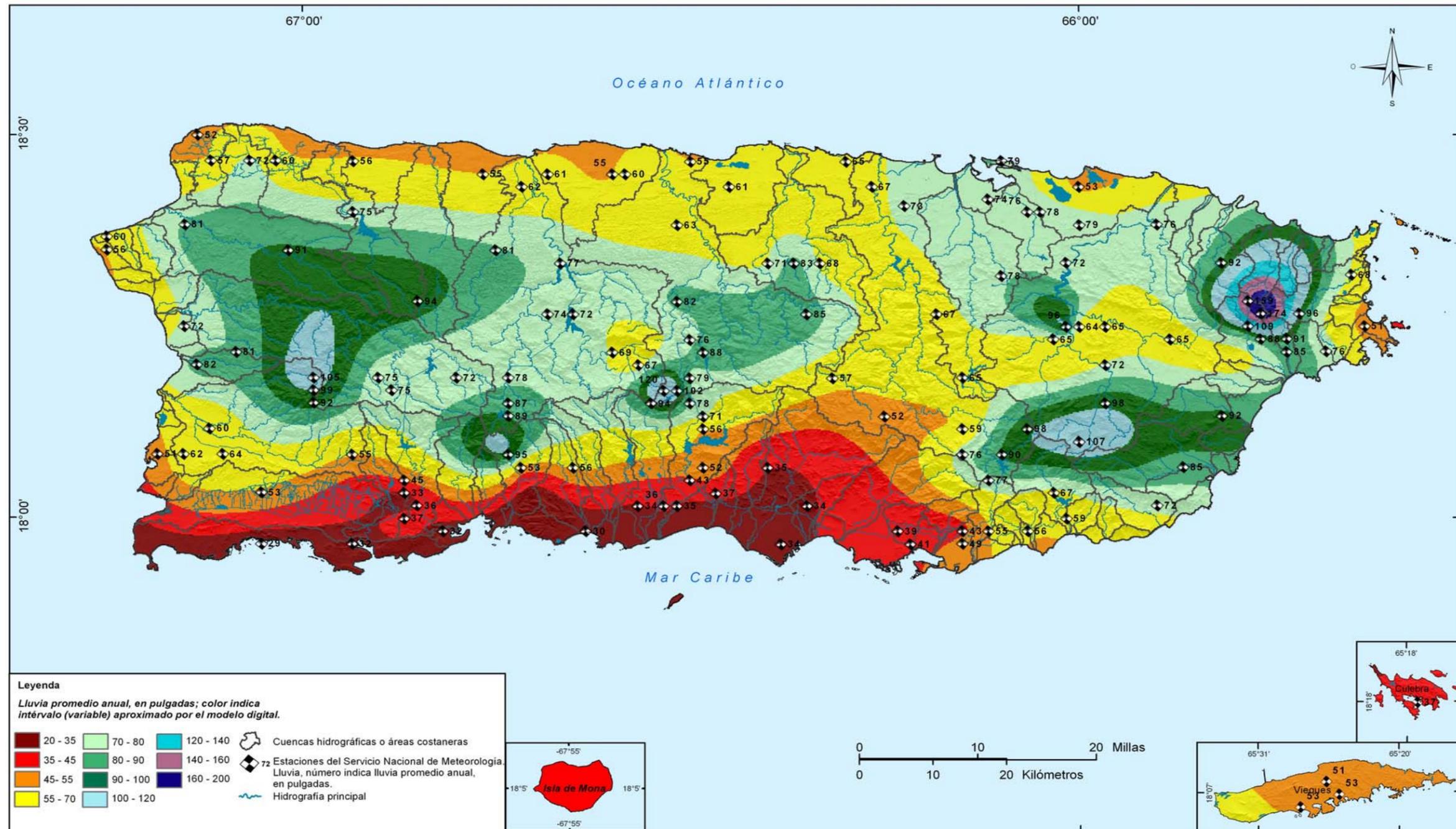
Aún cuando la lluvia en Puerto Rico aparenta ser alta comparada con otras islas del Caribe, la gran mayoría de los eventos de lluvia en la Isla son de corta duración y gran intensidad. El promedio de lluvia sobre Puerto Rico es de 69 pulgadas, basado en revisiones recientes por el DRNA de los datos del NWS entre 1900-1996. Esta lluvia equivale a un volumen de agua promedio diario de 11 billones de galones sobre las 3,363 millas cuadradas de la Isla, y es un poco menor que el volumen original del Embalse Caonillas, el de mayor capacidad en la Isla, con aproximadamente 45,100 acres pies. La distribución de la lluvia promedio a través de la Isla se ilustra en la Figura 2-7, que se basa en datos históricos promedio para cada localidad donde el NWS opera estaciones de medir precipitación diaria. La distancia entre los contornos o líneas de igual precipitación se determinó gráficamente utilizando una relación lineal entre la acumulación de estaciones cercanas y el relieve topográfico. Las estaciones de medir lluvia utilizadas en el análisis, incluyendo su localización, promedio anual de lluvia, historial de lecturas, y la precipitación máxima y mínima, se resumen en el Apéndice 10.1.



Fuente: Servicio Nacional de Meteorología, 1996

Fuente: Calvesbert, 1984, *US Geological Survey*, 2000.

Figura 2-6. Distribución de lluvia promedio en Puerto Rico (datos 1950-1980).



Fuente: Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, 2004 (datos del National Weather Service, 1900-1996).

Figura 2-7. Lluvia promedio anual en Puerto Rico e islas adyacentes basada en los datos históricos del Servicio Nacional de Meteorología obtenidos entre los años 1900 y 1996.

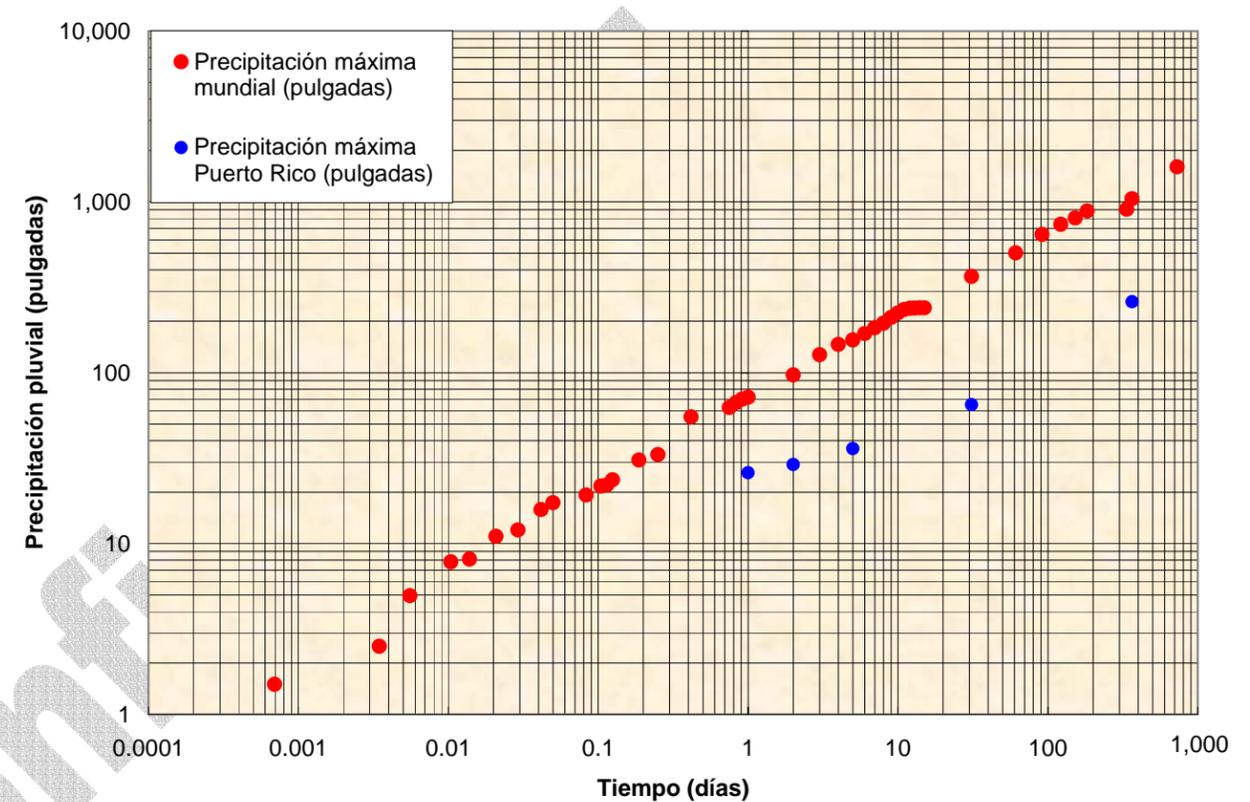
La intensidad de eventos de lluvia en Puerto Rico ha sido documentada por Calvesbert (1984), Gómez-Gómez (2003, comunicación escrita, USGS) y el NWS (Figura 2.8). Estos valores de intensidad máxima de lluvia registrada para Puerto Rico en comparación con valores récord para otros países en el mundo se ilustran en la Figura 2.8. Uno de los eventos de lluvia más extremos en el Caribe se registró en la Isla de Guadalupe, ubicada a 300 millas al sureste de Puerto Rico, donde se documentó una intensidad máxima de lluvia de 1.5 pulgadas en un lapso de un minuto. En Jamaica, a 600 millas al oeste de Puerto Rico, se registró una intensidad máxima de lluvia de 7.8 pulgadas en 15 minutos. En comparación, el evento de más intensidad registrado en Puerto Rico fue de 26 pulgadas en 1 día, registrado en la estación USGS 50025155 en el Río Saliente en Coabey cerca de Jayuya (1998).

2.3.2 Sistemas o Frentes de Frío

El clima de Puerto Rico es también afectado por frentes de frío que pueden causar lluvias de intensidad moderada pero de magnitud significativa. Estos sistemas pueden inducir inundaciones periódicas. Los frentes o sistemas fríos ocurren durante los meses de invierno en los Estados Unidos y están asociados a disturbios climáticos originados en el continente de Norte América. Estos sistemas fríos se desplazan desde el noroeste hacia el Atlántico Norte y el Mar Caribe, y usualmente inducen lluvias intensas que pueden durar varios días, usualmente acompañadas de temperaturas más frías.

2.4 Evapotranspiración

La evapotranspiración es un factor importante en el balance de agua de las cuencas hidrográficas en Puerto Rico. El término evapotranspiración incluye dos componentes: 1) evaporación del agua directamente de la superficie de ríos, embalses, lagunas y humedales debido a la radiación solar y por el viento debido a efectos de convección y 2) transpiración a la atmósfera de parte del agua que es absorbida por las plantas como parte de sus procesos de fotosíntesis. La evapotranspiración interrelaciona importantes factores naturales y climáticos como la radiación, absorción y reflexión solares y la humedad del suelo. La evapotranspiración potencial es un factor delimitante de las zonas de vida de Holdridge (Ewel y Whitmore, 1973) discutidas en el Capítulo 5 – Uso de Terrenos. En el balance hidrológico de una cuenca, la evapotranspiración es considerada como una pérdida de agua del sistema.



Fuentes: Modificado de van der Leeden, 1990; Calvesbert, 1984 y Gómez-Gómez, USGS, 2003.

Figura 2-8. Registros de intensidad máxima de lluvia para distintos intervalos de tiempo documentada en diferentes partes del mundo (1860-1990) y en Puerto Rico (1900-1996).

La evapotranspiración es uno de los mecanismos de intercambio de energía de las plantas con su medioambiente, y juega un papel importante en el clima. En el proceso de evapotranspiración del agua, las plantas utilizan energía, contribuyendo al enfriamiento general del bosque. La transpiración de vapor de agua por las plantas aumenta la saturación en la atmósfera, contribuyendo a efectos climáticos locales y la intensidad de las lluvias. Investigaciones en el Amazonas sugieren que hasta el 50 % de la precipitación media anual en su cuenca proviene de la transpiración de las plantas combinada con evaporación directa de los suelos y superficies saturadas (Daily y otros, 1997). En los bosques lluviosos tropicales tales como El Yunque en la Sierra de Luquillo, la evapotranspiración representa un componente importante del balance de agua, lo que afecta directamente la escorrentía y el potencial de infiltración a los acuíferos (Schellekens y otros, 2000). Basados en la incidencia máxima de radiación solar sobre el planeta tierra y aplicando esta energía exclusivamente a la evaporación del agua, la utilización de esta energía rinde una evaporación máxima de cerca de 160 pulgadas por año.

El componente de evaporación en Puerto Rico es influenciado por una serie de factores naturales y culturales, incluyendo:

- Radiación solar, como fuente de energía para que se facilite el proceso de evaporación
- Deficiencia en la humedad (hidrométrica)
- Temperatura del ambiente
- Dirección y magnitud del viento
- Presión atmosférica
- Pureza del agua
- Espesor de la zona capilar en el subsuelo
- Cercanía del manto freático formado por el agua subterránea
- Cubierta vegetal

La transpiración es el proceso físico-biológico por medio del cual las plantas emiten a la atmósfera vapor de agua resultante del metabolismo que llevan a cabo en el proceso de fotosíntesis. La oxidación del carbono orgánico en el proceso de fotosíntesis produce agua que es eliminada a través de las hojas y tallos de las plantas (Custodio y Llamas, 1992). Este proceso incluye en una forma más amplia el agua de condensación o rocío así como el agua que la planta requiere en su crecimiento natural. La transpiración es afectada por los siguientes factores:

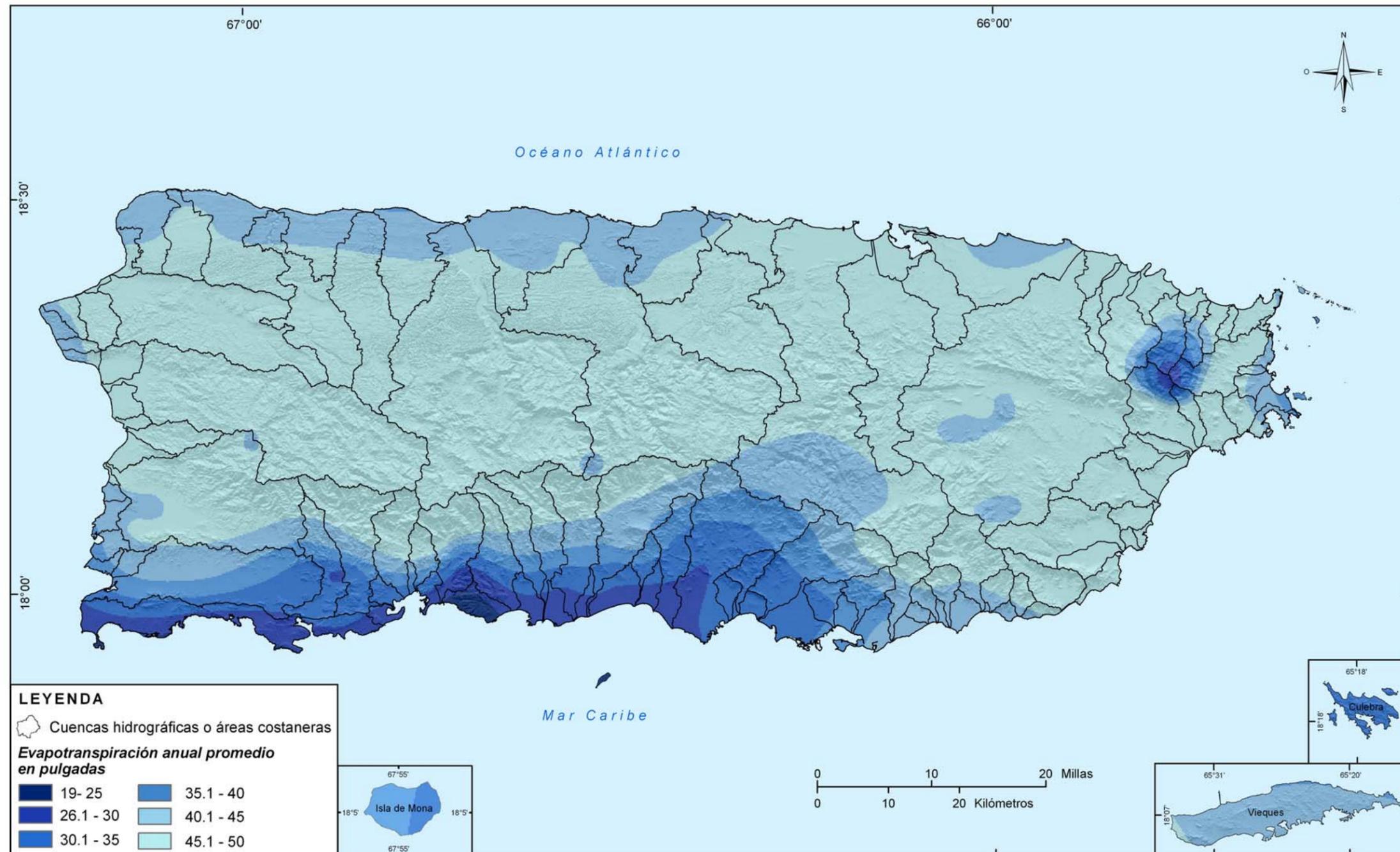
- Iluminación
- Temperatura
- Humedad relativa del aire
- Humedad relativa del suelo
- Especie vegetal
- Edad, desarrollo, tipo de follaje y profundidad radicular (de las raíces).

La evapotranspiración en Puerto Rico varía con la ubicación de las cuencas, la precipitación, la escorrentía y la elevación del terreno. Giusti (1978) desarrolló una relación para estimar la evapotranspiración en cualquier cuenca en Puerto Rico utilizando la escorrentía, la lluvia y la elevación de la cuenca. El método de Giusti relaciona la razón de evaporación potencial a evaporación actual promedio mediante un balance de masas y observaciones de evaporación máxima para evaporímetros tipo estanques Clase A. Los estimados de Giusti coinciden con los métodos empíricos sugeridos por Custodio y Llamas (1992), quienes indican que en las áreas tropicales húmedas la evaporación máxima es de cerca de 60 pulgadas por año. También, estos investigadores concluyeron que en áreas tropicales secas la evaporación máxima puede llegar hasta 115 pulgadas por año. La diferencia entre ambientes húmedos y secos está demarcada por aquellas áreas climáticas donde la precipitación anual pluvial en promedio es igual o menor de 50 pulgadas. Este ambiente se considera uno evaporativo seco, mayormente influenciado por una deficiencia de agua en la atmósfera. De la misma forma, si la razón de evaporación potencial

a evaporación actual es igual a uno, no existe deficiencia de agua en la atmósfera (condiciones de saturación en el aire) y por tanto se considera un ambiente evaporativo húmedo. En Puerto Rico estas condiciones ocurren cuando la precipitación pluvial promedio es igual o mayor de 96 pulgadas.

Utilizando el método de Giusti, se pueden estimar los valores específicos de evapotranspiración para lugares en cuencas en Puerto Rico donde se conoce la escorrentía de los ríos y la precipitación promedio anual. Debido al alto grado de desarrollo urbano en la Isla, las condiciones existentes incorporan complejidades al estudio de flujos o descargas mínimas (descarga o escorrentía en condiciones de estiaje). Esto impide una evaluación más precisa de la evapotranspiración, ya que la misma se deriva, según se expresó anteriormente, de un proceso de pérdidas de agua en una cuenca.

En ausencia de métodos más precisos, en el Plan de Aguas del 2004, se utilizó el método de Giusti para estimar los valores de evapotranspiración en los balances de recursos de agua que se calcularon para las cuencas principales. Los datos utilizados por Giusti (1978) para generar la relación de evapotranspiración en Puerto Rico consisten de datos de escorrentía y precipitación para varias cuencas hidrológicas durante un periodo de dos años. El periodo de datos analizados fue expandido a 10 años y la relación entre precipitación, escorrentía y evapotranspiración se mantuvo sin cambios significativos (Gómez-Gómez, Fernando, *USGS*, comunicación verbal 2003). Los resultados de los estimados se generalizaron en un mapa general de evapotranspiración para la Isla. Este mapa se ilustra en la Figura 2-9. Varios estudios de campo en Puerto Rico estimaron valores de evapotranspiración utilizando métodos empíricos validados con relación generada por Giusti. Estos se resumen en el Apéndice 10.2.



Fuente: Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, 2004.

Figura 2-9. Distribución de la evapotranspiración promedio anual en Puerto Rico.

La evapotranspiración promedio para Puerto Rico es de aproximadamente 44 pulgadas por año. Esta varía desde 40 pulgadas en los valles del sur, hasta 20 pulgadas en las áreas montañosas en el este de Puerto Rico. En general, la evapotranspiración equivale a cerca de un 64 % de la lluvia promedio aunque puede llegar hasta un 90 % en algunas áreas costaneras. Este análisis es aplicable a sistemas hidrológicos en una escala regional. Sin embargo, los datos disponibles de evapotranspiración en Puerto Rico son influenciados por la incidencia de radiación solar. Cualquier efecto termal por modificaciones del medio ambiente debe resultar insignificante cuando es comparado con la relación de evapotranspiración regionalizada.

Es importante notar que el valor de evapotranspiración potencial puede en muchas ocasiones ser mayor que la precipitación pluvial anual promedio. Esto se debe a que la evapotranspiración potencial se mide en evaporímetros de estanque tipo A y solo considera procesos de evaporación. La evapotranspiración actual es el resultado del balance de masas, donde a la precipitación pluvial se le resta la escorrentía y se obtiene por ende la evapotranspiración actual (pérdidas del sistema). Este método de aproximar la evaporación actual es exacto en condiciones de suelos de roca volcánica, donde las pérdidas por infiltración son nulas. En este ejemplo el valor de evaporación actual de 45.8 pulgadas representa el estimado más exacto e incluye evaporación y transpiración, equivalentes a un 70.5 % de la precipitación anual. La evaporación actual promediada para Puerto Rico se ilustra en la Figura 2-10.

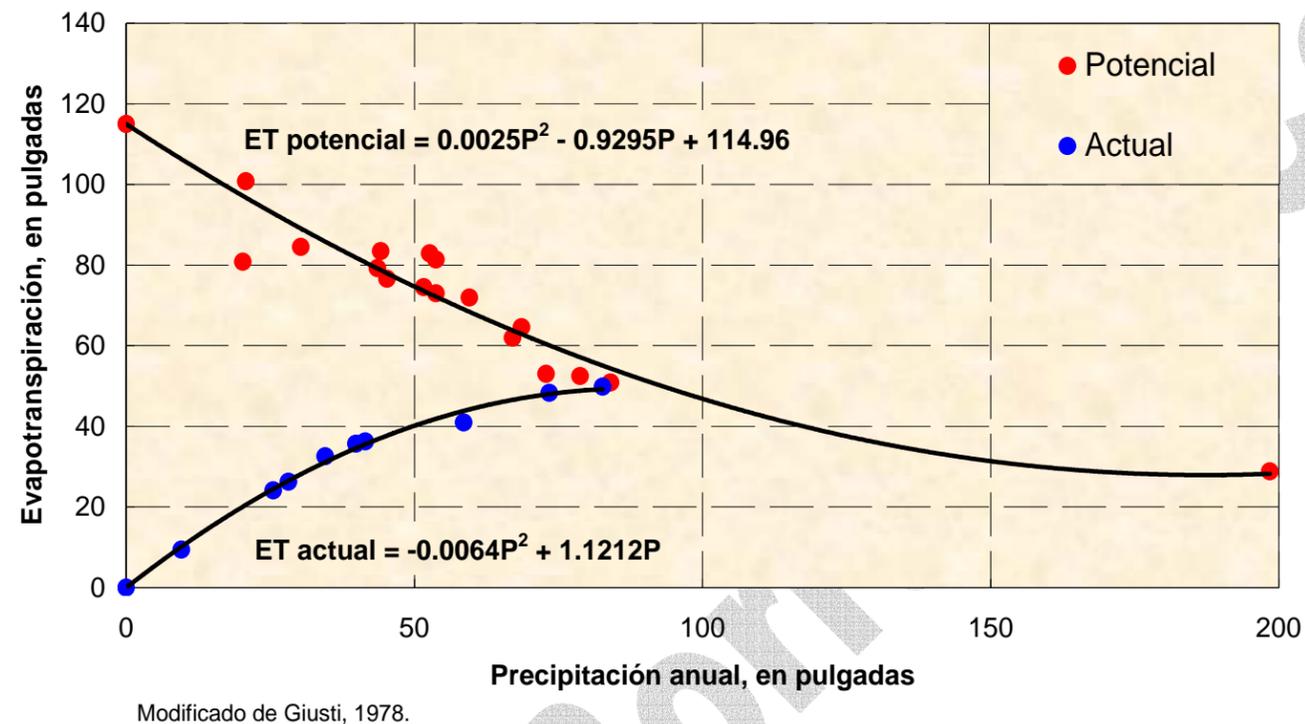


Figura 2-10. Evapotranspiración actual y potencial y su relación con la lluvia promedio anual en Puerto Rico.

Las fotos a continuación ilustran la diversidad climática de Puerto Rico. Mientras en la costa norte las lluvias intensas son comunes (Figura 2.11), en la costa sur la deficiencia de agua y pluviosidad obligan a construir tanques para su almacenaje (Figura 2.12).



Figura 2-11. La incidencia e intensidad de lluvia provoca crecidas en los ríos y manantiales en la costa norte de Puerto Rico (foto por Heriberto Torres, USGS, 1996).



Figura 2-12. Tanques de almacenamiento de agua utilizados en la región sur de Puerto Rico como resultado de deficiencia de lluvia y alta evapotranspiración (foto por Sigfredo Torres, USGS, 2001).

2.5 Huracanes

Puerto Rico se encuentra en la ruta de los huracanes tropicales en el Caribe, sufriendo en promedio los efectos directos e indirectos de un disturbio tropical cada diez años. Datos históricos establecen que desde 1502 hasta el 1989, un total de 108 huracanes o tormentas tropicales afectaron directa o indirectamente a Puerto Rico (Quiñones, 1992). Entre 1989 y el 2004, la Isla fue afectada directamente por los huracanes: Hugo (1989), Hortense (1996) y Georges (1998) y la tormenta tropical Jeanne (2004). El huracán más destructivo de la historia de Puerto Rico probablemente fue San Ciriaco, que azotó a la Isla el 8 de agosto de 1899. Dejó una secuela de 3,000 muertos y una agricultura arruinada. El huracán San Felipe II (13 de septiembre de 1928) causó la pérdida de 300 vidas y daños aproximados de \$50-85 millones (DRNA, 1980). Desde el punto de vista del agua en Puerto Rico, los huracanes generalmente generan cantidades extremas de lluvia y escorrentía, impactando en forma positiva y negativa los ríos, embalses, acuíferos y estuarios (Figura 2.13). Estos efectos se discuten en otras secciones de este informe. La trayectoria de los huracanes importantes que han afectado a Puerto Rico recientemente se ilustra en la Figura 2.14 y la precipitación causada durante el Huracán Hortense en 1996 se presenta en la Figura 2.15.

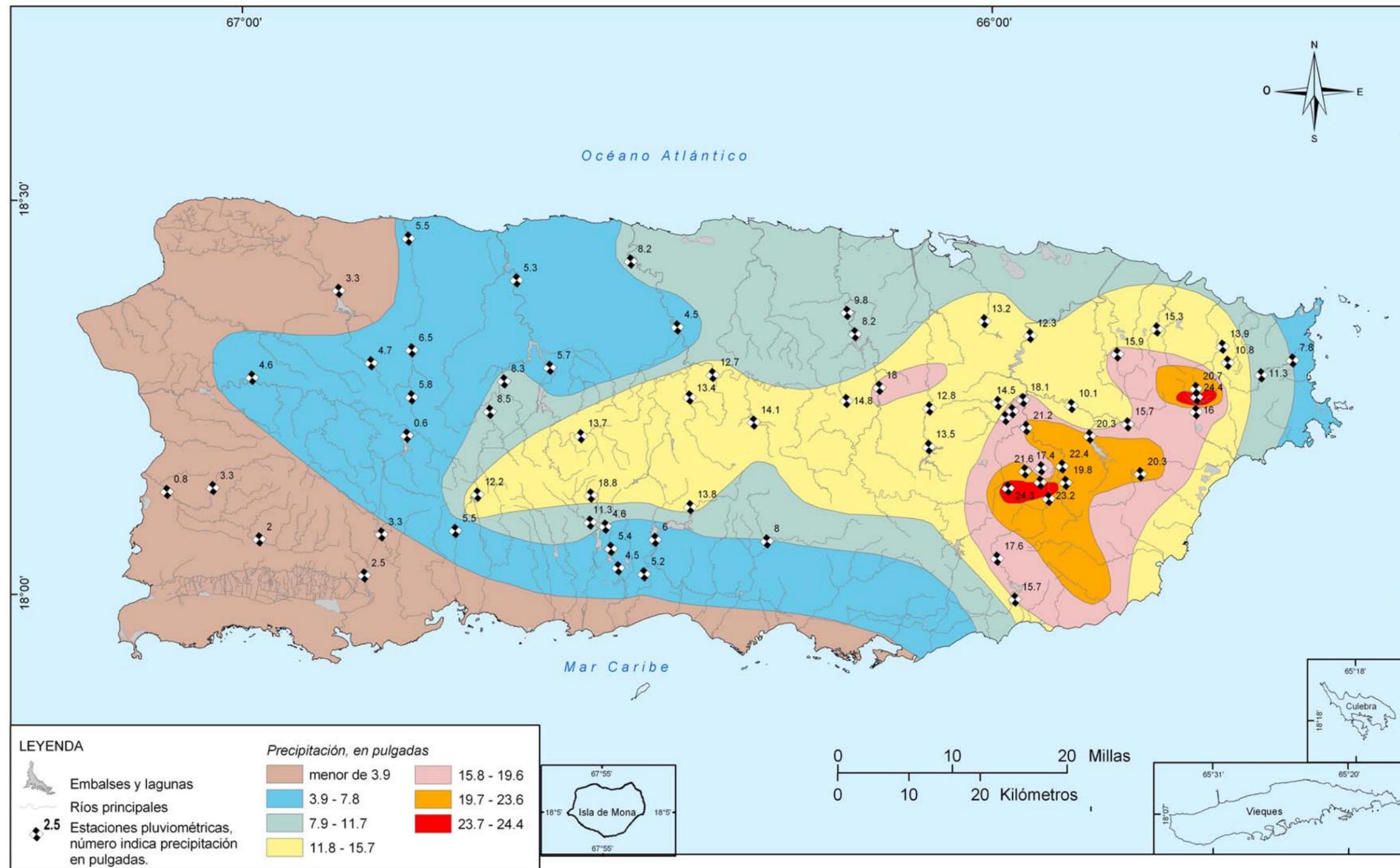
Los efectos adversos de los huracanes y de otros fenómenos climatológicos extremos como las tormentas tropicales o las vaguadas incluyen las inundaciones (ver sección 11.4) y los deslizamientos. Las inundaciones son la causa mayor de muertes y daños materiales durante eventos catastróficos climáticos, y afectan mayormente las áreas cercanas a cuerpos de agua y los valles costaneros. La Junta de Planificación de Puerto Rico (JP) y la *Federal Emergency Management Agency* (Agencia Federal para el Manejo de Emergencias o *FEMA*) preparan y publican mapas de las zonas inundables en la Isla. El *USGS* publica periódicamente mapas de inundaciones históricas en cuencas y valles específicos. Los mapas del *USGS* se basan en determinaciones en el campo de las elevaciones de la zona inundada, mientras que los mapas de la JP y *FEMA* utilizan los datos históricos del *USGS* y modelos matemáticos para estimar los niveles de inundaciones para la frecuencia de 100 años. Los deslizamientos comunes en las áreas montañosas con pendientes pronunciadas donde la precipitación anual, su frecuencia y su intensidad son altas. El deslizamiento de terreno más importante en la Isla debido a lluvias torrenciales ocurrió el 7 de octubre de 1985 en la Comunidad Mameyes en Ponce, causando la muerte a 127 personas. Aproximadamente 22 pulgadas de lluvia ocurrieron en 24 horas en las laderas al norte de Ponce, induciendo el deslizamiento al saturarse el terreno.



Figura 2-13. Las compuertas del embalse Loíza (Represa Carraízo) se abren luego de las intensas lluvias durante el Huracán Hortense, 1996 (foto por Mathew Larsen, USGS, 1996).



Figura 2-14. Trayectoria de huracanes que han afectado a Puerto Rico en los últimos 104 años.



Fuente: US Geological Survey, 1996.

Figura 2-15. Distribución de lluvia en Puerto Rico durante el Huracán Hortense el 10 de septiembre de 1996

2.6 Sequías

El clima de Puerto Rico varía a través del año, mermando la lluvia significativamente durante los meses de diciembre a abril. Estos períodos de poca lluvia son más intensos en la Región Sur debido al efecto de sombra de lluvia en las laderas del sur descrito anteriormente. Periódicamente, cambios en el clima regional limita la lluvia en los meses de abril y mayo, extendiéndose el período seco hasta agosto.

Además de estas sequías anuales, Puerto Rico sufre de sequías generales periódicas causadas por efectos climáticos regionales que afectan el clima en toda la Isla y el Caribe. Las sequías de 1934 y 1974 son representativas de estas condiciones generales de poca lluvia en la Isla y en el Caribe. La sequía de 1967 afectó principalmente la Región Sur de la Isla, mientras que la de 1994 fue principalmente en la Región Norte (Figura 2.16). Datos del NWS establecen que la sequía más severa conocida fue la de 1964, que se extendió hasta 1967. La lluvia mermó aproximadamente en un 30 % del promedio anual, lo que representó un déficit de aproximadamente 40 pulgadas en dos años. Un evento similar en tiempos modernos sería catastrófico a la Isla debido al aumento en el uso del agua, particularmente en la Zona Metropolitana de San Juan.

Las sequías pueden ser también regionales debido a las diferencias orográficas entre las cuencas. Como ejemplo, la sequía de 1998 afectó severamente la cuenca del Río Guajataca, mientras que la lluvia era abundante en otras zonas de la región central de la Isla. Más recientemente, la cuenca del Río de la Plata sufrió una sequía de varios meses a principios del 2003, mientras que cuencas adyacentes disfrutaban de lluvias normales.

El efecto que producen las sequías en la actividad económica de Puerto Rico es variable y complejo. La sequía del 1994 causó pérdidas a la economía de la Isla de aproximadamente \$300 millones, de los cuales \$165 millones fueron en la agricultura. También experimentaron pérdidas sustanciales la manufactura, la construcción y la minería, la transportación, el comercio, las finanzas y los seguros, los servicios y el Gobierno.



Figura 2-16. Condición del embalse Loíza durante la sequía de 1994 (foto cortesía del USGS, 1994).