

recarga continua que los abastece. Las fotografías 6-2 y 6-3 muestran pozos de extracción de agua subterránea utilizados para agricultura y abasto público, respectivamente.



Fotografía 6-2 y 6-3 Pozo de extracción de agua subterránea utilizado en:

- a) Arriba, sistemas de riego por goteo en el área de Santa Isabel, Puerto Rico;
- b) Abajo, abasto público en el municipio de Manatí (fotos por Sigfredo Torres, USGS, 2001)

6.6.5 Hidrografía de las Islas Adyacentes Principales

Las Islas municipios de Vieques y Culebra, y la isla de Mona forman parte de Puerto Rico. Vieques y Culebra están localizadas al este de Puerto Rico a una distancia de 7 a 12 millas de la costa, respectivamente (Figura 6-32). Vieques, conocida como la Isla Nena, es la mayor, con un área de 51 mi². El área superficial de Culebra es de 11.8 millas cuadradas. Mona ocupa un área de 21.73 mi². No existen ríos perennes en estas islas (Torres-González, 1989) y los recursos de agua subterráneos son limitados.

6.6.5.1 Vieques

La Isla de Vieques posee pequeñas laderas en dirección este-oeste con una elevación que fluctúa entre 250 y 500 pies snm. Monte Pirata, localizado en la parte oeste de Vieques es la montaña más elevada, a 988 pies snm. Aunque existen varios depósitos aluviales en las áreas costaneras del noreste, sureste y sur de la Isla, el Valle de Esperanza en la parte central-sur es considerado el más productivo. La población estimada al 2004 de esta Isla era de 9,120 habitantes (Junta de Planificación, 2003).

Vieques posee varios acuíferos relativamente productivos, con una capacidad promedio de hasta 0.7 mgd. Estos acuíferos están ubicados en las zonas de Esperanza-Colonia Lujan, Resolución y Playa Grande (Figura 6-32). En general las características hidráulicas de los acuíferos en Vieques limitan su potencial de producción de agua. En el área de Esperanza-Colonia Lujan la permeabilidad fluctúan de 0.1 a 40 pies por día, con una capacidad de producción del acuífero de aproximadamente 0.45 mgd. En el área de Resolución los valores de permeabilidad fluctúan entre 0.1 y 25 pies por día, con una producción potencial de agua subterránea de hasta 0.15 mgd (Torres-González, 1988).

El bombeo excesivo por la AAA de pozos en el área de La Esperanza en la década de 1970 resultó en intrusión salina al acuífero, afectando su rendimiento efectivo. La construcción de una línea submarina que conduce agua potable desde la PF de Naguabo (alimentada por el Río Blanco) suple aproximadamente un (1) mgd de agua potable a la población viequense desde 1977. Esta fuente reemplazó el agua subterránea que se extraía en la Isla de las zonas de Esperanza-Colonia Luján, Resolución y Playa Grande. Actualmente, estos acuíferos no son utilizados de forma continua y los pozos construidos en los mismos se mantienen en un rol de emergencia en caso de una falla en la operación de la línea submarina. Esta operación ha mantenido los niveles potenciométricos en el acuífero principal inalterados desde mediados de la década de 1980 (Figura 6-33).

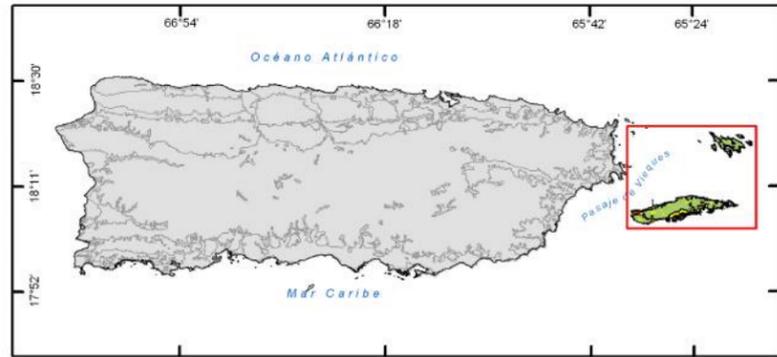
6.6.5.2 Culebra

La Isla de Culebra posee pequeñas laderas en dirección este-oeste con una elevación promedio de 300 pies sobre el nivel del mar (snm). La montaña mas elevada es el Monte Resaca, a 640 pies snm. Estas montañas separan pequeños valles aluviales, uno en el interior de la Isla y varios en las áreas costaneras. Sin embargo, estos valles son de extensión y profundidad limitada y no producen cantidades de agua subterránea considerables para pozos de abasto (Figura 6-32). El abasto de agua potable en Culebra se obtiene principalmente de la importación de agua desde Vieques mediante una línea submarina y de la producción de una planta desalinizadora operada por la AAA en la parte noreste de la Isla. La población estimada al 2004 de esta Isla era de 1,894 habitantes (JP, 2003).

Poco se conoce de las características hidráulicas de las rocas en la Isla de Culebra. La operación efectiva de solamente una decena de pozos de capacidad limitada es indicativo de la baja permeabilidad de los sedimentos, o de la poca extensión de los depósitos sedimentarios limitados por la interfase salina. El acuífero principal en Culebra ocurre en rocas fracturadas y las pequeñas formaciones que se asemejan a entradas de mar (*embayments*). Estos acuíferos volcánicos usualmente existen bajo condiciones de confinamiento local limitados en las áreas costaneras por una capa de depósitos sedimentarios relativamente impermeables (Gómez-Gómez, 1987). La producción de pozos hincados en estas zonas raras veces excede 10 gpm.

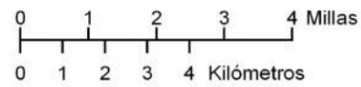
6.6.5.3 Mona

La isla de Mona ocupa un área de 21.73 mi² (Figura 6-34). La isla no cuenta con recursos de agua de importancia debido al clima y la geología. No existen quebradas ni ríos en la Isla, debido a la lluvia limitada, cuyo promedio anual es de 51 pulgadas. El clima de la isla es semi-árido y sub-tropical con temperaturas promedio desde 80° F hasta 90° F a lo largo del año, aunque durante la tarde las temperaturas pueden alcanzar hasta 115° F (SNM, 2003). Las altas temperaturas y el viento promueven tasas elevadas de ET, lo que dispone de la mayor parte de la poca lluvia que recibe Mona. Tampoco existen acuíferos de importancia, debido a su tamaño limitado y la geología. La isla es formada en una plataforma ovalada de rocas calizas, con acantilados de hasta 200 pies de elevación formando una meseta con numerosas cavernas en sus bordes. La parte más alta de la plataforma se encuentra a aproximadamente 300 pies snm (Figura 6-35). La cubierta vegetal es típica de zonas áridas, aunque en los últimos 10 años la isla ha experimentado un aumento en la reforestación. En Mona no residen habitantes permanentes, excepto empleados del DRNA en turnos rotatorios, en su mayoría biólogos y vigilantes. Las figuras 6-35 y 6-36 a continuación ilustran la topografía semi-árida de la isla y las cavernas que existen en esta isla.



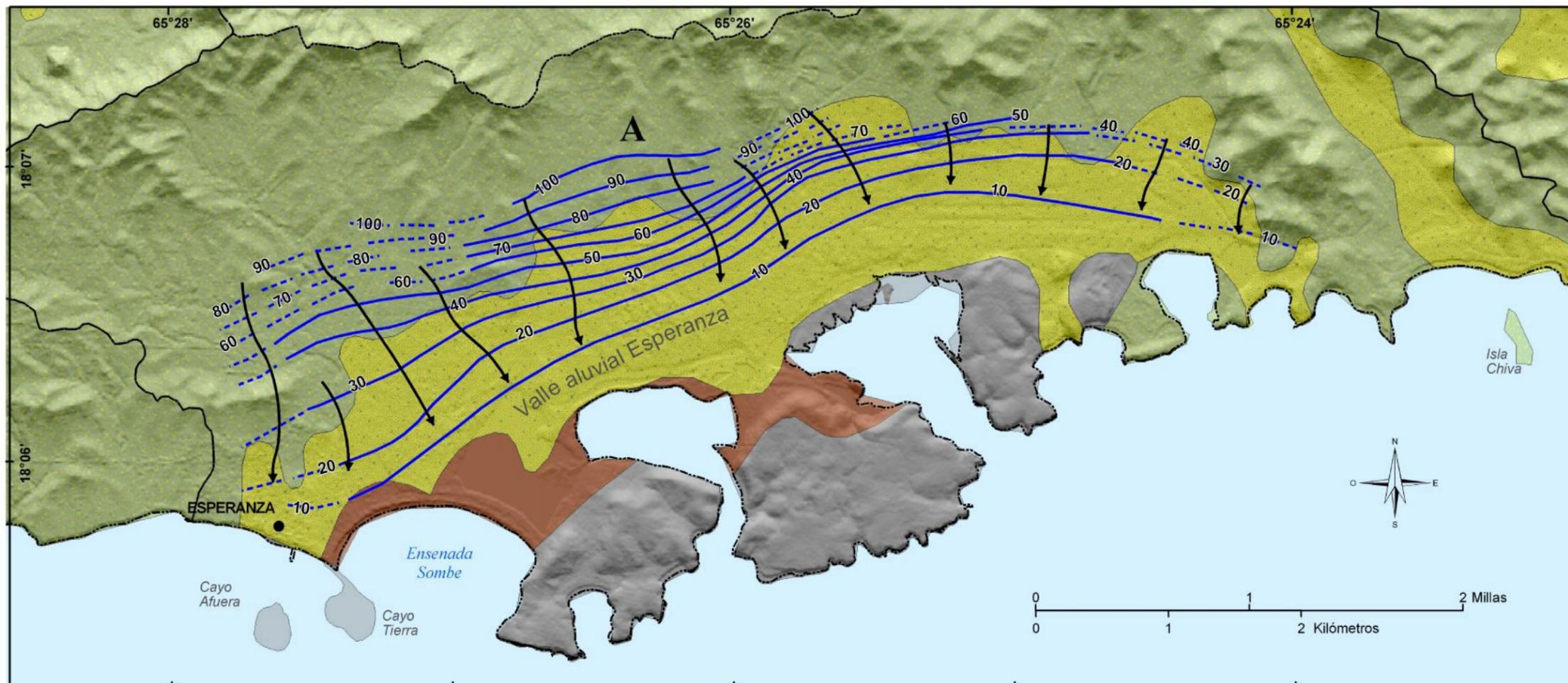
LEYENDA

- Acuíferos aluviales
- Acuíferos calizos con baja permeabilidad o agua salobre
- Acuíferos de rocas volcánicas, ígneas y sedimentarias
- Unidad confinante
- Pozos domésticos
- Pozos industriales
- Pozos agricultura



Fuente: Torres-González, USGS, 1988

Figura 6-27. Acuíferos de roca fracturada volcánicas y depósitos aluviales de Vieques-Culebra



LEYENDA

- A Mapa potenciométrico publicado para: Vieques, abril, 1983 (Torres-González, 1986)
- 20— Contorno manto freático -- Ilustra altura del acuífero no-confinado. Contorno es variable, en pies. Línea entrecortada donde se aproxima localmente. El nivel de referencia es el nivel promedio del mar.
- Dirección del movimiento de agua subterránea
- ☐ Cuencas hidrográficas o áreas costaneras

- ☐ Acuíferos aluviales
- ☐ Acuíferos calizos con baja permeabilidad o agua salobre
- ☐ Acuíferos de rocas volcánicas, ígneas y sedimentarias
- ☐ Confinamiento local, depósitos marinos y orgánicos

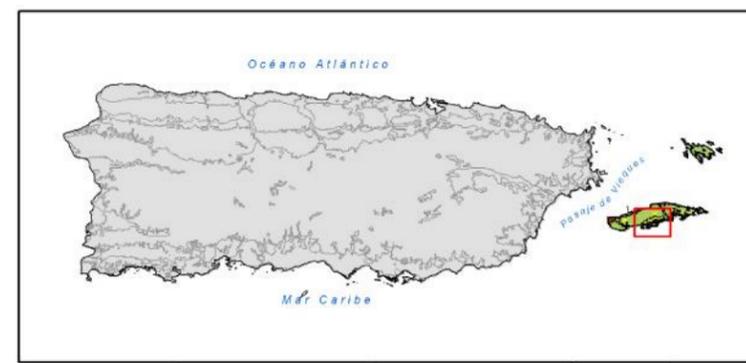


Figura 6-28. Niveles potenciométricos del acuífero aluvial de Esperanza-Colonia Luján.

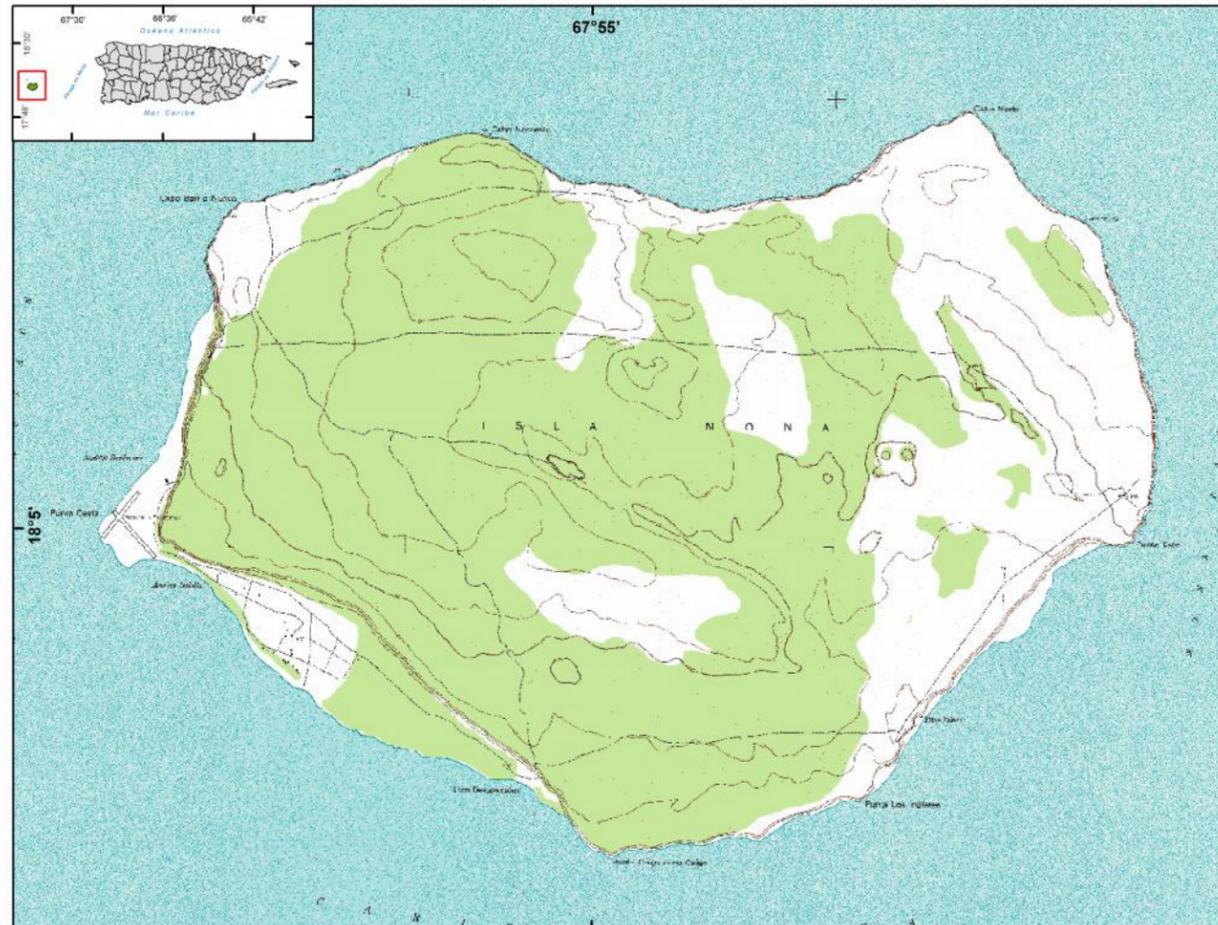
La isla de Mona ha sido comparada con las islas Galápagos debido a la existencia de varias especies únicas y en peligro de extinción, incluyendo la Iguana de Mona, el Geco Oriundo, tres (3) especies de tortugas marinas, y varias especies de aves marinas. La fauna existente utiliza el agua empozada o descargada en forma de escorrentía y drenaje natural en la periferia de la isla, en dirección al mar.



Fotografía 6-4. Vista aérea de la Isla de Mona.



Fotografía 6-5. Cavernas en la caliza de la isla de Mona.



Fuente: *US Geological Survey, 1987.*

Figura 6-29. Isla de Mona al oeste de Puerto Rico.

6.6.6 Pozos y Manantiales

En 1987 el DRNA, en colaboración con el USGS, creó y desde entonces mantiene un inventario de pozos de agua subterránea y manantiales en Puerto Rico. Este inventario es parte de un esfuerzo Nacional para documentar aquellos sitios donde se otorga un permiso de construcción y/o uso de agua subterránea. Información censal de la Isla indica que en el 1990 un total de 15,000 hogares poseían un pozo para abasto doméstico (CENSO, 1990). Hasta el año 2000, el inventario del DRNA de 1987 logró identificar cerca de 3,957 pozos construidos para usos diversos y 244 manantiales. Esta información está accesible a través de la página cibernética del USGS <http://waterdata.usgs.gov/pr/nwis/gw> donde se incluyen los requisitos mínimos de localización de cada uno de estos pozos y manantiales e información relevante de construcción, hidrogeología, calidad y producción de agua.

6.6.6.1 Inventario de pozos

Los pozos contenidos en el inventario del DRNA, conocido como el Ground-Water Site Inventory (GWSI), totalizan 3,957 y tienen diferentes propósitos y usos. De acuerdo con los expedientes actualizados a enero de 1997 y resumidos en el esfuerzo del 2000, en Puerto Rico existen en inventario un total de 373 de abasto público o de la AAA, 30 pozos utilizados para uso doméstico, 418 pozos utilizados para prácticas de riego, 7 pozos utilizados para procesos de enfriamiento, 21 pozos de abasto a las industrias, 5 pozos para uso recreacional, 347 pozos para usos agrícolas en ganadería, 6 pozos para usos en instituciones, 2,116 pozos sin usarse, 94 pozos sin clasificar y 540 pozos de observación (piezómetros) utilizados en estudios hidrogeológicos en los últimos 45 años. La Figura 6-37 ilustra la distribución de pozos y manantiales en Puerto Rico.

6.6.6.2 Manantiales

En Puerto Rico existen cientos de manantiales de agua fresca y salina, primordialmente en la Región del Karso en la Provincia de la Costa Norte y en la zona montañosa de la Provincia del Interior. Aunque la mayoría de los manantiales de agua fresca descargan cantidades limitadas de agua subterránea a la superficie, existen manantiales que mantienen un flujo constante significativo. El USGS evaluó en el 1988 los manantiales principales en la Isla (Figura 6.32), concluyendo que el flujo promedio es de aproximadamente 23.5 mgd (Guzmán, 1984). Algunos de estos manantiales son la fuente principal de agua para abasto público a comunidades rurales que operan sistemas de agua potable privados (sistemas "Non-PRASA").

Los manantiales son emanaciones de agua subterránea a la superficie debido a diferencias en el nivel hidrostático. El agua de lluvia que se infiltra al subsuelo emigra hacia los acuíferos hasta alcanzar el nivel freático. En las zonas montañosas y las laderas de la Cordillera Central de la Provincia Interior, el agua se acumula generalmente en fracturas, grietas y material poroso de origen volcánico. Estos conductos transmiten el agua de zonas de mayor nivel hidrostático hacia áreas más bajas. Una vez que la elevación del manto freático alcanza el nivel del terreno en la superficie, el agua brota o emana en forma de manantiales. En la Región del Karso, donde abundan conductos formados por la solución de las rocas calizas, el agua emana de dichos

conductos entre mogotes y en los bancos y el fondo de los ríos. Hacia los valles costaneros, cuando la elevación del manto freático en los acuíferos superficiales alcanza la superficie, los manantiales emanan en las lagunas y humedales costaneros. La Laguna Tortuguero (Vega Alta) y el Caño Tiburones (Manatí a Barceloneta) reciben aportaciones significativas de manantiales que emanan del aluvión y los afloramientos de las formaciones calizas de la Región del Karso. Los manantiales de agua fresca principales y su flujo estimado se resumen en la Tabla 6-10. Rango de flujo de manantiales principales en la Isla.

Tabla 6-1. Rango de flujo de manantiales principales en la Isla.

Número de Manantial	Nombre de Manantial	Rango de Flujo millones de galones por día (mgd)
1	Ojo de Agua cerca de Aguadilla	0.31-1.3
2	Salto Collazo cerca de San Sebastián	0.19-0.28
3	Sumbadora en los Puertos cerca de Camuy	0.15-0.37
4	Sonadora cerca de Camuy	0.19-1.55
5	Tiburón cerca de Camuy	0.19-0.46
6	San Pedro cerca de Arecibo	2.0-22.6
7	Zanja Fría en Caño Tiburones	4.7-45.2
8	La Cambija en Caño Tiburones	4.8-6.4
9	Ojo de Guillo cerca de Manatí	0.61-1.03
10	Aguas Frías cerca de Ciales	3.4-7.1
11	Represa Sonadora en Ciales	0.10-0.35
12	Ojo de Agua cerca de Morovis	0.12-0.14
13	Ojo de Agua en Vega Baja	0.27-6.08
14	Maguayo ceca de Dorado	0.26-1.1
15	Baños de Coamo cerca de Coamo ¹	0.03-0.08
16	Baños Quintanas cerca de Ponce	0.006-0.02
17	Pozo de la Virgen cerca de Sabana Grande	0-0.006

Existen también en las la Isla manantiales salinos, primordialmente en la Costa Norte. En áreas donde la elevación del terreno es menor que el nivel del mar, y la geología de los materiales permite el flujo del agua de mar tierra adentro, manantiales salinos emanan. La zona del Caño Tiburones recibe descargas significativas de varios manantiales salinos que son alimentados a través de conductos en las rocas calizas. Estos incluyen los denominados La Cambija y Zanja Fría en el Caño Tiburones (Zack, 1984). La Laguna Tortuguero también recibe el influjo de manantiales salinos de menor magnitud (Quiñones, 1978).

En la Provincia de la Costa Sur de Puerto Rico existen varios manantiales termales, incluyendo los de Coamo (Baños de Coamo) y Ponce (Quintana). Estos manantiales se alimentan de aguas que emanan de grietas que alcanzan zonas profundas en el manto terrestre. En estas zonas la

temperatura de las rocas es elevada, evaporando el agua que se infiltra desde la superficie. El vapor se eleva hacia la superficie a través de las grietas, condensándose antes de emanar en los lugares donde existen los manantiales. En el caso de los manantiales de los Baños de Coamo, estos descargan un flujo promedio diario de 40,000 galones, variando a través del año desde 32,000 a 83,000 gpd. Los manantiales Quintana esencialmente han desaparecido debido posiblemente a interferencias con la recarga que alimenta las grietas que los alimentan. La calidad del agua de los manantiales en 1988 era generalmente excelente, según documentado en el estudio del *USGS* (Guzmán, 1988), excepto por concentraciones elevadas de bacterias de

origen fecal en algunos lugares durante la época de lluvia. En estos casos, es evidente que estos manantiales reciben influjo de escorrentía superficial más rápidamente que la recarga normal a los acuíferos que los alimenta en épocas de menos lluvia. En vista de que desde 1988 no se han llevado a cabo investigaciones adicionales sobre la calidad del agua en los manantiales, es posible la misma haya cambiado. Aunque el potencial de los manantiales como fuente de agua es limitado, estos sistemas constituyen un recurso valioso que necesita conservarse y utilizarse cuando no existan fuentes alternas de agua para abasto público.

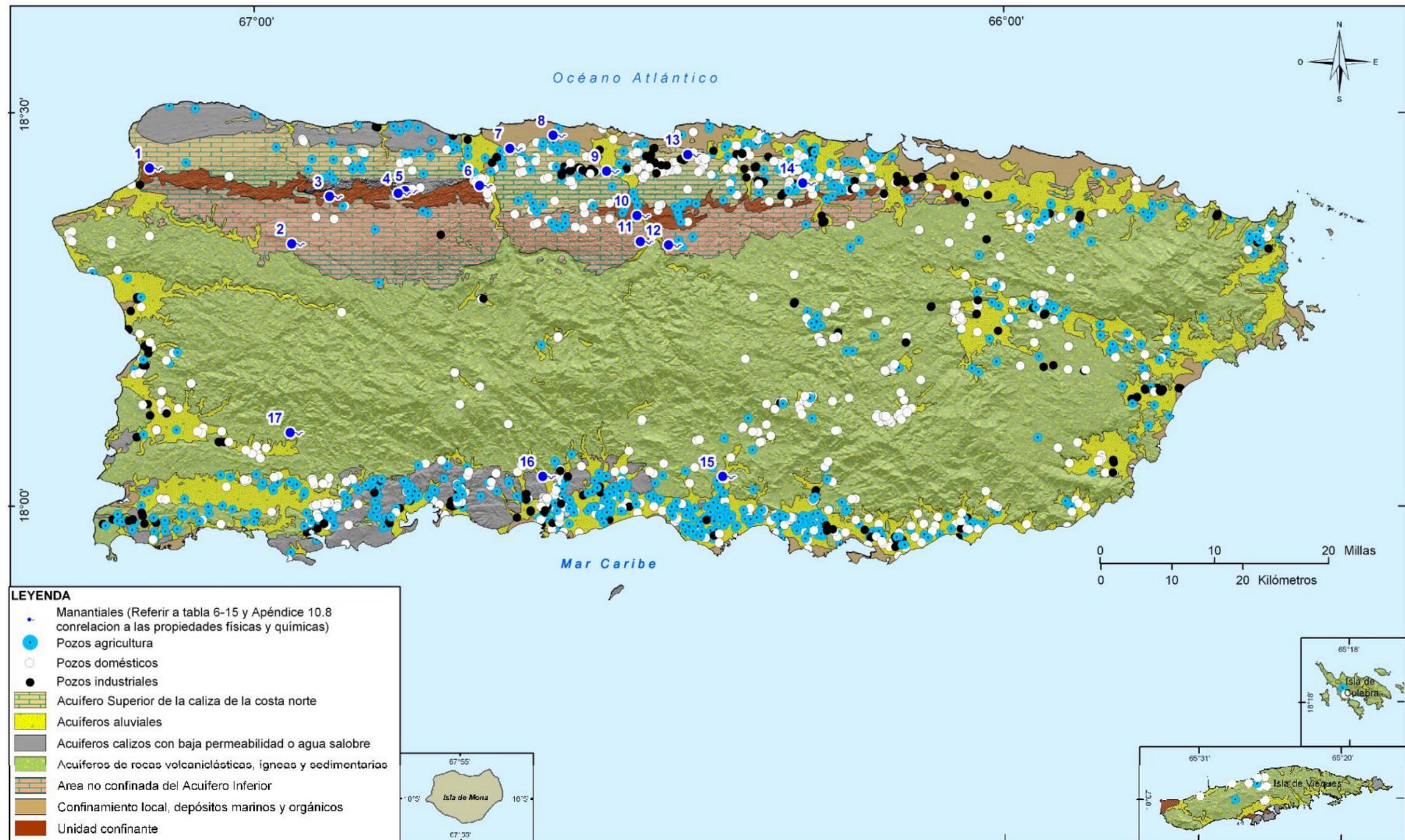


Figura 6-30. Localización de pozos de agua subterránea y manantiales en Puerto Rico [Datos inventario de pozos GWSI, 2000].

6.6.6.3 Extracciones de agua subterránea

La extracción de agua subterránea en Puerto Rico ha aumentado debido al cambio en patrones de uso desde el sector agrícola e industrial hacia el sector público. Este cambio en uso de agua subterránea se percibe cuando comparamos los patrones de uso de agua en 1960 con el presente. En 1960 el uso total de agua para abasto público era de 93 mgd comparado con 588 mgd en el 2002. De la misma forma el uso de agua subterránea ha aumentado en una condición hidrológica adversa porque la recarga a los acuíferos ha disminuido debido al cambio en uso de terrenos y la merma en la escorrentía superficial como resultado de tomas para abasto público en ríos y quebradas lo que limita su infiltración y recarga a los acuíferos.

En el 2002 la producción de agua subterránea para abasto público fue de 94 mgd, de una producción total de agua subterránea de 144 mgd. El rendimiento o producción de agua subterránea en los acuíferos de las provincias de las costas norte y sur de Puerto Rico fue determinado por el DRNA (2003) en 53 y 56 mgd, respectivamente.

La condición de los acuíferos de la Región Norte es crítica, debido a extracciones de agua excesivas en los últimos 30 años y contaminación química y salina. La producción combinada de ambos acuíferos es de aproximadamente 76 mgd, mientras que su capacidad sustentable bajo las condiciones vigentes es de aproximadamente 50-65 mgd. Sectores importantes del Acuífero Superior sufren de contaminación química, intrusión salina y mermas sustanciales de hasta 200 pies en los niveles freáticos. Decenas de pozos domésticos y agrícolas se han cerrado debido a estos efectos. El Acuífero Inferior sufre de pérdidas sustanciales en los niveles potenciométricos de hasta 235 pies y fugas de agua de alta calidad debido a roturas en las camisillas de pozos.

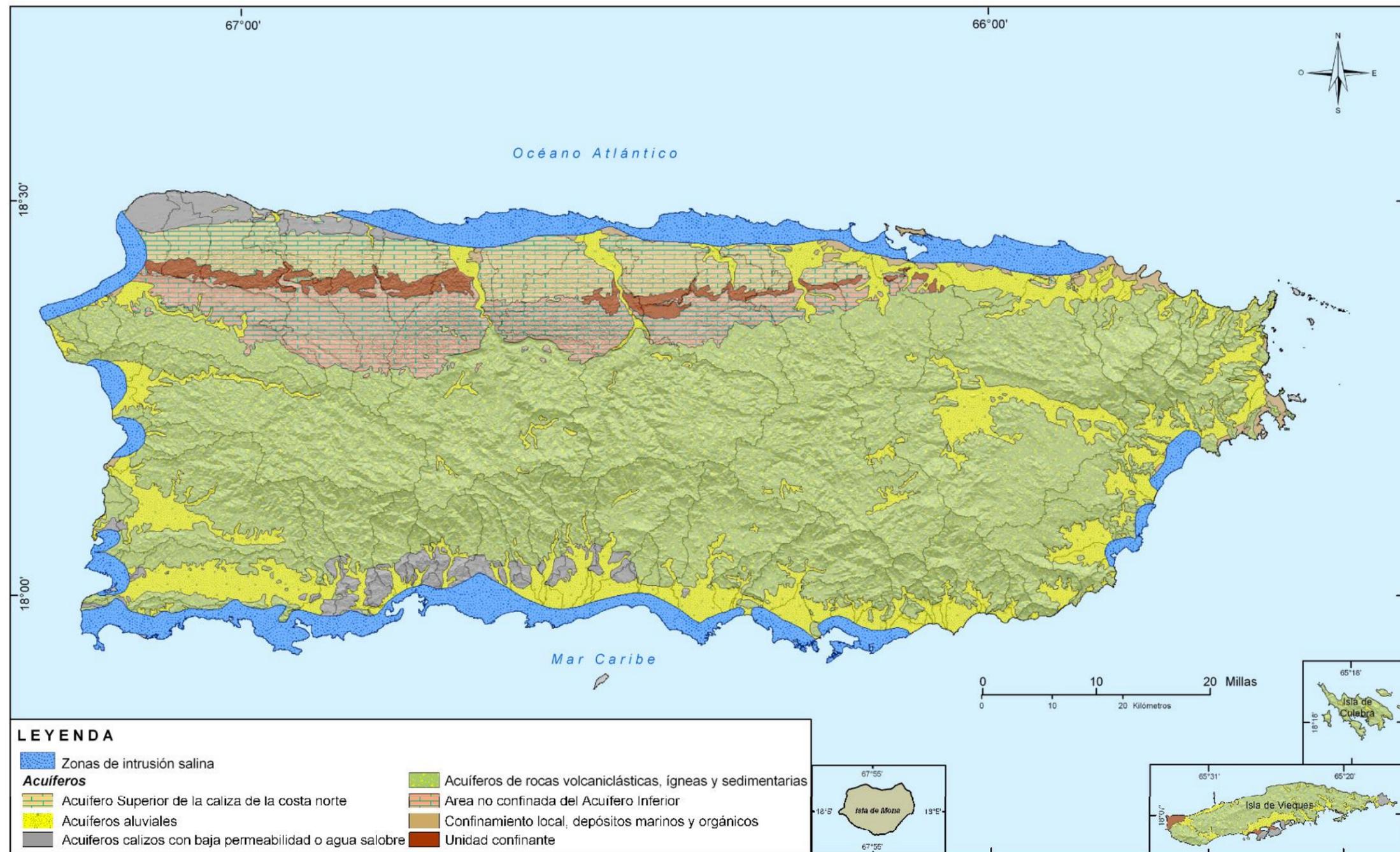
En promedio, la extracción máxima de los acuíferos de la Región Sur no debe exceder aproximadamente 60 mgd. El balance actual de producción indica que se extraen al momento aproximadamente 50 mgd. Esto no implica que exista un residual de 10 mgd, ya que en varios lugares existen focos de contaminación 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.

Las extracciones de las provincias del este, oeste e interior de Puerto Rico son limitadas como resultado de la baja permeabilidad de los acuíferos. La cercanía o limitación de los valles costaneros y la poca extensión geográfica de los depósitos porosos o fracturas de la roca hacen de estos sistemas sensitivos a escenarios de extracciones sostenidas de agua subterránea. La capacidad máxima de producción de estos acuíferos costaneros no excede los 10 mgd. Mientras tanto la Provincia del Interior posee numerosos pozos de extracción que varían entre 5-10 gpm a más de 500 gpm. Todos estos pozos están sujetos a contaminación por aguas subterráneas con altas concentraciones de nutrientes provenientes de pozos sépticos, aplicaciones de fertilizantes y desperdicios de la industria avícola y cafetalera.

6.7 Aguas Salobres y Salinas

Las aguas salinas y salobres son un recurso de gran importancia en Puerto Rico debido a su abundancia prácticamente infinitas. Para efectos de este Inventario, se definen aguas salinas aquellas que se encuentran en los lindes marítimos, o que exhiben una salinidad igual o mayor de 32 partes por mil (ppt, por sus siglas en inglés). Las aguas que exhiben una salinidad igual o menor a 32 ppt son consideradas aguas salobres, implicando que están diluidas parcialmente con agua fresca. En la práctica, para considerar la utilización del agua salobre, la salinidad no debe exceder 250 ppt. El agua fresca se considera contener un límite máximo de 1,000 mg/L de sólidos disueltos totales. En términos de sólidos disueltos totales (SDT, o TDS, por sus siglas en inglés), uno de muchos parámetros que utiliza la EPA y el DS para reglamentar la potabilidad del agua, este límite es equivalente a 500 miligramos por litro (mg/L).

Mundialmente, la desalinización de aguas salobres y salinas representa una fuente alterna de producción de agua fresca para consumo humano, riego y procesos industriales. El factor principal que limita la desalinización de agua con estos propósitos es el costo. Tradicionalmente, la desalinización de agua de mar se llevaba a cabo primordialmente por destilación, a un costo significativo debido a la energía requerida. El costo promedio de desalinización de agua de mar por destilación en las Islas Vírgenes se estima en aproximadamente \$15 por cada mil galones de agua fresca producida. En comparación, la AAA produce agua de fuentes superficiales o subterráneas a un costo de \$2 por cada mil galones. El costo de la desalinización por destilación continuará aumentando en proporción al costo del petróleo, aún cuando se utilice agua salobre como materia prima. Actualmente se producen mundialmente aproximadamente 2,000 mgd de agua fresca por destilación y sistemas de RO.



US Geological Survey, 2001.

Figura 6-31. Extensión horizontal de intrusión salina en los acuíferos costaneros de Puerto Rico.

Las reservas principales de aguas salobres en Puerto Rico se encuentran en los valles aluviales que forman los acuíferos de las regiones Norte y Sur. En estos valles, la zona de agua salobre se extiende tierra adentro hasta cerca de 4 millas (Figuras 6-38). Esto se debe a condiciones naturales y efectos del exceso de extracciones de agua de los acuíferos de estos valles. Las aguas de mar avanzan tierra adentro en proporción a los niveles hidrostáticos del manto freático y las propiedades de los acuíferos. El avance de la cuña de agua de mar (referida como “salada”) obedece a las diferencias en densidad entre el agua fresca y el agua salina o salobre. El agua salina es más densa que la fresca, con una densidad de 1.025 gramos por centímetro cúbico (g/cm^3) en comparación con 1.00 g/cm^3 para el agua fresca. El agua fresca en los acuíferos costaneros tiende a “flotar” sobre la capa de agua salina o salobre. La elevación del manto freático sobre el nivel del mar determina el espesor de la capa o lente de agua fresca en el acuífero. Esta relación es definida matemáticamente por el principio denominado “Ghyben-Herzberg”, por los científicos que lo determinaron. La ecuación matemática (6.1) que define la relación es:

$$h_s = \left(\frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \right) \times h_f \quad (6.1)$$

donde,

h_s es el espesor de la capa de agua fresca representado por la profundidad del manto freático bajo el nivel del mar,
 ρ_f es la densidad del agua fresca,
 ρ_s es la densidad del agua salina, y
 h_f es la elevación del manto freático sobre el nivel del mar

La resolución de esta ecuación establece que la capa de agua fresca en las zonas costaneras de la Isla se extiende a una elevación bajo el nivel del mar (h_s) 40 veces la altura (h_f) del manto freático sobre el nivel del mar. La implicación práctica de este principio establece la magnitud de la intrusión salina en acuíferos costaneros.

Previo al desarrollo de los acuíferos costaneros en la Isla, los niveles freáticos mantenían un equilibrio dinámico. Este equilibrio era controlado por la recarga inducida por la lluvia y la escorrentía, y las descargas naturales a manantiales, ríos, humedales y lagunas costaneras, y al mar. Debido a las propiedades de las rocas o materiales que forman los acuíferos, una cuña de agua de mar penetraba cierta distancia tierra adentro. La distancia de penetración variaba anualmente en proporción a la elevación del manto freático, lo que a su vez era controlado por la recarga y descargas naturales del acuífero. Teóricamente, por cada pie que disminuya el espesor de la capa de agua fresca en los acuíferos costaneros, la zona de mezcla entre las capas de agua fresca y salina (zona de interfase), la elevación de la capa de agua salina se eleva 40 pies. Esto varía con las propiedades del acuífero, incluyendo la porosidad, permeabilidad y conductividad hidráulica (K). Este nuevo equilibrio vertical en la posición de la interfase resulta en una penetración o avance tierra adentro de la cuña de agua salada en los acuíferos.

El análisis matemático anterior sobre la intrusión salina establece una paradoja o contradicción que por un lado sugiere que, teóricamente, la cantidad de agua salobre disponible para producción de agua potable pudiera ser infinita. Esto se debe a que la extracción de agua salobre sin alterar el espesor del lente de agua fresca, induce que agua de mar adicional penetre en los acuíferos para mantener el equilibrio dinámico antes descrito. Sin embargo, el agua fresca necesaria para mezclarse con la de mar proviene precisamente del lente de agua fresca. A menos que se reemplace mediante recarga la cantidad de agua fresca que se mezcla con el agua de mar, el espesor del lente de agua fresca se reduciría permitiendo un avance mayor de la cuña salina. Es obvio entonces que, desde el punto de vista de energía, sería más eficiente capturar en el acuífero el agua fresca antes de que se mezcle con la salina. El manejo de un acuífero mediante bombeo controlado para mantener un equilibrio preciso atado a la recarga requiere esfuerzos extraordinarios pero no es imposible.

En los acuíferos costaneros de Puerto Rico, una vez comenzó su desarrollo para el riego de caña de azúcar a principios del Siglo 20, el equilibrio natural entre las capas de agua fresca y salina se interrumpió. Los niveles freáticos comenzaron a descender en el Acuífero Llano de la Región Norte y los acuíferos aluviales de la Región Sur a medida que las extracciones de agua subterráneas en los valles costaneros comenzaron a exceder la recarga natural. La posición de la cuña de agua de mar comenzó a avanzar tierra adentro hasta alcanzar un nuevo equilibrio definido por el principio anterior. En el 2000, en el Acuífero Llano de la Región del Norte el avance tierra adentro ha logrado que la cuña de agua salada se eleve de 12 a 15 pies en la vecindad de Vega Alta, a 6 millas de la costa. Condiciones similares prevalecen desde Toa Baja hasta Barceloneta. En los acuíferos aluviales de la Región Sur, el avance de la cuña de agua de mar varía con la localización debido a las propiedades de las rocas. En el Acuífero de Patillas-Guayama, la cuña de agua salada se encuentra a 100 pies bajo tierra (en fracturas de rocas volcánicas) y ha penetrado 1.9 millas tierra adentro. Desde Salinas hasta Coamo el espesor saturado del acuífero debido a la geología local hace que aunque la cuña de agua salada se encuentre 2 millas tierra adentro, la misma se localiza a 250 pies bajo tierra. En el Acuífero de Juana Díaz-Ponce la cuña de agua salada se encuentra cerca de 200 pies bajo tierra avanzando solo una (1) milla tierra adentro. Hacia el oeste, hasta el Valle de Lajas prevalecen condiciones variables dependiendo del abanico aluvial que forme los acuíferos en cada zona, pero en general se observan avances de la cuña de agua de mar de 0.6 a 4.4 millas tierra adentro.

En la Región Sur se experimenta el mismo fenómeno de intrusión salina natural inducido por altas porosidades y tasas de transmisividad. Los acuíferos de la Región Sur son formados por depósitos aluviales de alta porosidad, donde el manto freático también exhibe pendientes relativamente bajas. Esto induce el mismo efecto que en la Región Norte, donde una cuña de agua salada penetra tierra adentro hasta varias millas en algunos sectores desde Guayama hasta la vecindad de Ponce. El exceso de extracciones de agua fresca en los acuíferos de la Región Sur ha inducido intrusión salina en sectores de Patillas hasta Ponce, pero principalmente en la zona de Guayama.

6.8 Sistemas de Riego

En Puerto Rico operan tres (3) sistemas de riego de gran importancia para suplir agua para consumo y actividades agrícolas (Figura 6-39). Los tres sistemas, operados por la AEE, incluyen:

Distrito de Riego de Isabela, en la Región Noroeste, incluyendo el Embalse de Guajataca y los canales de riego de Derivación, Isabela, Moca y Aguadilla.

Distrito de Riego del Valle de Lajas, que incluye los embalses Toro, Prieto, Yahuecas, Lucchetti y Loco, y el sistema de canales del Valle de Lajas.

Distrito de Riego de la Costa Sur, que incluye los Sub-districtos Este y Oeste. En la Región Sur-Central opera el Sub-districto Oeste, mientras que en la zona de Patillas a Salinas opera el Distrito Sub-districto Este. Incluye los canales de Guamaní Este, Guamaní Oeste, Patillas y Juana Díaz.

Actualmente estos tres (3) distritos cubren un área aproximada de 50,274 acres (Tabla 6-10). El Distrito de Riego de la Costa Sur es el más extenso, sirviendo más de la mitad de las tierras bajo riego público (27,345 acres), seguido del Distrito del Valle de Lajas (17,110 acres), mientras el menor es el Distrito de Isabela (5,820 acres). El total del área en servicio es de 50,275 acres. Aunque los distritos de riego fueron diseñados y construidos para suplir agua primordialmente para actividades agrícolas, al presente suplen una cantidad mayor de agua a las plantas de filtración de la AAA que al sector agrícola. En el 2003, los tres distritos de riego suplieron a la AAA un promedio de 27 mgd (29,800 acres-pies por año), mientras que el sector agrícola recibió 40 mgd (44,840 acres-pies por año).

Los tres sistemas de riego incluyen aproximadamente 330 millas de canales que se alimentan de 10 embalses principales ubicados en la Cordillera Central. Estos sistemas transportan por gravedad agua desde los embalses hasta los canales de distribución hacia las tomas de la AAA y las tierras agrícolas en los llanos costaneros. La reducción en el cultivo de la caña durante la segunda mitad del Siglo 20 redujo a su vez el uso de los sistemas de riego público para propósitos agrícolas, aumentando a su vez el uso público (NASS, 2003). El riego público cubrió cerca de 14,558 cuerdas de terreno en el 2002, lo que equivale a un 3.7 % de los terrenos bajo cultivo de caña en 1952, ó 390,422 cuerdas. Durante ese mismo año, los sistemas de riego privados proveyeron agua a 31,371 cuerdas de terreno mediante extracciones de agua subterránea, de ríos o de estanques artificiales. El número de fincas que usan agua proveniente de los sistemas de riego público se ha reducido de 216 en el año 1993 a 137 en el año 2002. La reducción en la extensión de terrenos agrícolas bajo riego público ha venido acompañada de una reducción en el riego por gravedad y un aumento en el uso de sistemas de riego por goteo y aéreo, que consumen menos agua que el riego por inundación (gravedad). Entre 1998 y 2002, el número de fincas que aplican riego por gravedad en Puerto Rico se ha reducido en un 12 % de 197 a 174, mientras que el número de fincas con riego por goteo aumentó en un 45 % de 227 a 330 (Tabla 6-10). Paralelamente aumentó el número de fincas bajo riego aéreo en un 47 %. Durante este periodo, la AEE proveyó a sus clientes cerca de 120,290 acres-pies (equivalente a 107.4 mgd) de agua a través de los tres (3) distritos de riego. De ese volumen, el 42 % fue

suministrado por el Distrito de Riego de Isabela, 32 % por el Distrito de Riego de la Costa Sur y 26 % por el Distrito de Riego del Valle de Lajas.

Tabla 6-2 Riego agrícola en Puerto Rico (Servicio Nacional de Estadísticas Agrícolas del Departamento de Agricultura Federal, 2003).

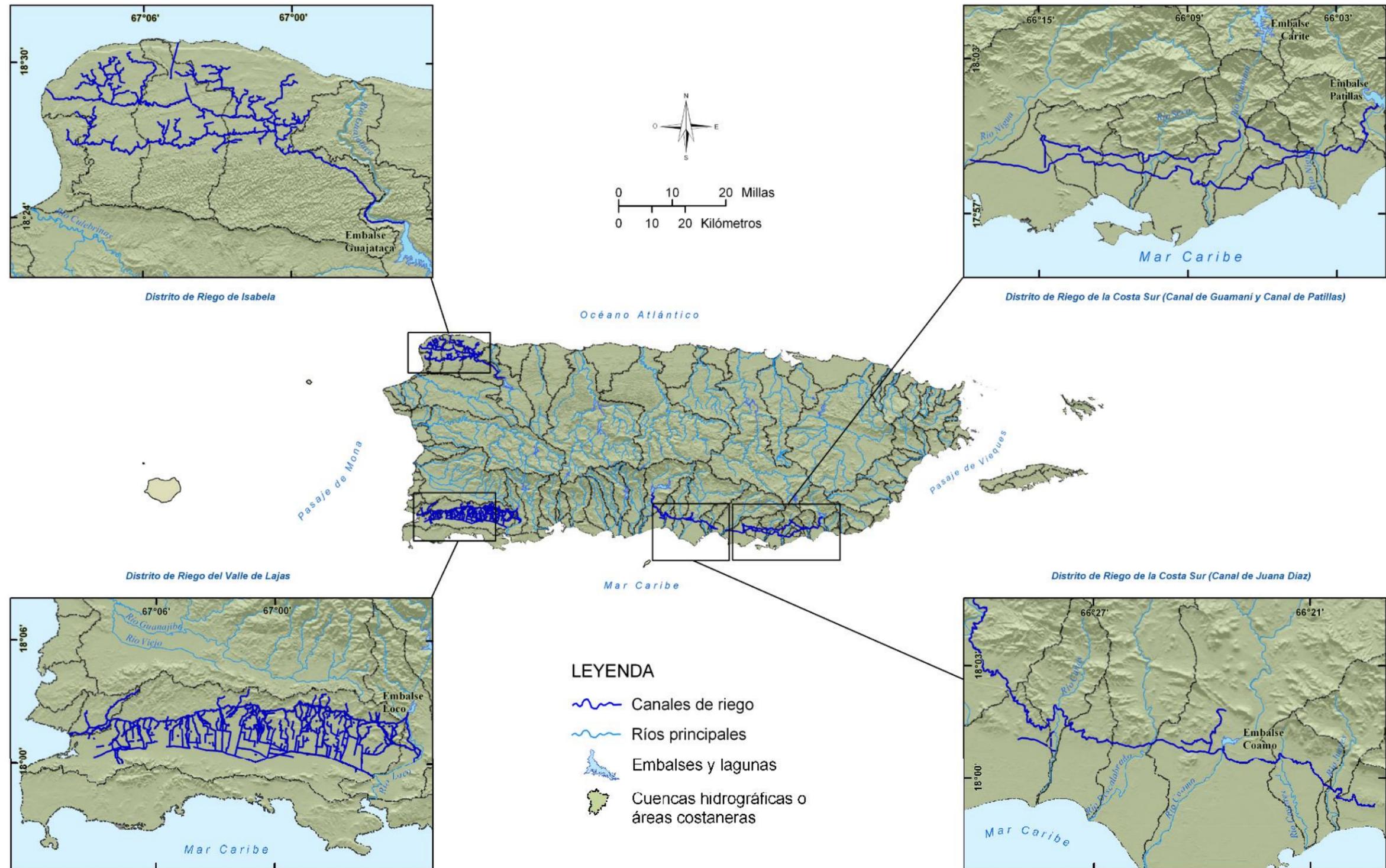
	1993	1998	2002
Área total bajo cultivo en Puerto Rico, cuerdas	826,893	865,478	690,687
Área total de terreno bajo riego, cuerdas	44,986	34,105	44,439
Terreno bajo riego público, cuerdas	13,614	12,596	14,558
Fincas bajo riego público	274	229	245
Terreno bajo riego privado, cuerdas	29,881	21,510	31,371
Fincas bajo riego privado	547	535	725
Fincas con riego por gravedad	--	197	174
Fincas con riego por goteo	--	227	330
Fincas con riego aéreo	--	234	343
Fincas con riego proveniente de pozos	293	280	444
Fincas con riego proveniente de ríos	126	112	133
Fincas con riego proveniente de lago privado	73	106	116
Fincas con riego proveniente de distrito de riego	216	151	137

Los embalses principales asociados a cada distrito de riego se resumen en la Tabla 6-11. Estos embalses fueron diseñados con una capacidad de almacenaje combinada de 113,674 acres-pies. La sedimentación, sin embargo, ha reducido su capacidad de almacenaje a 84,902 acres-pies, lo que representa una pérdida de capacidad de un 25 % (Sección 6.3). La Figura 6-10 muestra la localización de estos embalses.

Tabla 6-3. Embalses principales asociados a los sistemas de riego público de Puerto Rico.

Distrito de Riego		
Costa Sur ^a	Isabela	Valle de Lajas
Carite	Guajataca	Guayo
Patillas		Lucchetti
Guayabal		Loco
Matrullas		
Guineo		
Melanía		

^a El Embalse Coamo también formó parte de este Distrito. Sin embargo, actualmente se encuentra sedimentado y está siendo dragado para uso de abasto público. Su uso para riego ha cesado.



Fuente: DNRA, 2004

Figura 6-32. Distritos de riego operados por la Autoridad de Energía Eléctrica en Puerto Rico, 2004.

6.9 Sistemas Hidroeléctricos

La AEE opera diez (10) sistemas hidroeléctricos alimentados de aguas provenientes de embalses a través de Puerto Rico, que generaron en el 2003 aproximadamente 119 megavatios (Mva) de electricidad. Esta cantidad de electricidad es equivalente al 1.9% de toda la energía que produce o adquirió la AEE en la Isla en el 2003. Estos sistemas fueron construidos comenzando en 1907 como parte de una red hidroeléctrica que incluía 20 plantas hidroeléctricas alimentadas de 15 embalses en la zona montañosa de la Isla. Los diez sistemas en operación utilizan un promedio diario de 87.6 mgd de aguas de seis (6) embalses (Figura 6-49). El agua es descargada aguas abajo de las unidades hidroeléctricas, donde en la mayor parte de las instancias es reusada para generar electricidad nuevamente, para abasto a plantas de filtración de la AAA, o para riego en las regiones Noroeste y Sur de la Isla. Los sistemas hidroeléctricos en operación en el 2004 se ilustran en la Figura 6-50 y se describen en las siguientes secciones.

6.9.1 Desarrollo de los Sistemas Hidroeléctricos

Los sistemas hidroeléctricos en la Isla se desarrollaron entre 1907 al 1956 por la AEE y sus agencias antecesoras (*Water Resources Authority* o *WRA* y la *Autoridad de Fuentes Fluviales* o *AFF*), comenzando con la construcción de la Planta Hidroeléctrica Comerío 1 y concluyendo con la construcción de la Planta Hidroeléctrica Yauco 2. Posterior a este período se instaló la unidad del Canal de Patillas, la cual nunca ha sido utilizada. El período de desarrollo de los sistemas hidroeléctricos incluye tres sub-períodos:

- **1913-1915:** En este período se inauguraron los embalses Comerío 1, Comerío 2, Carite, Guayabal, Melanía, Coamo y Patillas. Además comenzaron a operar las plantas hidroeléctricas Comerío 2 y Carite 1.
- **1927-1930:** En este periodo inician operaciones las plantas hidroeléctricas Isabela 1, Toro Negro 1 y Río Blanco. Además, se construyó el Embalse Guajataca (1928).
- **1940-1956:** Muy pocos desarrollos hidroeléctricos ocurrieron entre el 1930 y el 1940. Sin embargo, los próximos 16 años fueron de gran actividad con la construcción de ocho plantas hidroeléctricas (Garzas 1, Garzas 2, Dos Bocas, Isabela 3, Caonillas 1, Caonillas 2, Yauco 1 y Yauco 2). Además, se construyeron los embalses: Dos Bocas (1942), Garzas (1943), Caonillas (1948), Lucchetti (1952), Guayo (1956) y Yahuecas (1956).

Los sistemas hidroeléctricos desarrollados durante estos tres períodos tenían una capacidad combinada de 127,205 kilovatios (Kva). La Tabla 6-18 muestra, en orden cronológico, el inventario de plantas hidroeléctricas construidas en Puerto Rico. También muestra la capacidad de producción actual de cada sistema incluyendo aquellos sistemas cuya operación ha sido descontinuada. Actualmente, la capacidad de producción es de 67,525 Kva o un 53.1% de la capacidad original. Esta reducción se debe a que la AEE ha descontinuado la operación de unidades generatrices en algunos sistemas y ha reducido la capacidad en otros sistemas. La principal razón para descontinuar la operación de estas unidades está relacionada a mermas en la capacidad de los embalses donde operaban, debido a la acumulación acelerada de sedimentos. También han ocurrido problemas operacionales que han resultado en el cierre de

unidades, ya que en estos casos, el flujo de agua en los embalses no se ha reducido. La localización de los sistemas hidroeléctricos en Puerto Rico se ilustra en la Figura 6.50. La producción eléctrica de cada planta durante los pasados 5 y 10 años se resume en la Tabla 6-19 y en la Figura 6-53. Durante los pasados 10 años, la producción hidroeléctrica se concentró en cinco (5) plantas: Dos Bocas (Figura 6-51), Yauco 1, Caonillas 1, Toro Negro 1 y Yauco 2, con una producción mensual que osciló entre 1,187 a 2,667 megavatios-hora (Mva-h). Las unidades operaron entre un 80.6% y un 99.2% del tiempo. Excepto por la planta Caonillas 1, la producción de electricidad y la frecuencia de operación de las unidades aumentaron en los últimos cinco años. Esta reducción en Caonillas se debe a la reparación de daños en la línea de transmisión de agua del Embalse Caonillas causados por el Huracán Georges en septiembre de 1998.



Fotografía 6-6 Planta Hidroeléctrica Caonillas 1 (AEE, 2004).

Tabla 6-18. Unidades hidroeléctricas instaladas en Puerto Rico por la WRA, la AFF y la AEE desde 1913 a 1960, incluyendo las unidades descontinuadas durante este período.

Unidad de Producción	Año	Capacidad original (Kilovatios)	Capacidad actual (Kilovatios)	Producción actual (Mvah) (sep 2003-oct 2004)
Comerío 1	1907	2,000	0	0
Comerío 2	1913	4,000	0	0
Carite 1	1915	4,200	0	0
Carite 2	1924	800	0	0
Isabela 1	1928	880	0	0
Toro Negro 1	1929	5,400	5,500	16,914
Río Blanco	1930	6,250	3,125	3,354
Carite 3	1931	800	0	0
Toro Negro 2	1937	2,400	2,000	2,426
Isabela 2	1938	1,000	0	0
Garzas 1	1941	9,000	3,600	9,644
Garzas 2	1941	6,300	5,000	1,514
Dos Bocas	1942	22,500	5,000	54,882
Isabela 3	1947	1,250	0	0
Isabela 4	1947	1,625	0	0
Caonillas 1	1949	17,600	9,000	0
Caonillas 2	1950	5,000	3,600	0
Yauco 1	1953	25,000	25,000	50,495
Yauco 2	1953	10,000	4,500	26,483
Patillas	1984	1,200	1,200	0
TOTAL		127,205	67,525	165,712

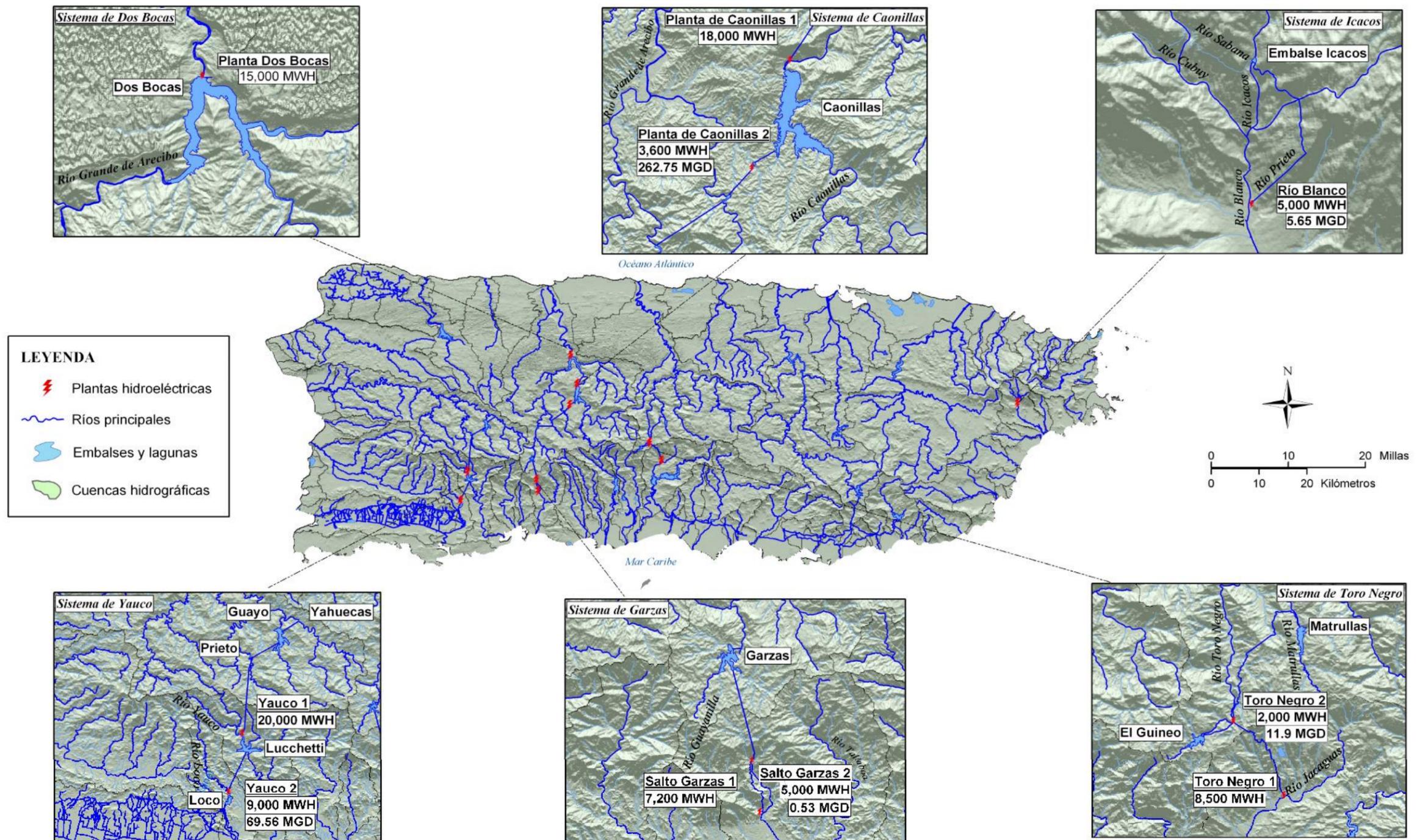
Fuente: Autoridad de Energía Eléctrica, (2003).



Fotografía 6-7 Cuarto de máquinas de la Planta Hidroeléctrica Dos Bocas (AEE, 2004).



Fotografía 6-8. Cuarto de máquinas de la Planta Hidroeléctrica Garzas 2 (AEE, 2004)



Fuente: Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, 2004.

Figura 6-1. Sistemas hidroeléctricos en operación en Puerto Rico en el 2004