

Geología modificada de Ward y otros, USGS, 1991;  
 Ward, Scharlach y Hartley  
 Hidrogeología modificada de Renken y Gómez-Gómez, 1994

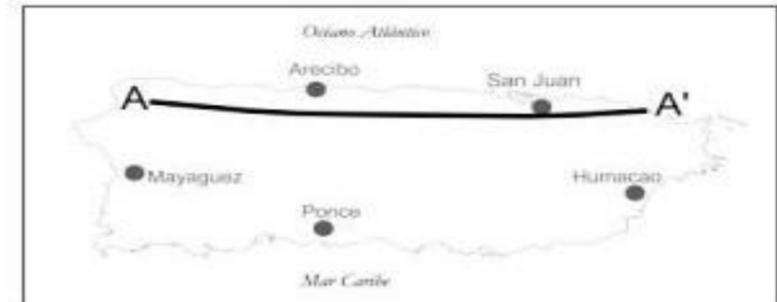
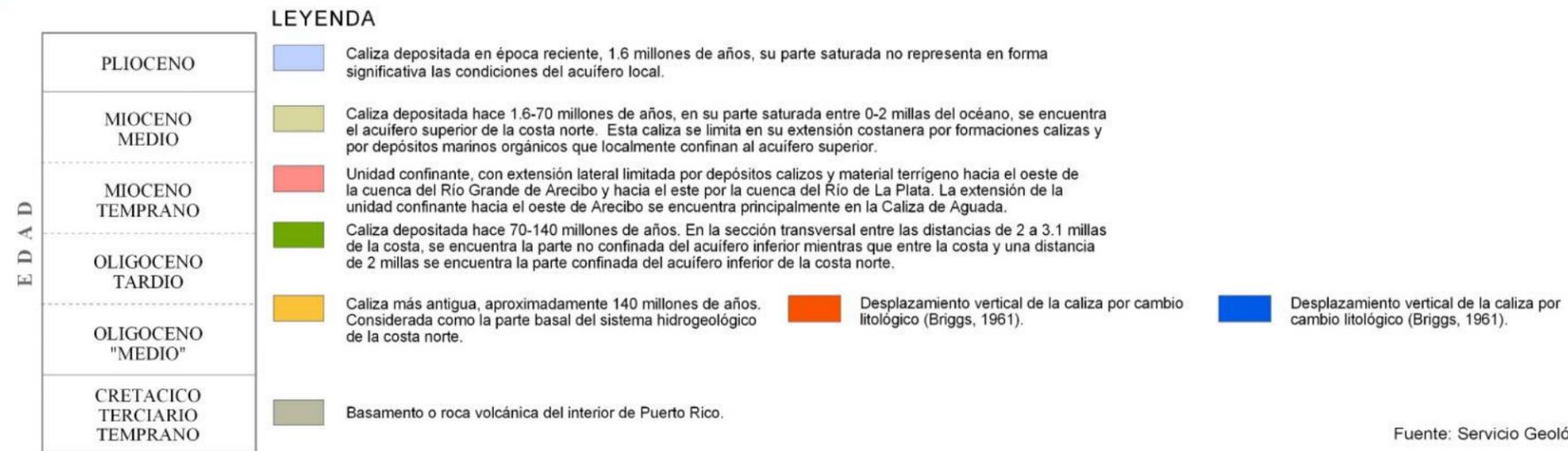
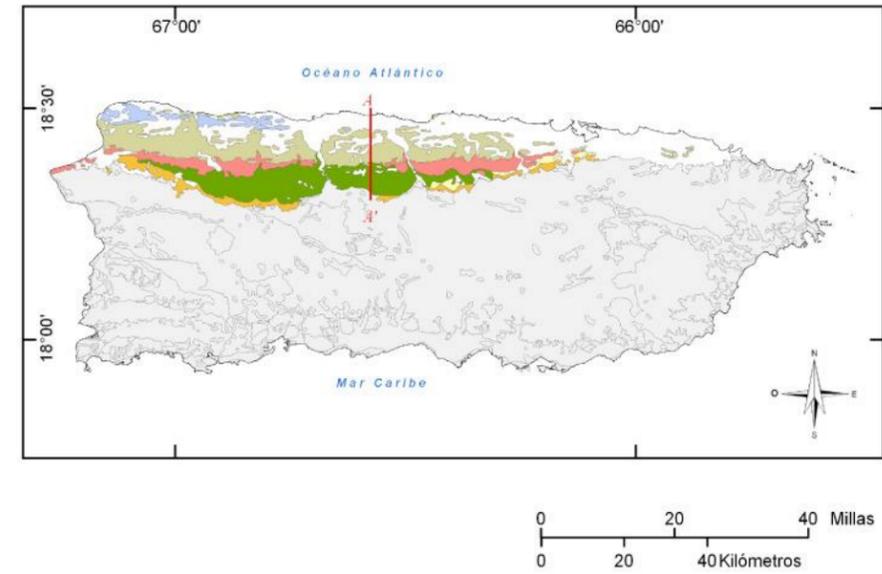
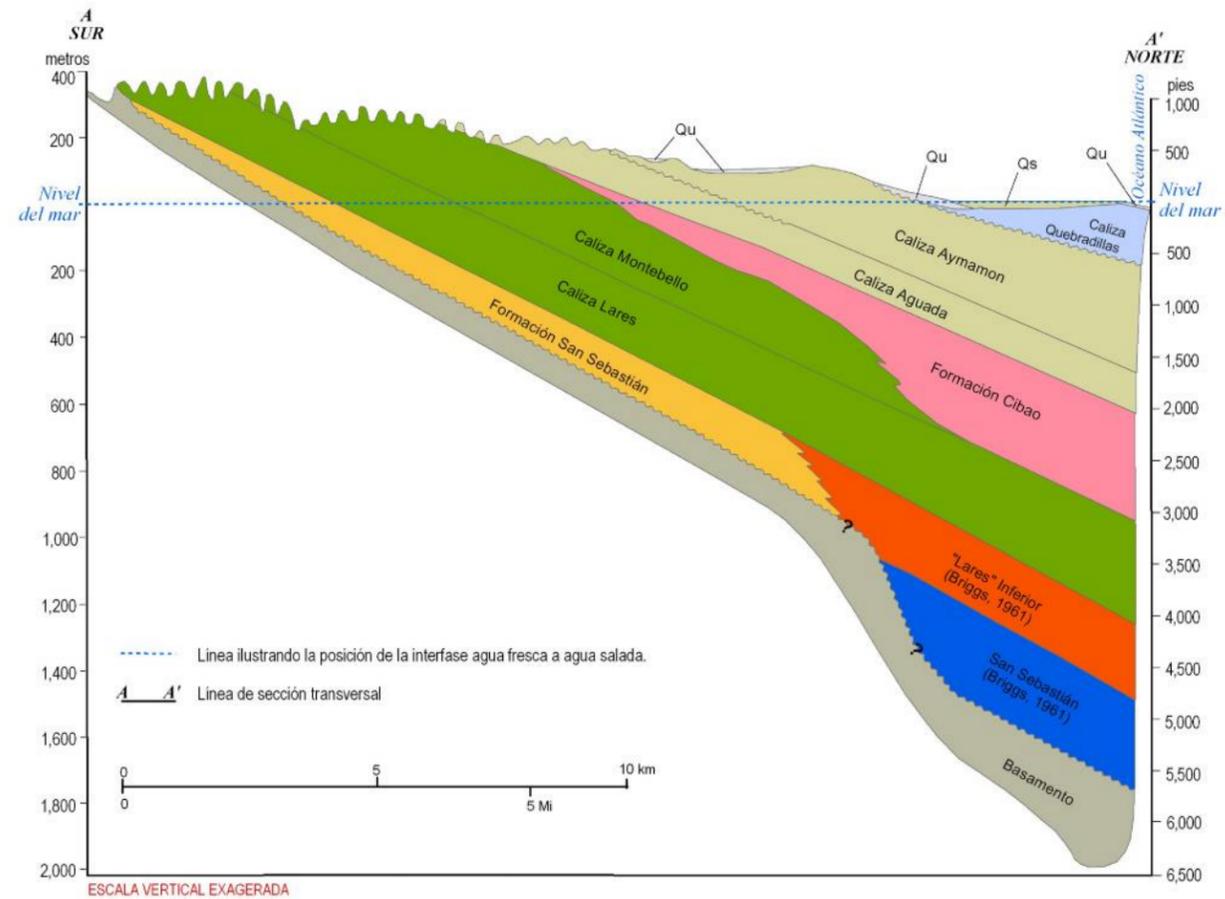


Figura 6-12. Sección longitudinal generalizada de la Región Norte de Puerto Rico.



Fuente: Servicio Geológico Federal, 2002

Figura 6-13. Sección transversal generalizada de la Región Norte de Puerto Rico.

El Acuífero Superior (Llano o Freático) incluye capas de aluvión y depósitos marinos sobrepuestos sobre segmentos de las formaciones calizas, primordialmente las denominadas Aymamón, Cibao, Camuy y Aguada (Monroe, 1980). El acuífero se extiende desde la zona de Campanilla en Toa Baja, hasta el valle aluvial del Río Grande de Arecibo. Su espesor máximo varía dependiendo de su ubicación de este a oeste, así como en los abanicos aluviales formados en los valles inmediatos a los ríos de la Región. El Acuífero Superior es fuente importante de abastos de agua para consumo, usos industriales y actividades agrícolas, con una extracción en el 2002 de 52.1 mgd. (Figura 6-14 y Tabla 6-7).

El Acuífero Inferior (Profundo o Artesiano) incluye capas de rocas calizas de las formaciones calizas San Sebastián, Lares y Montebello, confinadas por estratos de barros y cienos de la Formación Cibao. El acuífero se extiende desde la Zona Metropolitana de San Juan hasta Aguadilla, aunque las zonas con mayor capacidad de producción de agua se encuentran entre Manatí y Arecibo. En esta zona se manifiestan condiciones artesianas que previo al desarrollo del acuífero, el nivel potenciométrico del agua permitía que los pozos en la zona fluyeran sin la necesidad de bombeo. El Acuífero Inferior es la fuente principal de agua en la Isla para usos industriales en la zona de Manatí a Barceloneta, además de suplir abastos moderados para consumo. Las extracciones de agua en el 2002 fueron de 7 mgd (Figura 6-14 y Tabla 6-8).

#### 6.1.1.1 Acuífero Superior (Llano o Freático)

El Acuífero Superior de la Provincia de la Costa Norte es el más productivo y de mayor capacidad de almacenaje de agua en Puerto Rico. Este acuífero está formado por capas de aluvión de alta porosidad (primaria más secundaria) sobre rocas calizas con niveles de desarrollo de fracturas y canales de solución que varían de moderados a altos (Giusti, 1978). El aluvión descansa sobre las rocas calizas en forma de abanicos en los valles costaneros de los ríos que cruzan la zona, principalmente desde Toa Baja hasta Arecibo. El sistema aluvial tipo abanico forma parte del drenaje de los ríos de la Región Norte que se originan en la Cordillera Central fluyendo a través de la Provincia de la Costa Norte hacia el océano. Estos ríos incluyen a Río Guajataca, Río Camuy, Río Grande de Arecibo, Río Grande de Manatí, Río Cibuco y Río de La Plata. Aunque otros ríos cruzan la provincia al este del Río de La Plata y al oeste del Río Guajataca, fuera de estos límites el acuífero superior es menos productivo. Para cada uno de estos ríos existe un acuífero aluvial costero con su nombre según indicamos anteriormente. Rocas calizas de las formaciones Aymamón y Aguada descansan sobre barros impermeables de la Formación Cibao, que separa el Acuífero Superior del Inferior. El espesor del acuífero calizo varía desde 0 hasta 1640 pies, con espesores en los valles aluviales de 0 a 500 pies. La porosidad del aluvión es de hasta un 15 %, mientras que las rocas calizas exhiben valores de hasta 20 %. Estas características promueven valores de conductividad hidráulica (K) y transmisividad (T) que se encuentran entre los estimados más elevados en la Isla (Figura 6-18). Datos publicados de conductividad hidráulica para estos acuíferos reflejan valores de hasta 3,000 pies por día (Giusti, 1978). La zona más productiva en este acuífero se encuentra entre los 490 a 660 pies de profundidad que corresponden a valores de conductividad hidráulica que disminuyen con

profundidad con un mínimo estimado de 300 pies por día. Conjuntamente con la lluvia abundante en las zonas de recarga del acuífero en las laderas de la Cordillera Central y la Zona del Karso, estas propiedades resultan en una alta productividad del acuífero.

El desarrollo prudente a largo plazo de un acuífero requiere que la extracción de agua subterránea no exceda la recarga natural, a menos que se aumente dicha recarga por medios artificiales. Este desarrollo planificado contribuye a prevenir o minimizar problemas tales como: reducciones significativas en los niveles del agua; intrusión salina con aumentos en los sólidos disueltos en el agua; deterioro de la calidad del agua debido a la migración de contaminantes de fuentes dispersas tales como aguas usadas de pozos sépticos-domésticos dispersos o de derrames industriales. Desafortunadamente, en el desarrollo del Acuífero Superior se han violado todas estas normas, resultando en su deterioro general. La extracción de agua subterránea del Acuífero Superior se distribuye en las siguientes regiones:

1. Aguadilla a Camuy,
2. Camuy a Manatí,
3. Manatí a Vega Baja,
4. Vega Alta - Dorado
5. Toa Alta a Bayamón,
6. Guaynabo a San Juan y
7. Carolina a Loíza.

La extracción documentada y estimada para cada una de estas regiones se presenta en la Tabla 6.12. La extracción mayor durante el 2002 corresponde al uso para abasto público con 40 mgd, el uso agrícola con 6.7 mgd y finalmente el uso industrial con 5.4 mgd.

Tabla 6-1. Extracción de agua subterránea del Acuífero Superior de la Provincia del Norte de Puerto Rico en el 2002 [mi<sup>2</sup> – millas cuadradas; mgd – millón de galones por día]

Región	Área superficial, mi <sup>2</sup>	Extracción de Agua Subterránea 2002, mgd
Aguadilla a Camuy	270	3.0
Hatillo a Barceloneta	261	23.3
Manatí a Vega Baja	106	10.2
Vega Alta a Dorado	58.7	13.0
Toa Alta a Bayamón	67.4	2.2
Guaynabo a San Juan	87	0.1
Carolina a Loíza	55	0.3
<b>Total</b>	<b>905</b>	<b>52.1</b>

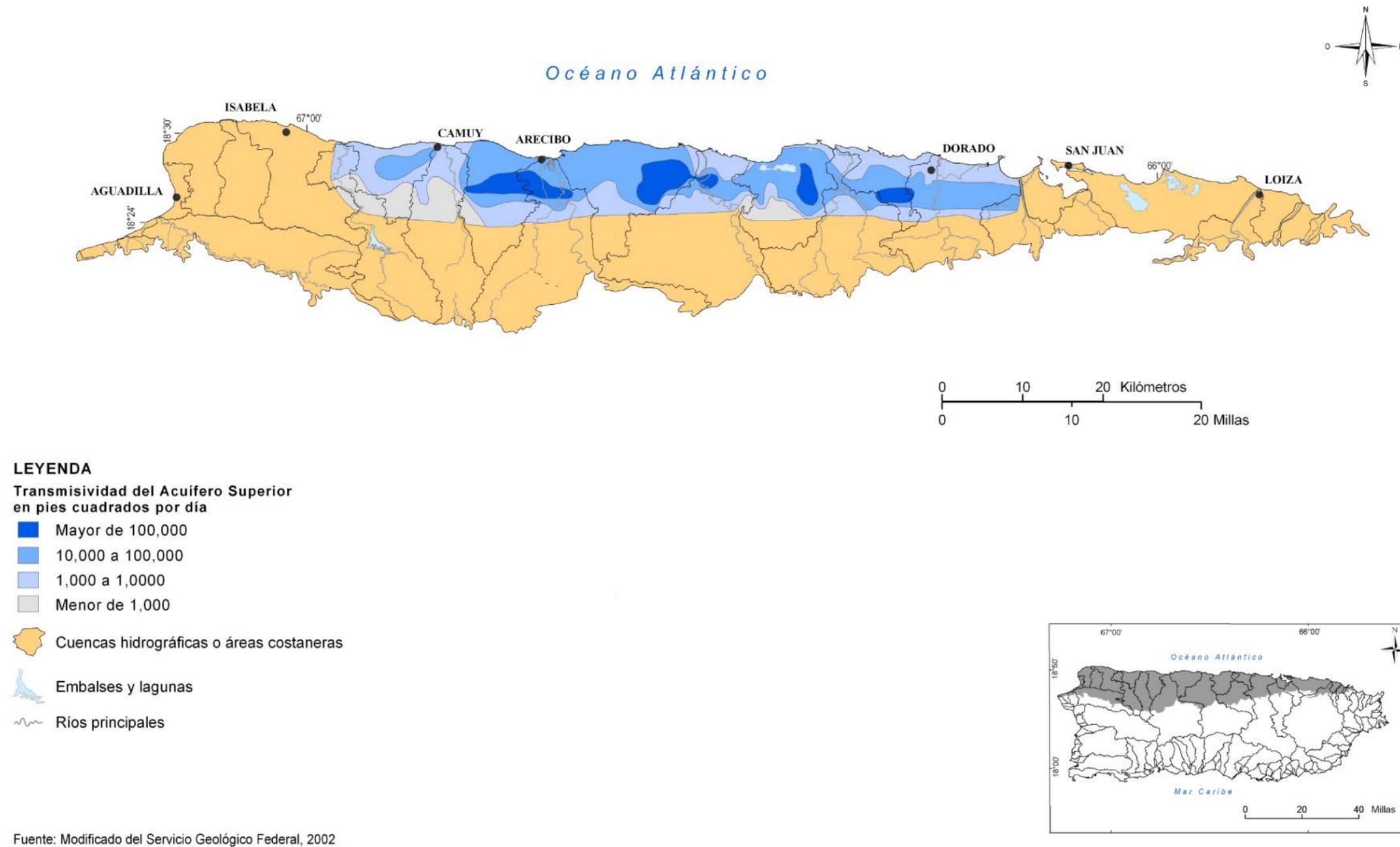


Figura 6-14. Distribución de valores de transmisividad (T) del Acuífero Superior de la Provincia del Norte.

### 6.1.1.2 Recarga al Acuífero Superior

El Acuífero Superior de la Provincia de la Costa Norte recibe una recarga anual promedio de 10 a 12 pulgadas (Giusti, 1976; Gómez-Gómez y otros, 1988; Torres-González y otros, 1996; Cherry y otros; 2001). La recarga varía con la permeabilidad de los materiales que forman acuífero, siendo estos los factores más críticos en el mantenimiento de la elevación del manto freático o nivel del agua. Esto a su vez controla la intrusión salina en la zona costanera y permite la extracción continua ponderada de agua subterránea por medio de pozos. En general, la recarga es mayor en las zonas donde predominan las rocas calizas en el Acuífero Superior (al sur de la antigua Carretera PR-2) que en los valles aluviales. En las zonas de rocas calizas la recarga natural es de hasta 28 pulgadas, mientras que en los valles aluviales de los ríos rara vez excede 8 pulgadas.

Extracciones típicas de agua subterránea del Acuífero Superior exceden 100 gpm. La magnitud de las extracciones depende en gran medida del uso del agua. Por ejemplo: las extracciones de agua subterránea para abasto público usualmente son en el orden de 250 gpm o más en periodos de uso que exceden 20 horas diarias. En cambio, las extracciones de agua para usos agrícolas o industriales son en el orden de 100 gpm en periodos de uso de menos de 8 horas diarias.

El rendimiento seguro del Acuífero Superior se ha estimado tomando como base la posición de la interfase (zona en el acuífero donde se mezcla el agua fresca y la salina) y los niveles históricos de agua subterránea determinados por el *USGS*. Es importante recordar que el concepto de rendimiento seguro en un acuífero es relativo al punto seleccionado para un equilibrio entre la recarga y extracciones. Estos datos se utilizan para definir las tendencias a corto y largo plazo de distintas condiciones hidrológicas. Estas condiciones hidrológicas se pueden definir con mayor exactitud utilizando modelos matemáticos de diferencia finita del acuífero. Los modelos se utilizan para simular la interacción entre el agua superficial y el agua subterránea, la extracción de los pozos y la recarga natural e inducida a un acuífero. Los valores de rendimiento específico para el Acuífero Superior de la costa norte fluctúan entre 0.10 y 0.15 pies cúbicos por pie cuadrado-pie.

### 6.1.1.3 Acuífero Inferior (Artesiano o Profundo)

El Acuífero Inferior de la Provincia de la Costa Norte, que se extiende desde Camuy hasta Vega Baja, es referido más comúnmente como el Acuífero Artesiano o Profundo. El flujo de agua subterránea en el Acuífero Inferior es primordialmente hacia el norte-noreste, con puntos de descarga en la costa y el mar (Olcott y otros, 1999). Este acuífero, formado por rocas calizas de las formaciones Lares y Montebello, yace bajo el Acuífero Superior ó Freático, separados por la Formación Cibao. Esta formación, compuesta primordialmente de barro y cienos impermeables, impide que el agua en el Acuífero Inferior se desplace verticalmente en proporción al nivel freático en las zonas de recarga. Este confinamiento se refleja en condiciones artesianas, particularmente en la zona de Manatí a Barceloneta. En esta zona, las presiones del agua en el acuífero son representativas de las áreas de recarga en la vecindad del pueblo de Florida.

El acuífero recibe un promedio anual de recarga que se estima en 7 pulgadas, principalmente en las desde las cercanías del pueblo de Florida hasta el Embalse Guajataca (Gómez-Gómez, comunicación escrita, 2003). Las zonas de mayor capacidad de producción de agua en el acuífero se extienden desde Manatí hasta Barceloneta. En esta zona, 28 pozos industriales, domésticos y agrícolas hincados a profundidades de hasta 1,500 pies, extraen un promedio diario de 5.3 mgd del acuífero (DRNA, 2004, Tabla 6-8). Esta extracción comenzó en el 1970 para suplir agua a la industria farmacéutica que se desarrolló en la zona. La extracción de agua, combinada con reducciones en la recarga del acuífero debido a su intercepción por pozos de la AAA en Florida, han resultado en reducciones drásticas en la presión artesiana en el acuífero. Escapes en las camisillas de los pozos artesianos de la zona también ha contribuido a reducir las presiones artesianas en el acuífero. Defectos de construcción de los pozos permiten el escape de agua del Acuífero Inferior al Acuífero Superior. Estos escapes de agua (estimados por el *USGS* en aproximadamente 1.0 mgd) ocurren primordialmente en la zona del Acuífero Superior donde predomina agua salobre o salina, por lo que el agua no es utilizable. Estos cambios en recarga y filtraciones de agua han resultado en una merma en las presiones artesianas del acuífero en el área del Cruce Dávila en Manatí (Figura 6-19). Las presiones artesianas se han reducido de 440 pies sobre el nivel del mar en el 1970, a aproximadamente 290 pies sobre el nivel del mar al presente (*USGS*, 2004).

Tabla 6-2. Extracción de agua subterránea del Acuífero Inferior de la Provincia del Norte, 2002  
[nd – no determinado; mi<sup>2</sup> – millas cuadradas; mgd – millón de galones por día]

Región	Área superficial, mi <sup>2</sup>	Extracción de Agua Subterránea 2002, mgd
Aguadilla a Camuy	114	nd
Camuy a Barceloneta	156	3.3
Manatí a Vega Baja	36.9	2.0
<b>Total</b>	<b>303.9</b>	<b>5.3</b>

La productividad del Acuífero Inferior es definida por la transmisividad de las rocas calizas que lo forman. Debido a que el acuífero se encuentra confinado, el espesor saturado no varía y su productividad esta determinada por el producto de este espesor fijo y la Conductividad Hidráulica (K) intrínseca del material. Los valores de transmisividad fluctúan desde 1,000 pies cuadrados por día en áreas de recarga a un máximo de 5,000 pies cuadrados por día en el área industrial de Barceloneta. La Figura 6-20 ilustra la distribución espacial de la transmisividad para el Acuífero Inferior.

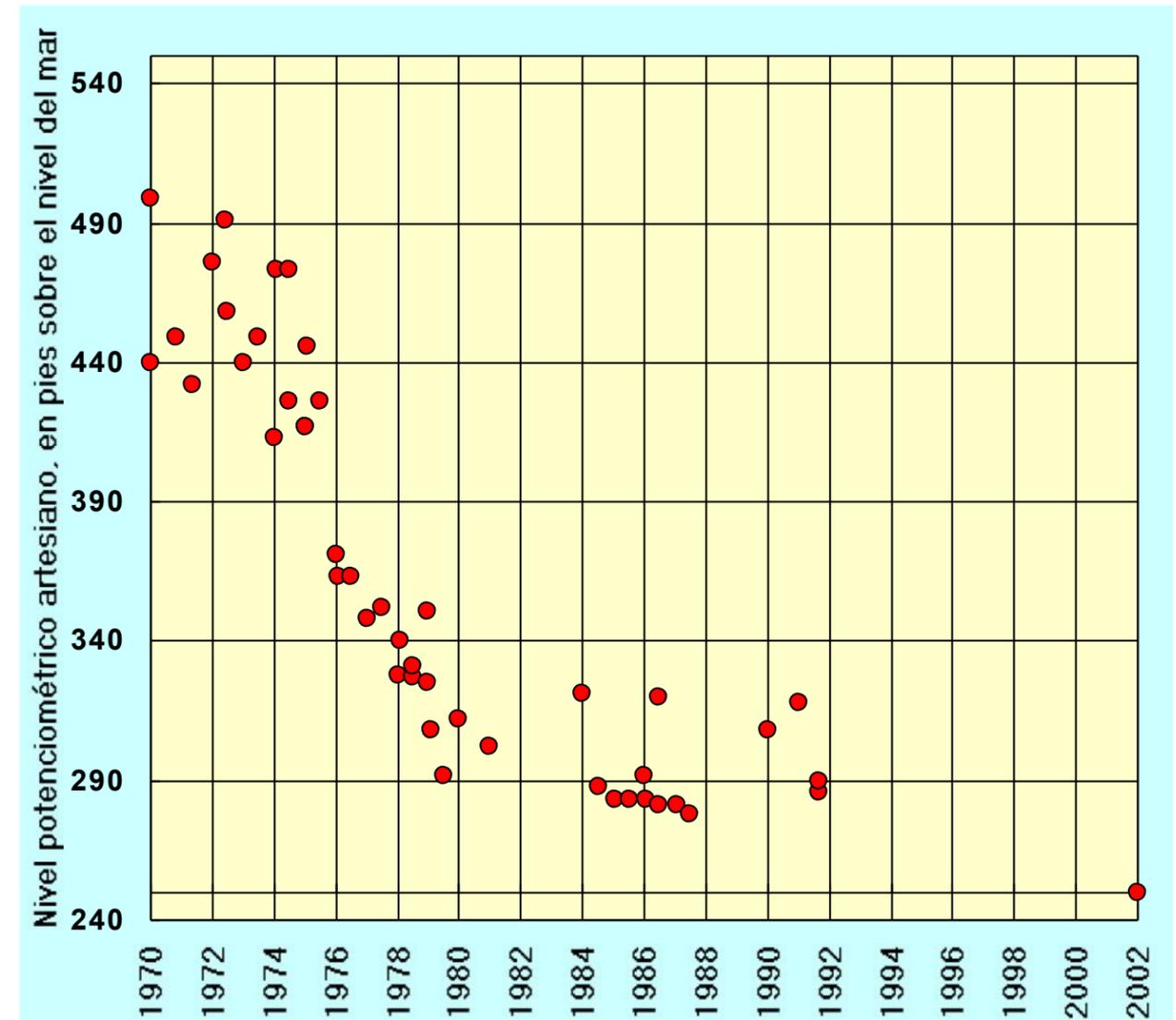
#### 6.1.1.4 Capacidad Máxima de Extracción de la Provincia del Norte

Aunque los acuíferos Superior e Inferior de la Provincia del Norte son los más importantes en la Isla, su capacidad para producir agua es limitada. El DRNA estima que la capacidad máxima de producción del Acuífero Superior (Freático) es de aproximadamente 50 mgd. Este valor se deriva de los estudios del USGS con el objetivo de mantener una extracción sostenible que no resulte en mermas significativas en los niveles freáticos del acuífero. Este valor incluye varias zonas afectadas por intrusión salina y contaminación química. Como se indicara en la sección anterior, las extracciones actuales de agua de este acuífero se estiman en 52.3 mgd. Esto implica que el potencial de extracciones adicionales al momento es limitado o ninguno. Al incluir las zonas afectadas por intrusión salina y contaminación química, la capacidad real de extracciones del Acuífero Superior es 45.4 mgd.

El USGS estimó en 6.0 mgd el potencial de extracción de agua del Acuífero Inferior. Tomando en cuenta las extracciones actuales de 5.3 mgd, existe un potencial no-utilizado de extraer hasta 0.7 mgd adicionales. Sin embargo, los problemas de reducciones de niveles y pérdidas de agua que sufre este acuífero necesitan resolverse previo a considerar extracciones adicionales. Es necesario también completar los estudios sistemáticos de la hidráulica del acuífero para entender mejor su funcionamiento.

El potencial de extracción de agua de los acuíferos de la Provincia del Norte puede aumentarse luego de implantar varias medidas a corto y largo plazo.

1. Las extracciones de agua del Acuífero Superior no pueden aumentarse hasta que no se tomen medidas efectivas para mitigar las áreas afectadas por intrusión salina o contaminación química. Esto requerirá proyectos de remediación tales como recarga artificial, extracción y limpieza, y reducciones temporeras en el bombeo en zonas afectadas por intrusión salina.
2. En el Acuífero Inferior será necesario reducir las extracciones de agua en la zona de Florida y reparar los pozos defectuosos en el área de Barceloneta.



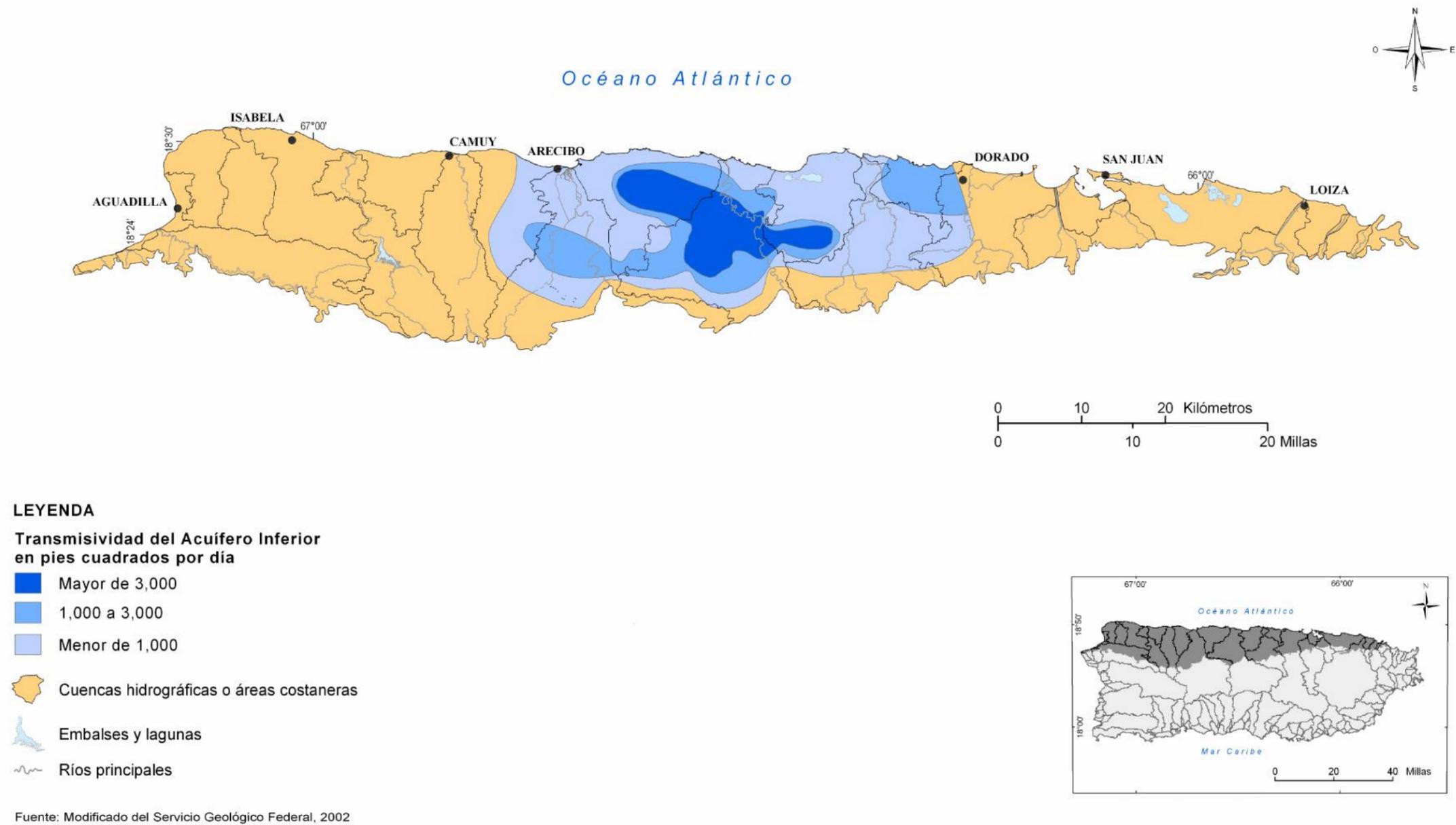


Figura 6-12. Distribución de valores de transmisividad (T) del Acuífero Inferior de la Provincia del Norte.

## 6.6.2 Provincia de la Costa Sur

La Provincia de la Costa Sur incluye una serie de acuíferos aluviales costaneros que se extienden desde Patillas hasta el Valle de Lajas. Estos acuíferos están formados por capas de aluvión (arena, piedra y grava) en una serie de "abanicos" deltaicos que yacen sobre rocas calizas y de origen volcánico. No existe lo que comúnmente se refiere como el "Gran Acuífero del Sur". Cada valle aluvial forma un acuífero independiente, y las extracciones de agua en un valle no afectan los valles cercanos. Los acuíferos principales se encuentran en los valles aluviales de Patillas a Arroyo; Guayama a Salinas; Coamo; y Juana Díaz a Ponce. 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 productividad, aunque en la parte norte de Peñuelas existen pozos de gran capacidad. En el Valle de Lajas el acuífero no es significativo o contiene agua salina, debido al clima y la geología de la zona (Figura 6-21 y 6-22).

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. Los acuíferos proveyeron 50 mgd de agua en la Provincia de la Costa Sur, de los cuales la AAA extrajo 25 mgd, las fincas agrícolas 23 mgd, y las industrias dos (2) mgd.

En general, el agua subterránea en los acuíferos de la Región Sur fluye de norte a sur. Esto se debe a que la recarga proviene de los ríos que fluyen desde las laderas montañosas al norte de los valles aluviales, así como de los canales de riego en la parte norte de los valles propios. Una vez que el agua se infiltra al subsuelo, fluye verticalmente por la fuerza de gravedad hasta la zona saturada, formando el manto o nivel freático. El nivel freático aumenta con la recarga, hasta el punto en que la fuerza de gravedad impulsa el agua desde las zonas donde la elevación es mayor hacia las de menor elevación. Normalmente la elevación del nivel freático es mayor en la parte norte de los valles aluviales descendiendo hacia la costa. Eventualmente, si el agua no se extrae del acuífero mediante pozos, descarga por gravedad en la costa o directamente al mar. Las lagunas y pantanos costaneros de la Región Sur son precisamente zonas de descarga del agua subterránea que afloran a la superficie. Cuando las extracciones de agua exceden la recarga, se deprime el nivel freático bajo el nivel de las lagunas, pantanos o el mar, y cesa el flujo de agua natural. En varias zonas de los acuíferos de la Región Sur ocurre esta condición, siendo las zonas más afectadas las de Guayama, Salinas, Santa Isabel-Coamo y Ponce. La reducción en recarga al acuífero en estas zonas ha promovido mermas de hasta 40 pies en los niveles freáticos, propiciando la intrusión salina. Esto inutiliza parte del acuífero para todos los usos de agua.

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

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 ha ocurrido un descenso notable en el nivel de agua subterránea. En forma similar si comparamos los niveles publicados para la década de los 60 y los niveles más recientes observamos condiciones similares. La Figura 6-23 muestra los mapas potenciométricos para las condiciones hidrológicas de 1968, la Figura 6-24 para las condiciones hidrológicas de 1986, ambas de la Provincia de la Costa Sur y la Figura 6-25 para las condiciones hidrológicas de 1997 del 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 los Distritos de Riego operado por la AEE. Esto se debe a que las otras fuentes de recarga, incluyendo la lluvia y la escorrentía de ríos y quebradas, no son suficientes para reemplazar la cantidad de agua que se extrae al presente del acuífero. El riego de la zona 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.

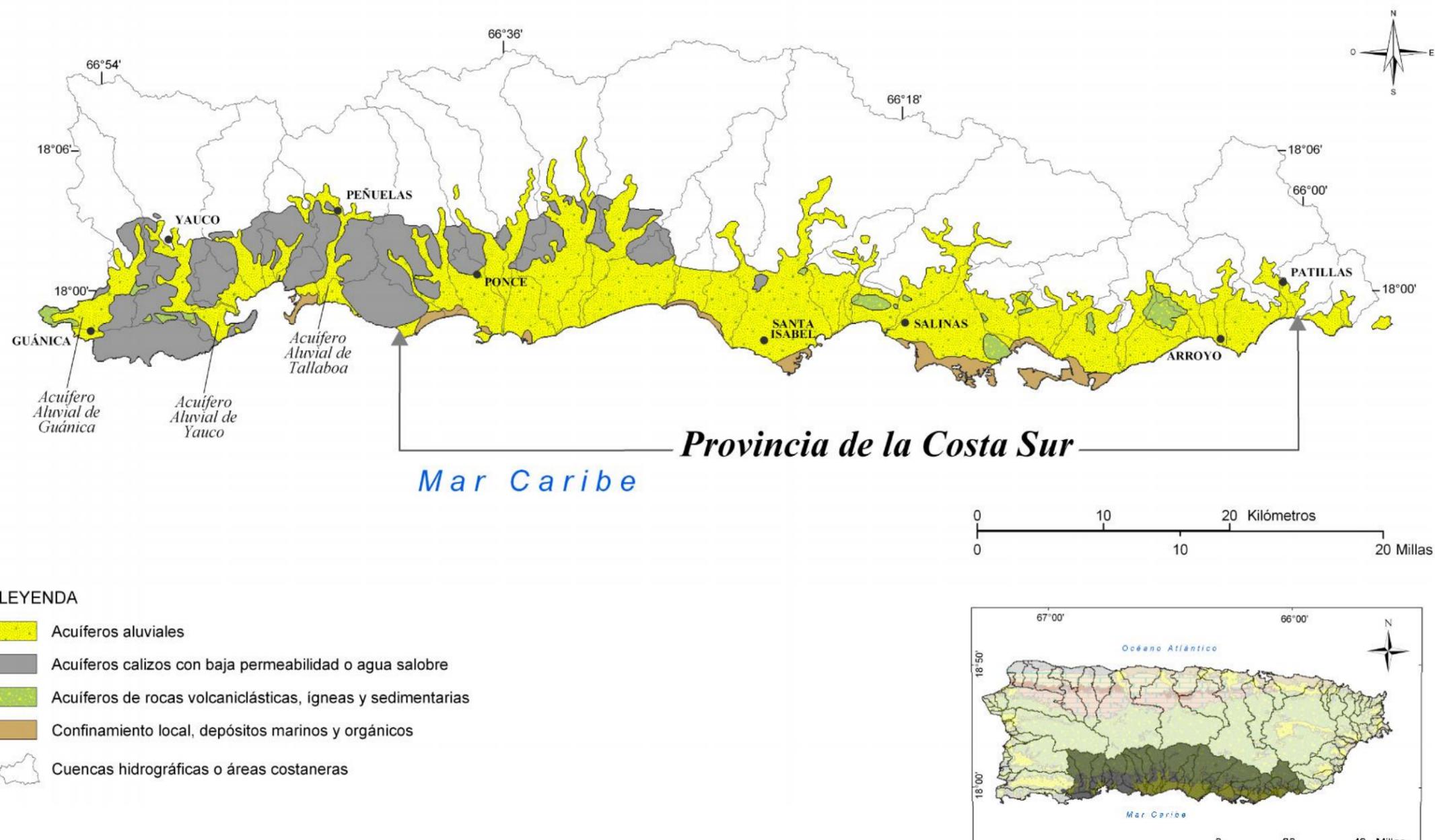


Figura 6-13. Acuíferos de la Provincia del Sur de Puerto Rico (refiérase a la Figura 6.19, para información de sección transversal).

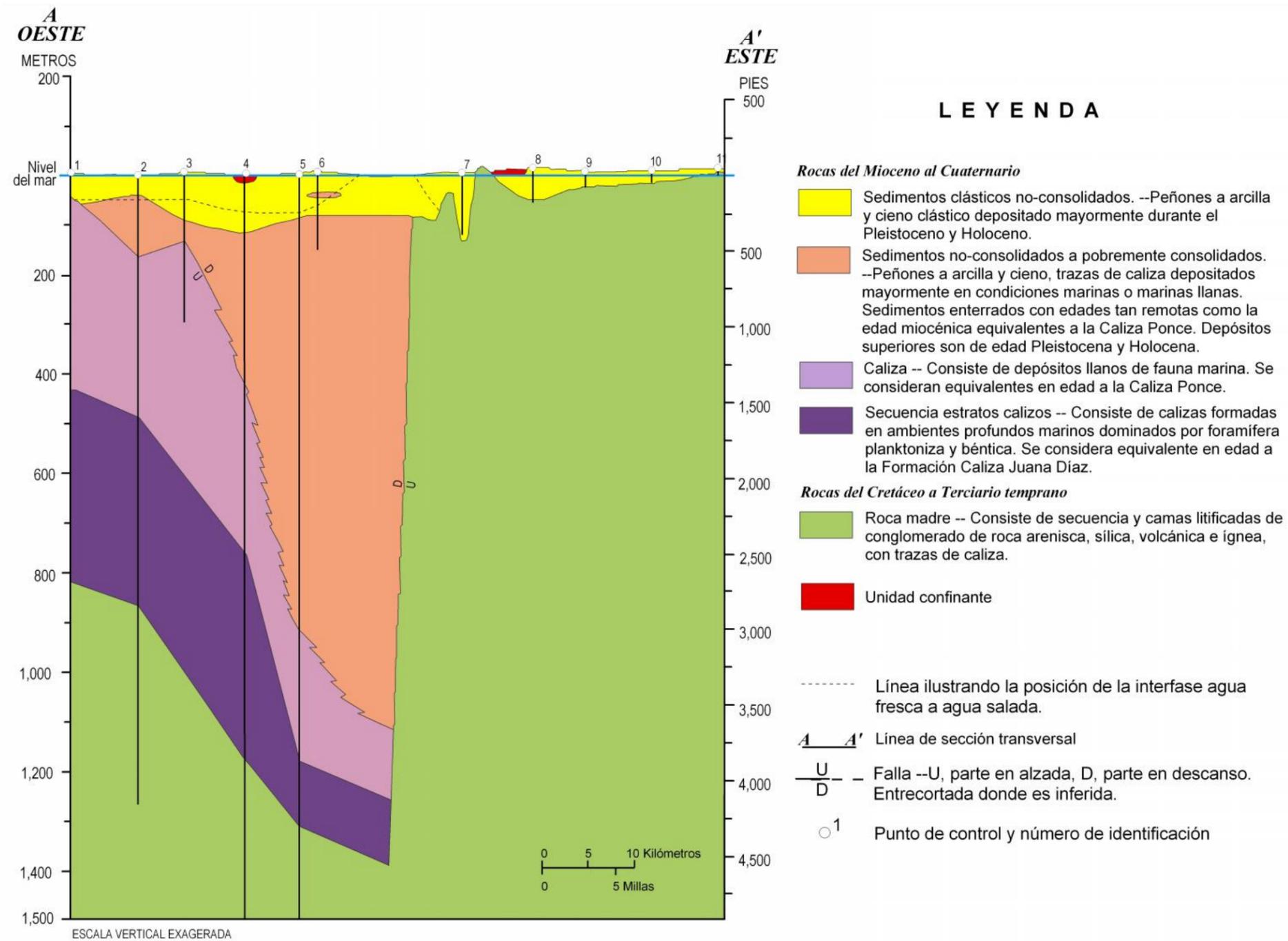
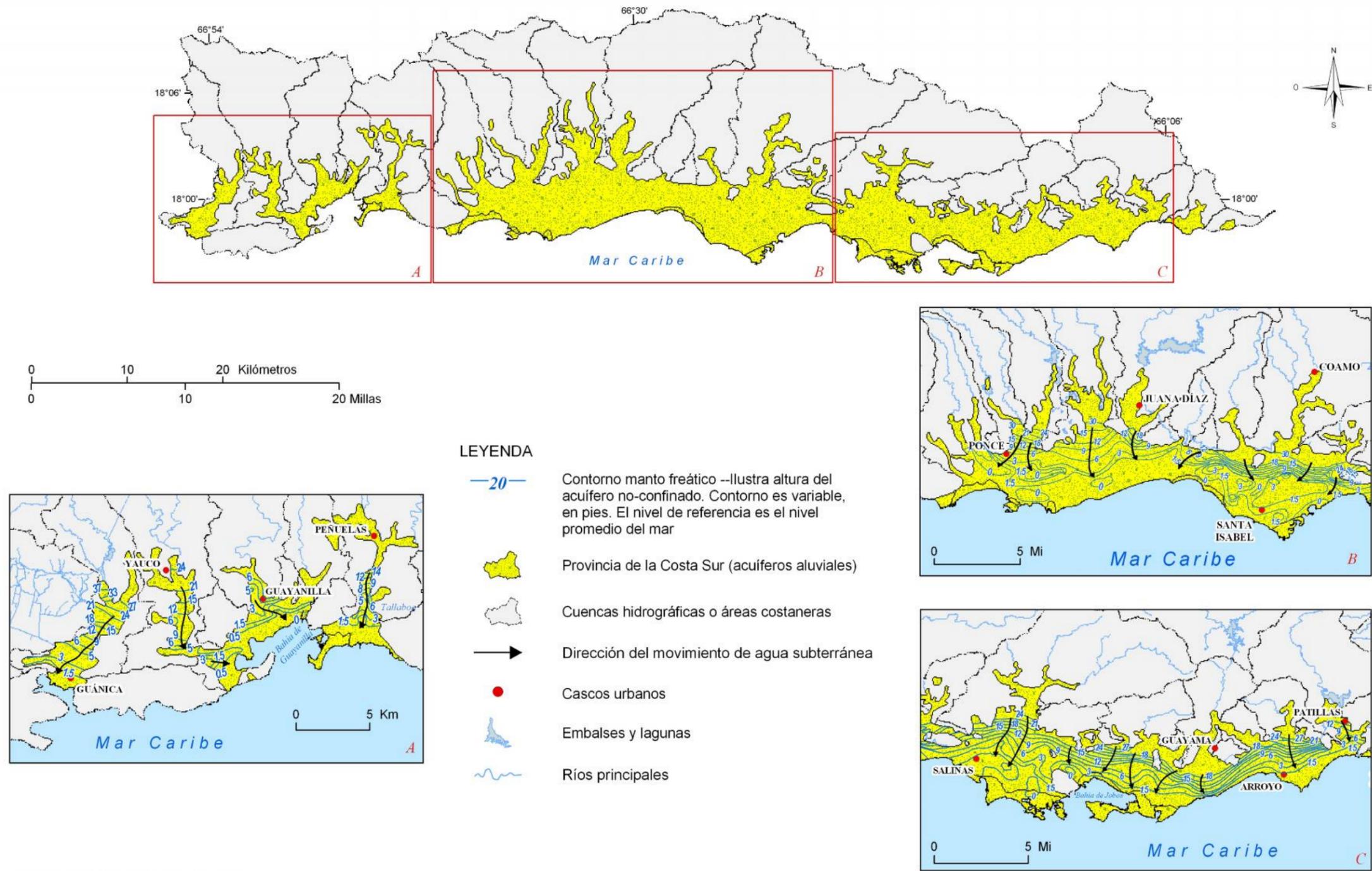
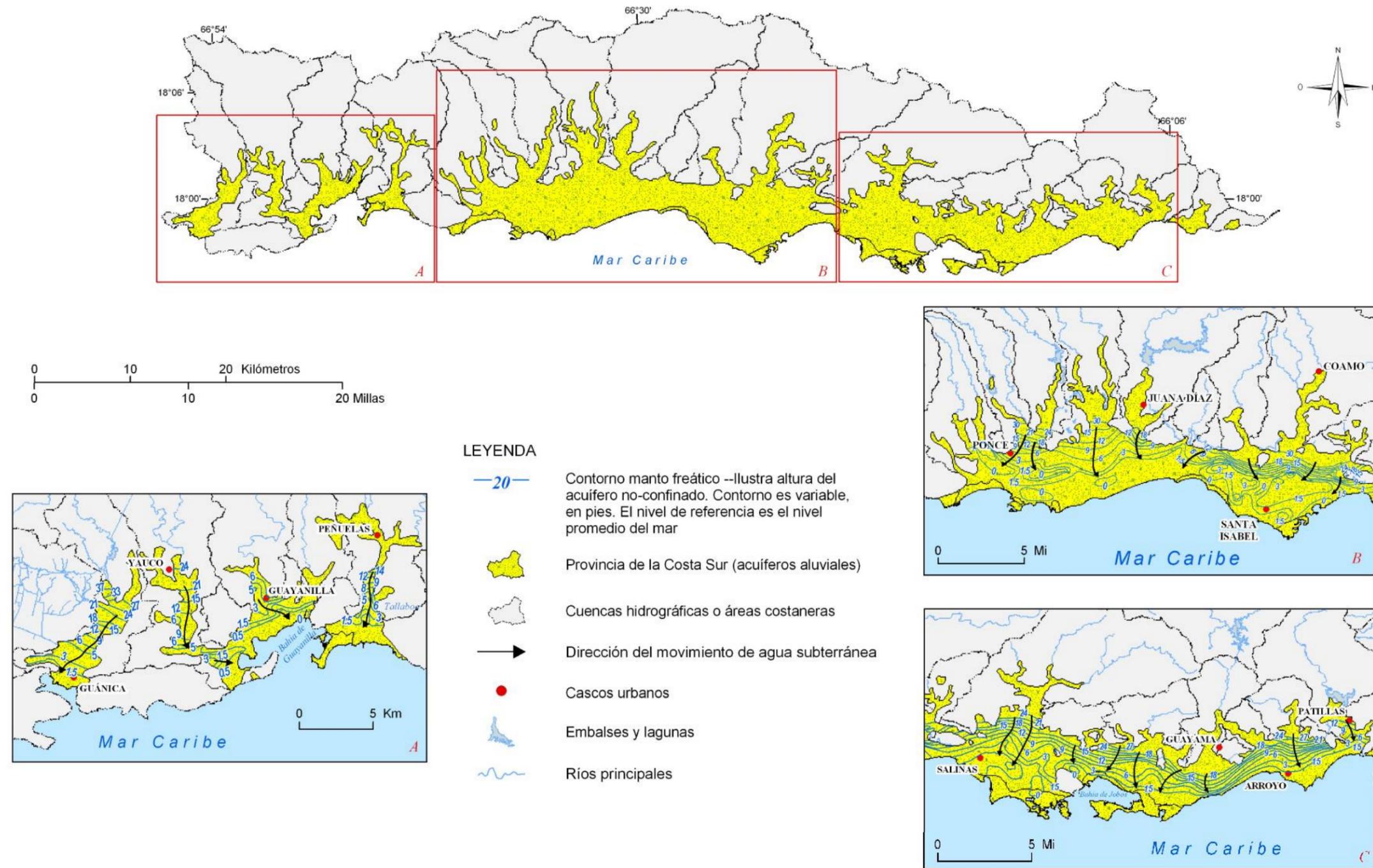


Figura 6-14. Sección transversal generalizada del acuífero aluvial de la Provincia del Sur. (Refiérase a la Figura 6.19, para localización de la sección).



Fuente: Servicio Geológico Federal, 1980

Figura 6-15 Mapa potenciométrico de condiciones hidrológicas existentes durante la sequía de 1968 en la Región Sur de Puerto Rico (Gómez-Gómez, 1980).



Fuente: Servicio Geológico Federal, 1980

Figura 6-20. Mapa potométrico de condiciones hidrológicas existentes durante 1986, Región Sur de Puerto Rico (USGS, 1987).