

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO PARA UNA PARCELA DE 329 CUERDAS EN EL BO. AQUIRRE, SALINAS, PUERTO RICO

Sometido a:

VCI CONSTRUCTION INC

Preparado por:



Angel Román-Más, MS, PH, PHg

PO Box 11850 MSC-582

San Juan Puerto Rico 00922-1850

Tel: (787) 759-8000

Mobil: (787) 406-6962

e-mail: romas@coqui.net

29 de marzo del 2006

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO PARA UNA PARCELA DE 329 CUERDAS EN EL BO. AQUIRRE, SALINAS, PUERTO RICO

Por

Angel Román-Más, MS, PH, PHg

Tabla de Contenido

1.0	Resumen	2
2.0	Introducción	4
3.0	Localización y Rasgos Fisiograficos	6
4.0	Geología y Litología	9
5.0	Hidrogeología	14
6.0	Condiciones Hidrogeológicas Existentes	20
7.0	Uso y Disponibilidad de Agua del Acuífero	30
8.0	Conclusiones	32
9.0	Bibliografía	33

Figuras

Figura 4.0a	Localización del Área del Proyecto
Figura 5.0a	Geología del Área del Proyecto
Figura 5.0b	Tope del Regolito y Fallas Inferidas en el Abanico Aluvial de Salinas
Figura 5.0c	Geología para el Abanico Aluvial de Salinas
Figura 5.0d	Por ciento de Arena en los Depósitos Aluviales del Abanico de Salinas
Figura 6.0a	Relación de Formaciones Geológicas y Capas Hidrológicas Utilizadas para Modelar los Acuíferos de la Región de Santa Isabel – Patillas
Figura 6.0b	Niveles Potenciométricos en Pies Sobre el Nivel Promedio del Mar para el Acuífero Principal del Abanico Aluvial de Salinas, Marzo 1986
Figura 7.0a	Niveles Potenciométricos en Pies Sobre el Nivel Promedio del Mar para el Acuífero Principal del Abanico Aluvial de Salinas, Junio del 2001
Figura 7.0b	Pozos Localizados Abanico Aluvial de Salinas que Tienen Datos de Niveles de Agua para los Años de 1986 al 2005
Figura 7.0c	Relación de Niveles Potenciométricos Reportados por Rodríguez 2006 y los Reportados en los Archivos Electrónicos del USGS
Figura 7.0d	Niveles de Agua para Varios Pozos de Observación en el Acuífero Principal del Abanico de Salinas
Figura 7.0e	Niveles de Agua para Varios Pozo Observación y Precipitación para la Estación Metereológica de Central Aguirre
Figura 7.0f	Niveles Potenciométricos en Pies Sobre el Nivel Promedio del Mar para el Acuífero Principal del Abanico Aluvial de Salinas, Julio del 2003

Tablas

Tabla 6.0a	Relación de Formaciones Geológicas y Capas Hidrológicas Utilizadas para Modelar los Acuíferos de la Región de Santa Isabel - Patillas
Table 8.0a	Uso de Agua en el Municipio de Salinas Según el Inventario de Uso de Agua del USGS para el Año 2000.
Tabla 8.0b	Resultados del estudio de necesidad producción de agua para Puerto Rico para el año 2050 en el Municipio de Salinas

1.0 RESUMEN

VCI Construction (VCI) ha propuesto el desarrollo de 967 unidades de vivienda unifamiliar de interés social en una finca de su propiedad localizada en el kilómetro 152.7 de la Carretera Estatal PR-3 en el Barrio Aguirre del Municipio Salinas. El área del proyecto está localizada en el límite Este del Abanico Aluvial de Salinas. Los Depósitos Aluviales presentes en abanico contienen varios acuíferos los cuales suplen la totalidad de la demanda de agua para uso doméstico y gran parte de la demanda de agua para uso agrícola en el Municipio de Salinas. Además, el insumo de agua fresca asociado a estos acuíferos es vital a los sistemas ecológicos presentes en la Reserva Nacional de Investigación Estuarina de la Bahía de Jobos (JOBANER por sus siglas en Inglés).

En respuesta a la consulta que hiciera VCI sobre la disponibilidad de agua potable para suplir la demanda del proyecto, la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA) indicó que el desarrollador deberá hacer las aportaciones económicas pertinentes para la activación de varios pozos en el área. Posición que esta en directa contradicción con a la política adoptada por el DRNA. Conciente de la controversia sobre estos acuíferos, VCI contrató los servicios de RMA Environmental para llevar a cabo un estudio hidrogeológico del área del proyecto y del Abanico Aluvial de Salinas. Los objetivos de este estudio eran:

1. Determinar el impacto que el proyecto pudiese tener sobre estos acuíferos e identificar,
2. Evaluar medidas o modificaciones al proyecto que eviten cualquier impacto a estos acuíferos y
3. Determinar si el acuífero tiene la capacidad para suplir la demanda de agua del proyecto.

Como parte de este estudio RMA revisó (1) la literatura disponible sobre la geología e hidrogeología del área, (2) los record electrónicos de niveles y calidad de agua del Servicio Geológico Federal (USGS por sus siglas en Ingles), (3) los inventarios de pozos de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados, del Departamento de Recursos Naturales y el USGS y (4) los datos históricos de uso de agua de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados, el USGS y la Autoridad de Tierras.

A continuación se resumen los hallazgos más relevantes de este estudio.

- El principal mecanismo de recarga a este acuífero lo es la infiltración directa de la lluvia la cual representa cerca 36.41 por ciento de la recarga total.
- Cualquier actividad que resulte en impermeabilización de los terrenos tendrá un impacto significativo en la recarga al acuífero.
- Actividades que resulten en impermeabilización de terrenos tienen que adoptar las medidas necesarias para garantizar la recarga de la lluvia al acuífero principal (sistema de infiltración).
- Las áreas más sensitivas del acuífero y donde se pudiera ocurrir intrusión de agua salobre lo son: (1) el cono de depresión que se registra en la región central del Abanico Aluvial de

Salinas y que aparenta estar asociado a extracciones para usos agrícolas y (2) el cono de depresión que se registra al Noreste de Central Aguirre y que aparenta estar asociado con una batería de pozos operados por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados.

- Los niveles de agua reportados en el análisis sinóptico de julio del 2000 no son consistentes con los niveles de agua encontrados en los archivos electrónicos del USGS
- No hay un patrón histórico de recesión en el nivel freático del acuífero principal en el abanico aluvial de Salinas.
- Fluctuaciones significativas en los niveles de agua son observadas en función de la lluvia, los ritmos de extracción y la distancia entre el pozo y los principales centros de extracción.
- La recuperación en los niveles de agua depende de la recarga de las lluvias en particular durante eventos extraordinarios.
- El nivel freático en el área donde se propone construir el proyecto no ha experimentado las severas recesiones en los niveles de agua que otras áreas de acuífero principal en el Abanico Aluvial de Salinas han registrado.
- El nivel freático en el Acuífero Principal del Abanico Aluvial de Salinas alcanzó su nivel más bajos en julio del 2003.
- Las extracciones presentes exceden el rendimiento seguro durante eventos de sequía del Acuífero Principal del Abanico Aluvial de Salinas.
- El Acuífero Principal del Abanico Aluvial de Salinas no debe ser considerado para suplir las necesidades del proyecto.

2.0 INTRODUCCIÓN

VCI Construction (VCI) ha propuesto el desarrollo de 967 unidades de vivienda unifamiliar de interés social en una finca de su propiedad localizada en el kilómetro 152.7 de la Carretera Estatal PR-3 en el Barrio Aguirre del Municipio Salinas. La finca tiene una cabida total de 1.293 km² (329 cuerdas). Unos 653,074.53 m² (166.2 cuerdas) de la cabida total serán desarrollados. Las restante 0.661 km² (162.8 cuerdas) serán dedicadas a: (1) servidumbre de la Autoridad de Energía Eléctrica 383,292 m² (97.5 cuerdas), (2) área de conservación asociada a una quebrada sin nombre 111,310 m² (28.3 cuerdas) y (3) reserva arqueológica 1,583 m² (0.4 cuerdas), (3) área de conservación asociada al Cerro Sabater 143,852 m² (36.6 cuerdas).

El área del proyecto está localizada en el límite Este del Abanico Aluvial de Salinas. Los Depósitos Aluviales presentes en abanico contienen varios acuíferos los cuales suplen la totalidad de la demanda de agua para uso doméstico y gran parte de la demanda de agua para uso agrícola en el Municipio de Salinas. Además, el insumo de agua fresca asociado a estos acuíferos es vital a los sistemas ecológicos presentes en la Reserva Nacional de Investigación Estuarina de la Bahía de Jobos (JOBANER por sus siglas en Inglés).

Los resultados de un inventario sinóptico de niveles de agua llevado a cabo por la División de Agua del Servicio Geológico Federal (USGS por sus siglas en Ingles) en julio del 200, llevaron al Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA) a concluir que existe un riesgo inminente de que la cuña de agua salada se este moviendo tierra adentro en el Acuífero Principal del Abanico Aluvial de Salinas con repercusiones nefasta a la calidad del agua del acuífero para uso doméstico y el en particular a los humedales presentes en JOBANER. A estos efectos, el DRNA ha adoptado una política de no permitir extracciones adicionales de agua de este acuífero.

En respuesta a la consulta que hiciera VCI sobre la disponibilidad de agua potable para suplir la demanda del proyecto, la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA) indicó que el desarrollador deberá hacer las aportaciones económicas pertinentes para la activación de varios pozos en el área. Posición que esta en directa contradicción con a la política adoptada por el DRNA.

Conciente de la controversia sobre estos acuíferos, VCI contrató los servicios de RMA Environmental para llevar a cabo un estudio hidrogeológico del área del proyecto y del Abanico Aluvial de Salinas. Los objetivos de este estudio eran:

1. Determinar el impacto que el proyecto pudiese tener sobre estos acuíferos e identificar,
2. Evaluar medidas o modificaciones al proyecto que eviten cualquier impacto a estos acuíferos y
3. Determinar si el acuífero tiene la capacidad para suplir la demanda de agua del proyecto.

Como parte de este estudio RMA revisó (1) la literatura disponible sobre la geología e hidrogeología del área, (2) los record electrónicos de niveles y calidad de agua del Servicio Geológico Federal (USGS por sus siglas en Ingles), (3) los inventarios de pozos de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados, del Departamento de Recursos Naturales y el USGS y (4) los datos históricos de uso de agua de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados, el USGS y la Autoridad de Tierras.

4.0 LOCALIZACIÓN Y RASGOS FISIAGRÁFICOS

En términos geográficos el área del proyecto está localizada en el límite Este del Abanico Aluvial de Salinas (Figura 4.0a). El Abanico Aluvial de Salinas se extiende desde el límite con las colinas de piemonte al Norte hasta el sistema de mangle de la Bahías de Jobos y desde el Río Nigua de Salinas hasta la Bahía de Jobos. Históricamente, el Abanico Aluvial de Salinas así como el resto de los valles localizados en la Costa Este de Puerto Rico ha sido dedicado intensamente a la agricultura. Al igual que en otras áreas agrícolas de Puerto Rico el cultivo principal de este valle lo fue la caña de azúcar. A partir de los años setenta, el cultivo de vegetales y frutos menores desplazó a la caña de azúcar. Por otro lado, algunos de los terrenos dedicados históricamente al cultivo de la caña son actualmente utilizados para el pastoreo de ganado vacuno y de leche.

El Abanico Aluvial de Salinas es parte de la Región Santa Isabel – Patillas (Figura 4.0b). Esta región es parte de la Provincia de la Costa Sur de Puerto Rico. La Región Santa Isabel – Patillas comprende un área de 233 kilómetros cuadrados (km²) (90 millas cuadradas, mi²) y esta limitada al Norte por la Cordillera Central, al Sur por el Mar Caribe al Este por el límite de la cuenca del Río Grande de Patillas, y al Oeste por el límite de la cuenca del Río Descalabrado. Los rasgos fisiográficos más relevantes de esta región lo son las colinas de piemonte, varios ríos y canales de riego, las planicies aluviales y el estuario de la Bahía de Jobos.

Las colinas de piemonte ocupan dos terceras partes de la región a partir de su límite Norte. La base de las colinas surge a una elevación de aproximadamente 30.5 m (100 ft) sobre el nivel promedio del mar y sus cimas alcanzan los 500m (1640ft) sobre el nivel promedio del mar. Las pendientes de estas colinas son escarpadas y fluctúan entre 10 y 20 por ciento. La población esta limitada a comunidades rurales y la actividad es escasa y se concentra en el cultivo de frutos menores.

Las planicies aluviales representan cerca de una tercera parte del área total de la región y se extienden y se extiende desde la base de las montañas donde el terreno alcanza elevaciones de 30.5 m (100 ft) sobre el nivel promedio del mar, hasta el Mar Caribe donde los terrenos apenas sobrepasan el nivel promedio del mar. En estas Planicies se han identificado 4 abanicos aluviales: Santa Isabel, Salinas, Jobos y Arroyo. En las planicies aluviales se encuentran las principales ciudades y la mayoría de la población del área. La actividad agrícola y las pocas industrias que existen en la región también están concentradas en las planicies aluviales. La vegetación original del valle fue eliminada para cultivar las tierras. La única excepción, lo son los bosques de mangle que se encuentran en terrenos anegados cercanos a la costa.

Los principales ríos del área de Esta a Oeste son: Río Grande de Patillas, Río Nigua de Arroyo, Río Guamaní, Río Seco, Río Nigua de Salinas, Río Guayes, Río Cayeres, Río Coamo, Río Cuyón, Río Lapa, Río Descalabraó y Río Cañas. En términos generales estos Ríos fluyen en dirección Sur – Suroeste. Los canales de riego Patillas y Guamaní se alimentan de los Lagos Patillas y Guavate respectivamente. Estos canales fluyen en dirección Oeste se extienden hasta cerca del límite Este del Pueblo de Salinas. El canal de riego Juana Díaz toma aguas del lago Toa Vaca y fluye en dirección Este.

La Reserva Nacional de Investigación Estuarina de la Bahía de Jobos (JOBANERR por sus siglas en Inglés) comprende un área aproximada de 1,140 hectáreas (2,800 acres). En JOBANERR se han identificados dos áreas principales: (1) Mar Negro, en el margen occidental de la Bahía y (2) al sudeste, Cayos Caribe, una cadena de 15 islotes en forma de lágrimas. El área de Mar Negro comprende la mayor parte de la Reserva y consiste en bosque de mangles y un sistema complejo de lagunas y canales intercalado de salitrales, lechos de yerbas marinas y arrecifes.

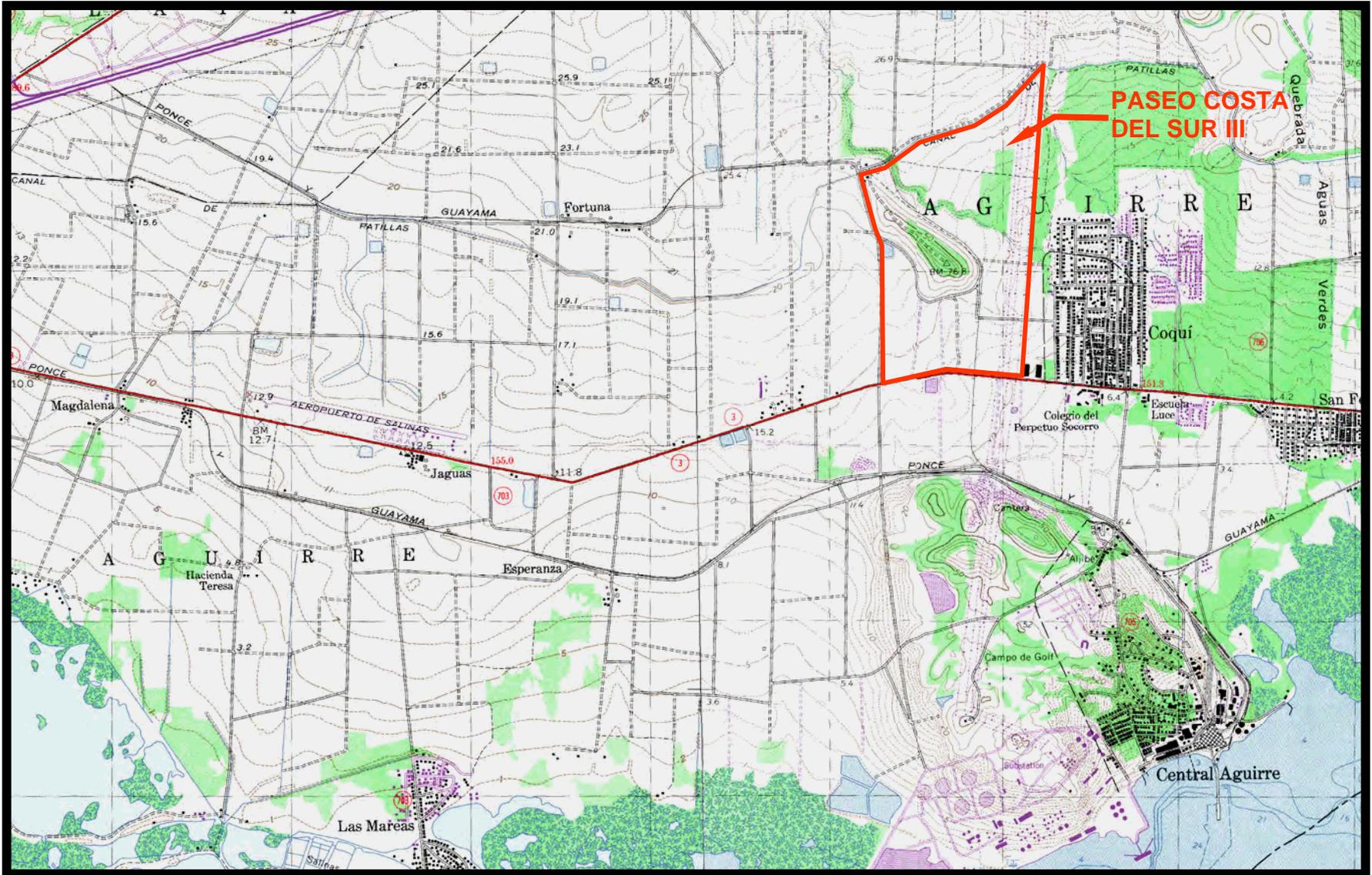


Figura 4.0a.-- Localización del Área del Proyecto
 (USGS Cuadrángulo Topográfico de Central Aguirre, Escala 1:20,000)

Estudio Hidrogeológico
 Paseo Costa del Sur III
 Bo. Aguirre, Salinas, Puerto Rico

5.0 GEOLOGÍA Y LITOLOGÍA

El mapa geológico para el cuadrángulo de Central Aguirre (Berryhill, Jr., 1960) indica que en el área del proyecto existen depósitos asociados con el Abanico Aluvial de Salinas (Cuaternario) y rocas de la Formación Coamo (Cretaceo) (Figura 5.0a). A continuación se presenta una breve descripción de estos depósitos. Las descripciones a continuación han sido adaptadas de Berryhill, Jr. (1960).

Abanicos Aluviales (Qf/Qfs): Cienos, arcillas, arena, grava, piedras y bolos estratificados no consolidados; mayormente piedras y bolos en la parte alta del abanico aluvial; mayormente cienos, arcillas y arenas en mitad Sur del abanico. Áreas con alto contenido de sal han sido identificadas como Qfs.

Formación Coamo (Kcol/Kcos) Predominantemente calizas de color gris claro, Kcol; incluye algunas areniscas cuyo color fluctúa entre gris oliva claro y amarillo grisáceo.

Renken y otros (1991) ha argumentado que el espesor y la granulometría de los depósitos aluviales esta controlada por el tope del regolito¹. El cual a su vez esta controlado por el sistema de fallas presentes en el abanico aluvial y los patrones de levantamientos y depresiones ("horst and graben blocks") en la roca volcánica (Figura 5.0b y 5.0c). Estos patrones hacen que el tope del regolito en el límite norte del predio se encuentre al nivel promedio del mar incrementando su profundidad hacia el , mientras que en el lado de la depresión el tope del Regolito se encuentra entre 76.22 y 91.46 m (250 y 300 ft) por debajo del nivel promedio del mar. Renken y otros (1991) han estimado que el contenido de arena de los depósitos aluviales en el área del proyecto fluctúa entre 20 y 40 por ciento, lo cual es relativamente alto (Figura 5.0d).

¹ Capa superior de las rocas volcánicas la cual esta altamente interperizada.

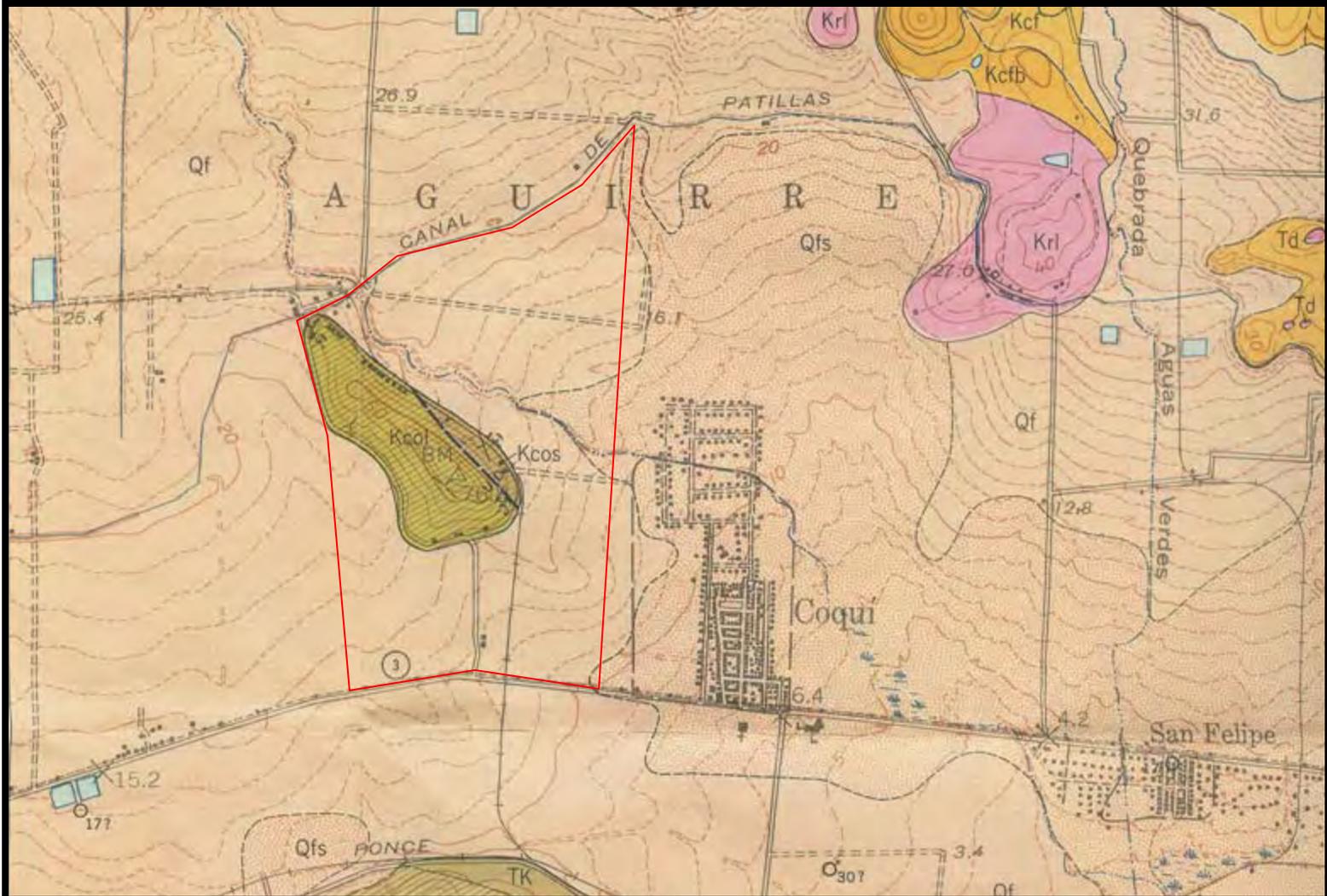
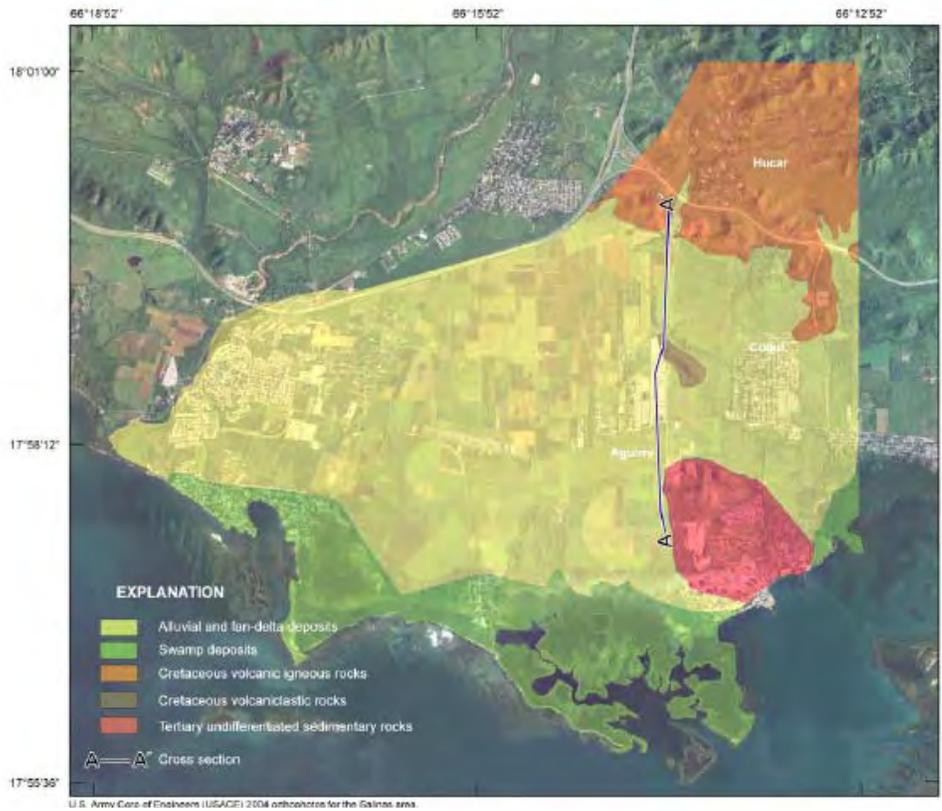


Figura 5.0a.—Geología del Área del Proyecto
(Adaptado de Beryhill y Glover, 1960)

Estudio Hidrogeológico

Paseo Costa del Sur III
Bo. Aguirre, Salinas, Puerto Rico



Berryhill and Glover, 1960; Glover, 1961).

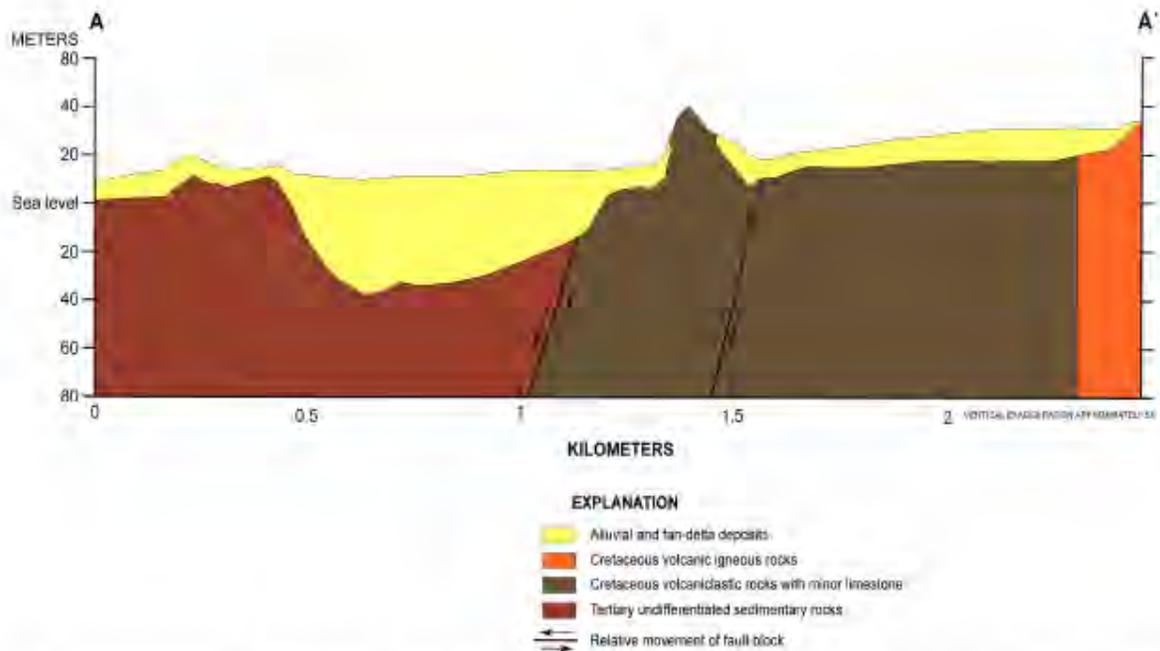


Figura 5.0c.—Geología para el Abanico Aluvial de Salinas
(Adaptado de Rodríguez, 2006)

Estudio Hidrogeológico
Paseo Costa del Sur III
Bo. Aguirre, Salinas, Puerto Rico

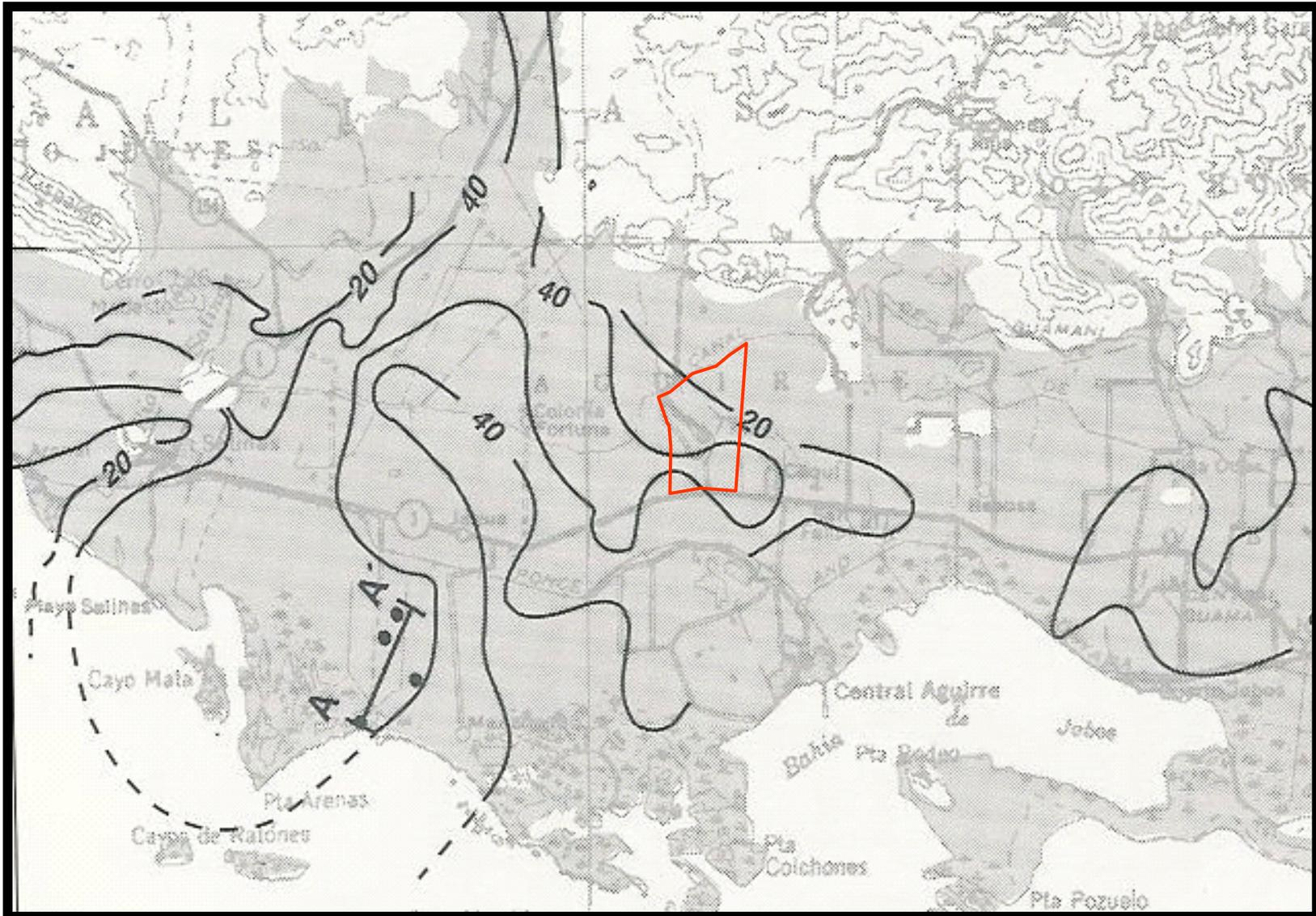


Figura 5.0d.— Por ciento de Arena en los Depósitos Aluviales del Abanico de Salinas
 (Adaptado de Renken y Otros, 1991)

Estudio Hidrogeológico
 Paseo Costa del Sur III
 Bo. Aguirre, Salinas, Puerto Rico

6.0 HIDROGEOLOGÍA

El área del proyecto esta localizada en el límite Este del Abanico Aluvial de Salinas. Este abanico aluvial es uno de tres que comprenden la Región de Santa Isabel – Patillas. Esta Región es parte de la Provincia Hidrogeológica conocida como las Planicies Aluviales de la Costa Sur de Puerto Rico. La hidrogeología de esta región es relativamente compleja y de acuerdo a Quiñónez-Aponte y otros (1996) la litología de los depósitos aluviales parecen ser el control principal. Quiñónez-Aponte y otros (1996) identifica tres secuencias litológicas que componen las unidades hidrogeológicas más importantes de la Región. Estas unidades son: (1) el Acuífero Freático Costero, (2) el Acuífero Principal y (3) el Regolito (Tabla 6.0a y Figura 6.0a). A continuación se resumen la descripciones de estas unidades que presentaran Quiñónez-Aponte y otros (1996).

1. El "Acuífero Freático Costero" consiste de depósitos de arena, grava y arcilla y una capa confinante de arcillas. Esta unidad hidrogeológica ocurre a lo largo de la costa y se extiende tierra adentro desde 1.6 km (1 milla) en el área de Bahía Jobos hasta 6.4 km (4 millas) en el área del abanico deltaico de Salinas. Esta unidad hidrogeológica incluyendo la capa confinante se encuentra desde la superficie del terreno hasta 22.87 m (75 ft) por debajo de la superficie del terreno a lo largo de la costa y hasta 12.20 m (40 ft) en su límite norte. El espesor de la capa confinante es de 12.20 m (40 ft). La presencia de esta capa de arcilla hace que condiciones artesianas puedan ser observadas en este acuífero especialmente a lo largo de la costa. La conductividad hidráulica de este acuífero fue estimada por Quiñónez-Aponte et al (1996) en 6.10 metros por día (m/d) (20 pies por día, ft/d). La conductividad hidráulica de la capa confinante fue estimada en 0.082 (m/d) (0.27 ft/d). El acuífero freático costero no representa una fuente importante de agua para uso agrícola o público. Su uso, está limitado a pozos domésticos con una producción de 0.0189 a 0.0379 metros cúbicos por minutos (m^3/min) (5 a 10 galones por minuto, gpm). Sin embargo esta unidad es extremadamente importante en mantener las descargas de aguas frescas a los humedales estuarinos que ocurren en la costa.
2. El "Acuífero Principal" consiste de abanicos deltaicos y depósitos aluviales. Aunque la extensión geográfica de este acuífero está delimitada por la presencia de depósitos aluviales expuestos a la superficie, Quiñónez-Aponte et al (1996) identifica tres áreas donde este acuífero posee características particulares a esta área. Estas son (1) el Abanico Aluvial-Deltaico de Salinas, (2) el Abanico Deltaico de Jobos y (3) el Abanico Aluvial-Deltaico de Arroyo. El área donde se propone construir el proyecto localizados en el límite Este del Abanico Aluvial-Deltaico de Salinas y extraen agua de la unidad hidrogeológica identificada como el Acuífero Principal. El espesor de este acuífero es variable y esta controlado por los patrones de levantamientos y depresiones ("horst and graben blocks") perpendiculares a la gran falla del Sur de Puerto Rico.

En el área del Abanico de Salinas el espesor del Acuífero Principal fluctúa entre 15.24 m (50 ft) en su límite norte cercano al contacto de los depósitos aluviales con las rocas volcánicas y 106.71 m (350ft) cerca del centro del Abanico de Salinas donde ocurren las depresiones asociadas con las fallas en la roca volcánica (Renken y otros, 1991). En el área donde se propone construir el proyecto el espesor del Acuífero Principal fluctúa entre 15.24 y 91.46 m (50 y 300 ft).

La conductividad hidráulica del Acuífero Principal en el Abanico de Salinas fluctúa entre 6.10 y 152.44 m/d (20 y 500 ft/d) y está controlado por la presencia de arena y grava en los depósitos aluviales (Quiñónez-Aponte y otros, 1996). Las conductividades hidráulicas más altas se registran cerca del centro del Abanico de Salinas, al Sureste del Río Nigua, donde estas alcanzan los 152.44 m/d (500 ft/d). En dirección a la costa, las conductividades hidráulicas disminuyen relativamente poco, fluctuando entre 60.98 y 91.46 m/d (200 y 300 ft/d). En el límite norte de acuífero, cercano al contacto de los depósitos aluviales con las rocas volcánicas, las conductividades hidráulicas son significativamente menores alcanzando apenas los 6.10 m/d (20ft/d). En el área donde se propone construir el proyecto la conductividad hidráulica es de 6.10 m/d (20ft/d).

De acuerdo a Quiñónez-Aponte y otros (1996), el principal mecanismo de recarga a este acuífero lo es la infiltración directa de la lluvia la cual representa cerca 36.41 por ciento de la recarga total. Por lo tanto que cualquier actividad que resulte en impermeabilización de los terrenos. Esto Hace imperativo que proyectos como el propuesto adopte las medidas necesarias para garantizar la recarga de la lluvia al acuífero principal. Los ríos en sus tramos más aguas arriba cerca del límite norte del acuífero y los canales de riego contribuyen 18.56 y 23.06 por ciento, respectivamente, de la recarga total. Finalmente las aguas utilizadas para irrigar los campos aporta 21.97 por ciento de la recarga total a este acuífero. El mecanismo de descarga más importante de este acuífero lo son las extracciones mediante pozos las cuales representan el 52.43 por ciento de la descarga total. Las descargas de agua subterráneas en los tramos más aguas debajo de los ríos cerca de la costa, en el lecho del mar y en las tierras pantanosas localizadas en la costa representan 7.89, 9.22 y 22.94, respectivamente, de la descarga total de este acuífero. Finalmente, la evapotranspiración constituye un 7.52 por ciento de la descarga del acuífero.

Los mapas potenciométricos preparados por Torres González y Gómez-Gómez (1987) y Quiñónez-Aponte y Gómez-Gómez (1987) muestran que el nivel freático en el acuífero principal para marzo del 1986, fluctúa entre 45.73 y 60.98 m (150 a 200 ft) sobre el nivel promedio del mar en el área de contacto entre las rocas volcánicas y los depósitos aluviales en el límite Norte del

acuífero y 1 m (3.28 ft) sobre el nivel promedio del mar cerca de la costa en el límite Sur del acuífero. En el área del Abanico de Salinas el nivel freático fluctúa entre 15.24 m (50 ft) en el límite Norte del Acuífero Principal y 1.52 m (5 ft) en el límite Sur del Acuífero Principal (Figura 6.0b). Al Noreste de Central Aguirre se puede observar un cono de depresión en el nivel freático. El mismo está asociado con una batería de pozos operados por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados a través de la cual en 1986 se extraían alrededor de 103,142 metros cúbicos diarios (m^3/d) (4 millones de galones diarios, mgd). En el área donde se propone construir el proyecto, el nivel freático es alrededor de 6.10 m (20 ft) por encima del nivel promedio del mar. De acuerdo a los patrones en los niveles de agua incluidos en el mapa potenciométrico, el flujo es en dirección Sur hacia el Mar Caribe y sigue de cerca los contornos topográficos. El mapa señala que en la mitad norte de las planicies aluviales los ríos pierden agua hacia el acuífero. En la mitad sur, cerca de la costa, el flujo de agua es del acuífero hacia los ríos.

El acuífero principal es altamente productivo y suple la mayor parte del agua requerida en la región para usos agrícolas y domésticos incluyendo los de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico. Pozos en este acuífero producen entre 0.3785 y 10.22 m^3/min (100 y 2,700 gpm). La calidad de las aguas en el acuífero principal es apta para usos doméstico, agrícola e industrial. Sin embargo, en algunas áreas cercanas a la costa, las concentraciones de sales en particular de cloro y sodio pueden ser relativamente altas debido a la intrusión de aguas salobres provenientes del mar. En estos lugares las aguas del acuífero no son aptas para consumo humano.

3. El "Regolito" consiste de rocas volcánicas altamente interperizadas. Esta unidad hidrogeológica es la más profunda. El tope de esta unidad está controlada por los patrones de levantamientos y depresiones perpendiculares a la gran falla del Sur de Puerto Rico (horst and graben blocas). Esta unidad está expuesta en el límite Norte de los depósitos aluviales y ocupa las planicies entre las colinas de piemonte al Sur de la Cordillera Central. El mecanismo de recarga principal a esta unidad hidrogeológica es la infiltración directa de la lluvia. Quiñónez-Aponte et al (1996) estimó la transmisividad de este acuífero en 93 m^2/d (1,000 ft^2/d). Muy pocos pozos han sido hincados en esta unidad. Los pozos que se han completado en este acuífero producen alrededor de 0.3785 m^3/min (100 gpm).

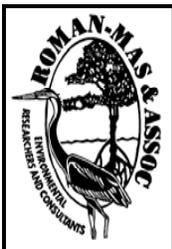
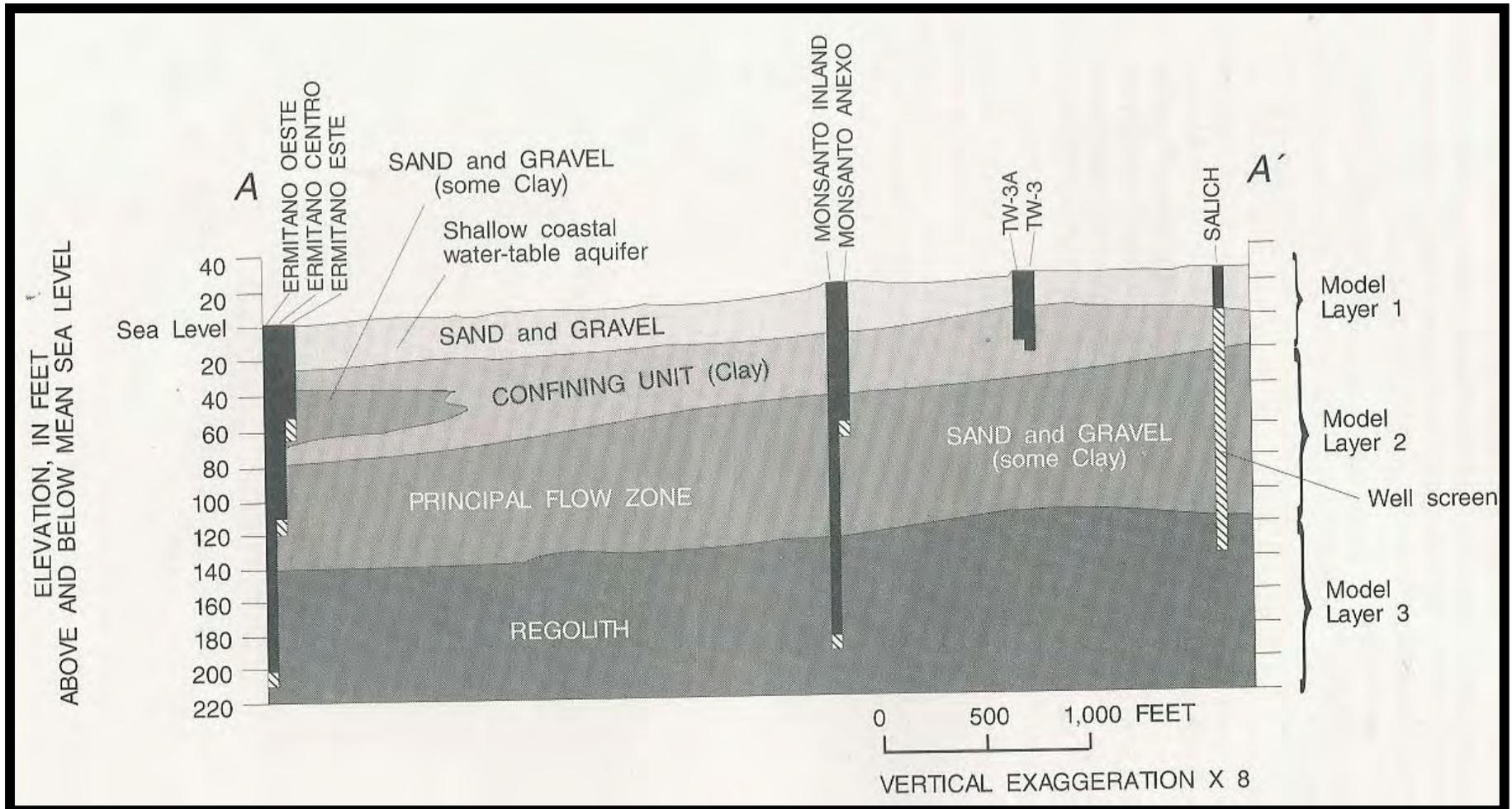


Figura 6.0a— Relación de Formaciones Geológicas y Capas Hidrológicas Utilizadas para Modelar los Acuíferos de la Región de Santa Isabel - Patillas

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO
Paseo Costa del Sur III
Bo. Aguirre, Salinas, Puerto Rico

Tabla 6.0a—Relación de Formaciones Geológicas y Capas Hidrológicas Utilizadas para Modelar los Acuíferos de la Región de Santa Isabel - Patillas

SYSTEM	SERIES	GEOLOGIC UNIT	GEOHYDROLOGICAL UNIT	MODEL LAYER	
Quaternary	Holocene	Mangrove swamp, beach, tidal and supratidal flat deposits	Shallow coastal water table and confining clay	Model layer 1	
	Pleistocene	Fan-delta and alluvial deposits	Principal flow zone (unconsolidated deposits)	Model layer 2	
Tertiary	Pliocene	Alluvial deposits infilling graben structures			
	Miocene	Upper	Volcanic, volcaniclastic, siltstone, minor limestone, and igneous rocks of Cretaceous to Tertiary age	Regolith	Model layer 3 (unknown thickness)
		Middle			
		Lower			
	Oligocene	Upper			
		Middle			
		Lower			
	Eocene				
Paleocene					
Cretaceous	Upper				
	Lower				

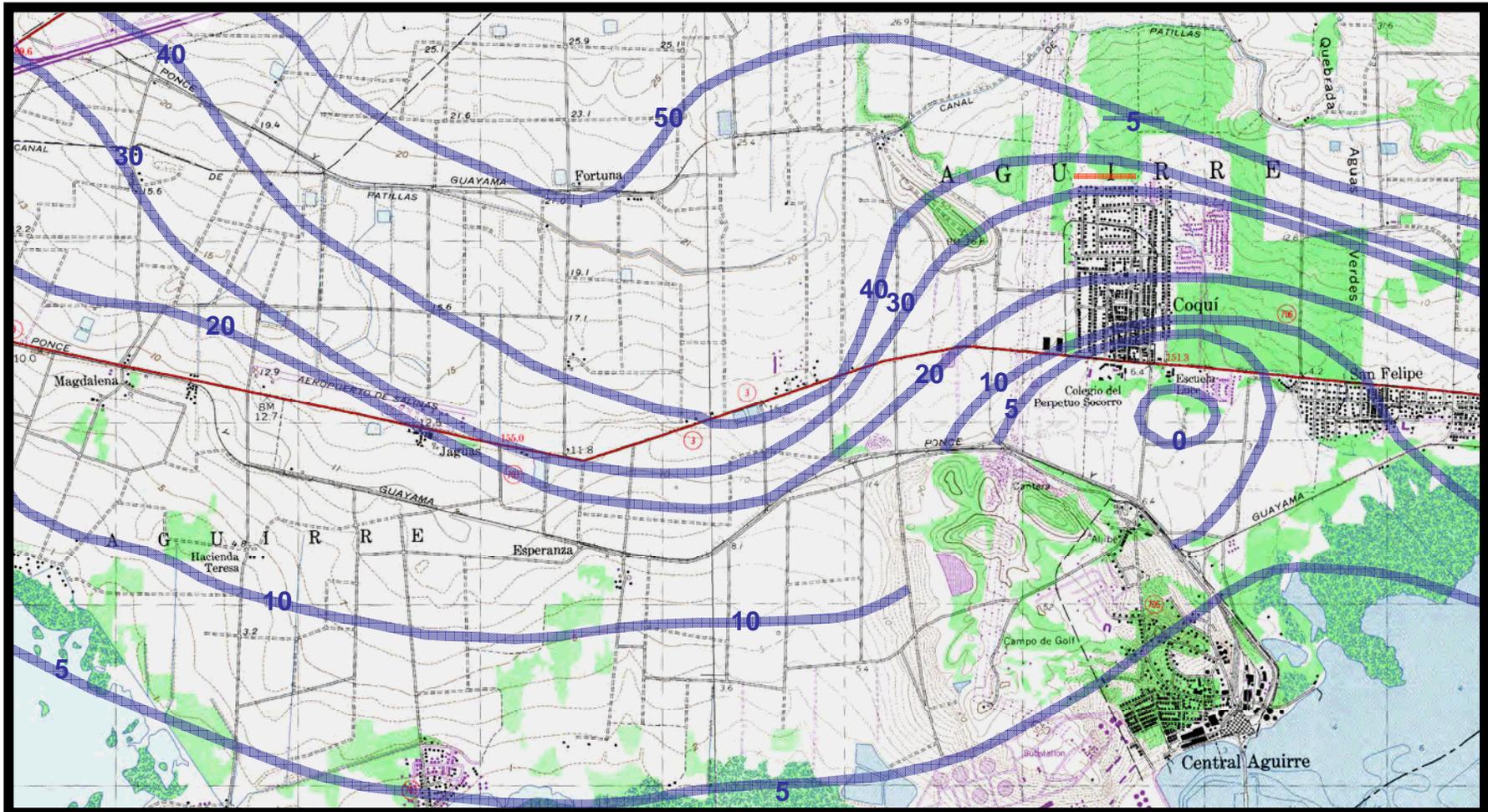


Figura 6.0b— Niveles Potenciométricos en Pies Sobre el Nivel Promedio del Mar para el Acuífero Principal del Abanico Aluvial de Salinas, Marzo 1986

(Adaptado de Quiñones-Aponte y Gómez-Gómez, 1987, USGS WRI 87-4161, Salinas y Torres-González y Gómez-Gómez, 1987, USGS WRI 87-4160, Central Aguirre)

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO

Paseo Costa del Sur III
Bo. Aguirre, Salinas, Puerto Rico



7.0 CONDICIONES HYDROGEOLOGICAS EXISTENTES

En julio del 2000, la División de Recursos de Agua del Servicio Geológico Federal (“USGS” por sus siglas en Inglés) llevó a cabo un inventario sinóptico de los niveles de agua en Acuífero Principal para el área del Abanico de Salinas. Este inventario es parte de un estudio que realizara el Hidrólogo José M. Rodríguez del USGS, sobre la presencia de nitrato en las aguas subterráneas para el área de Salinas (Figura 7.0a).

El inventario sinóptico señala la presencia de dos conos de depresión en el nivel freático al Sur de la Carretera Estatal PR-3. Estos conos (Este y Oeste) se han solapado, creando una gran depresión en el nivel freático muy cerca del centro geográfico del Abanico Aluvial de Salinas. En esta área, el nivel freático ha alcanzado una elevación de 1.52 m (-5 ft) por debajo del nivel promedio del mar. Nótese que esta depresión en el nivel freático no se registró en el mapa potenciométrico desarrollado Quiñones-Aponte y Gómez-Gómez para marzo de 1986. Esto implica una reducción en el nivel freático en esta área de cerca de 6.10 m (20 ft) con respecto a los niveles reportados en marzo de 1986. La localización de los centros de los cono de depresión, corresponden con la localización de pozos de la Autoridad de Tierras utilizados para alimentar sistemas de riego radiales (Figura 7.0a). Se ha asumido que estos son directamente responsables por la recesión observada en los niveles de agua.

El inventario sinóptico de julio del 2000, en comparación con el de marzo de 1986, muestra que el cono de depresión al Noreste de Central Aguirre asociado con una batería de pozos operados por la AAA ha avanzado hacia el Noroeste. Dando la impresión de que este cono podría solaparse con el cono Este en el centro del Abanico Aluvial de Salinas. De acuerdo al inventario de niveles de agua para marzo de 1986, en el área d al Noreste de Central Aguirre el nivel freático se encontraba alrededor de 6.10 m (20 ft) por encima del nivel promedio del mar. Para julio del 2000, el nivel freático se encontraba entre de 6.10 y 3.28 m (20 y 10 ft) sobre el nivel promedio del mar. Esta aparente reducción en el nivel freático responde al avance del cono de depresión al Noreste de Central Aguirre asociado con una batería de pozos operados por la AAA. Los resultados de este inventario sinóptico, llevaron al DRNA a concluir existe un riesgo inminente de que la cuña de agua salada se este moviendo tierra adentro en el Acuífero Principal del Abanico Aluvial de salinas con repercusiones nefasta a la calidad del agua del acuífero y sobre los humedales presentes en estuario de la Bahía de Jobos. A estos efectos, el DRNA ha adoptado una política de no permitir extracciones adicionales de agua de este acuífero.

Con el objetivo de entender porque en julio del 2000 se registraron niveles de agua significativamente menores que los de marzo de 1986 RMA ha:

1. compilado y evaluado los récord históricos de niveles de agua disponibles en los archivos electrónicos del USGS para pozos localizados en el abanico aluvial de Salinas,
2. tratado de replicar el mapa potenciométrico de julio del 2000, y
3. revisado y evaluó los inventarios de uso de agua del USGS para el municipio de Salinas, y
4. comparado los niveles de agua observados en julio del 2000 con el comportamiento histórico de los niveles de agua en este acuífero.

El lector es referido al Apéndice F para más detalles de estos análisis. A continuación se resumen los hallazgos de estos análisis.

En los archivos del USGS se encontraron un total de 29 pozos localizados Abanico Aluvial de Salinas que tienen datos de niveles de agua para los años de 1986 al 2005 (Figura 7.0b). Sólo 2 de estos pozos tienen datos niveles de agua para julio del 2000. Mientras que otros 2 pozos tienen datos para junio y agosto del 2000. Los datos de estos cuatro pozos fueron usados para confirmar los niveles de agua reportados en el inventario sinóptico de julio del 2000. Además se encontró además que 4 pozos tienen un récord lo suficientemente extenso (1992-2005) como para analizar el comportamiento histórico de los niveles de agua en este acuífero. Finalmente, los 29 pozos tienen datos de niveles de agua para julio del 2003. Estos datos fueron utilizados para construir un nuevo mapa potenciométrico para el Acuífero Principal en el Abanico Aluvial de Salinas

Los niveles de agua reportados en los archivos electrónicos del USGS para julio del 2000 son significativamente mayores que los reportados para estas mismas localizaciones en el análisis sinóptico, en particular para el área donde ocurre la depresión en el nivel freático (Figura 7.0c). De acuerdo a los archivos electrónicos del USGS el pozo 175735-661518 registró elevaciones de 1.93 y 1.40 m (6.32 4.59 ft) para junio y agosto de 2000 respectivamente. Nótese que para el lugar donde esta localizado este pozo el inventario sinóptico indica que el nivel freático es de 0 ft con respecto al nivel promedio del mar. Esto implica que para estas localizaciones los niveles de agua del análisis sinóptico de julio del 2000 no son reproducibles. Cabe mencionar que estamos ante una situación donde una misma entidad reporta información que aparenta ser contradictoria. Reconociendo la trayectoria de excelencia del USGS en la adquisición, la evaluación y la divulgación de datos hidrológicos, sospecho que debe haber una explicación relativamente simple a esta controversia. No obstante, el DRNA viene obligado a aclarar esta situación antes de basar su política de manejo del acuífero el análisis sinóptico de julio del 2000.

Los récord históricos del USGS demuestran que los niveles de agua fluctúan entre 1.83 a 12.20 m (6 y 40 ft) dependiendo del pozo (Figura 7.0d). Para el periodo de récord se registra un primer pico en los niveles de agua es observado alrededor de junio de 1993. Luego de este pico, viene una recesión en los niveles, alcanzándose los niveles más bajos entre abril de 1996 y junio de 1998. Un segundo pico en los niveles se registra en enero de 1999. Nótese que los niveles alcanzados en este segundo pico son un poco más altos que los de junio de 1993. A este pico en los niveles de agua le sigue una nueva recesión, alcanzándose los niveles más bajos entre febrero del 2002 y noviembre del 2004. Los niveles registrados en esta segunda recesión son similares a los registrados en la recesión previa. Un nuevo pico en los niveles de agua aparenta estarse desarrollando a partir de esta fecha y finales del récord de datos disponibles (abril del 2005).

Los patrones en las fluctuaciones de los niveles de agua son relativamente similares no importa la localización del pozo. Sin embargo, las mayores fluctuaciones en los niveles de agua se registran en aquellos pozos que se encuentran a mayor elevación. Los incrementos en los niveles de agua aparentan estar asociados a lluvias intensas, particularmente lluvias donde se exceden las 25.4 centímetros por mes (cm/mes) (10 pulgadas por mes, in/mes) (Figura 7.0e). Esto no es del todo inesperado puesto que el principal mecanismo de recarga a este acuífero lo es la infiltración directa de la lluvia. Además la respuesta en los niveles de agua a los eventos de lluvia es relativamente rápida, resultando en picos en los niveles súbitos y bien definidos.

En términos generales, los periodos de recesión en los niveles de agua tienden a ser más largos en que los periodos en que los niveles de agua incrementan. Los periodos de recesión son más cortos para aquellos pozos que están más cercanos a los centros de bombeo. Por lo tanto, los niveles de agua definido por las extracciones en el área y el intervalo de tiempo entre los periodos de lluvias intensas. Nótese que para el periodo de record disponible no presenta un patrón que refleje una recesión histórica en el nivel freático.

Los Inventario de uso de agua preparará el USGS para los años 1990 (Wanda L. Molina-Rivera, , Estimated Water Use in Puerto Rico –1990, USGS Open File Report), 1995 (Wanda L. Molina-Rivera, , Estimated Water Use in Puerto Rico –1995, USGS Open File Report 1998–276) años 2000 (Wanda L. Molina-Rivera, 2005, Estimated Water Use in Puerto Rico – 2000, USGS Open File Report 2005-1201). En particular se evaluaron los cambios en el uso de aguas subterráneas para el sector público, agrícola e industrial. Los Inventarios demuestran que durante el periodo de récord examinado no hubo cambios significativos en las extracciones de agua del acuífero principal. Lo que implica que este factor no es responsable por las fluctuaciones en los niveles de agua observados.

La Figura 7.0f presenta el mapa potenciométrico desarrollado con los niveles de agua reportados en los archivos electrónicos del USGS. Al igual que el mapa potenciométrico de julio del 2000, este mapa presenta dos conos de depresión en el nivel freático cuyos centros se encuentran al Sur de la Carretera Estatal PR-3. En el cono Este el nivel freático ha llegado hasta 5.49 m (18 ft) por debajo del nivel promedio del mar. En el cono Oeste el nivel freático ha llegado hasta 0.61 m (2 ft) por debajo del nivel promedio del mar. Esto implica que con respecto a julio del 2000 los niveles han bajado entre 0.61 y 3.05 m (2 y 10 ft).

Los conos de depresión se han solapado creando una gran depresión en el nivel freático que cubre la mayor parte de la región central del abanico aluvial de Salinas. La localización de esta depresión es similar a la de julio del 2000. Sin embargo, en este mapa potenciométrico es evidente que ambos conos de depresión han avanzado al avanzar al norte de la Carretera Estatal PR-3. Condición que no se da en julio del 2000.

De acuerdo al inventario de niveles de agua para marzo de 1986, en el área donde se propone construir el proyecto el nivel freático se encontraba alrededor de 6.10 m (20 ft) por encima del nivel promedio del mar. Para julio del 2000, el nivel freático se encontraba entre de 6.10 y 3.28 m (20 y 10 ft) sobre el nivel promedio del mar. De acuerdo al mapa potenciométrico el nivel freático en el área donde se propone construir el proyecto el nivel freático se encontraba alrededor entre de 6.10 y 3.28 m (20 y 10 ft) sobre el nivel promedio del mar. Estos niveles son similares a los reportados en el inventario sinóptico de julio del 2000. Lo que implica que a pesar de que en la mayor parte de la mitad sur del Abanico Aluvial de Salinas ha registrado reducciones significativas en los niveles de agua, el área donde se encuentran los pozos de PAS no ha registrado esa misma reducción en el nivel freático.

Basado en lo anterior se llegan a las siguientes conclusiones.

- Los niveles de agua reportados en el análisis sinóptico de julio del 2000 no son consistentes con los niveles de agua encontrados en los archivos electrónicos del USGS
- No hay un patrón histórico de recesión en el nivel freático del acuífero principal en el abanico aluvial de Salinas.
- Fluctuaciones significativas en los niveles de agua son observadas en función de la lluvia, los ritmos de extracción y la distancia entre el pozo y los principales centros de extracción.
- La recuperación en los niveles de agua depende de la recarga de las lluvias en particular durante eventos extraordinarios.
- El nivel freático en el área donde se propone construir el proyecto no ha experimentado las severas recesiones en los niveles de agua que otras áreas de acuífero principal en el Abanico Aluvial de Salinas han registrado.

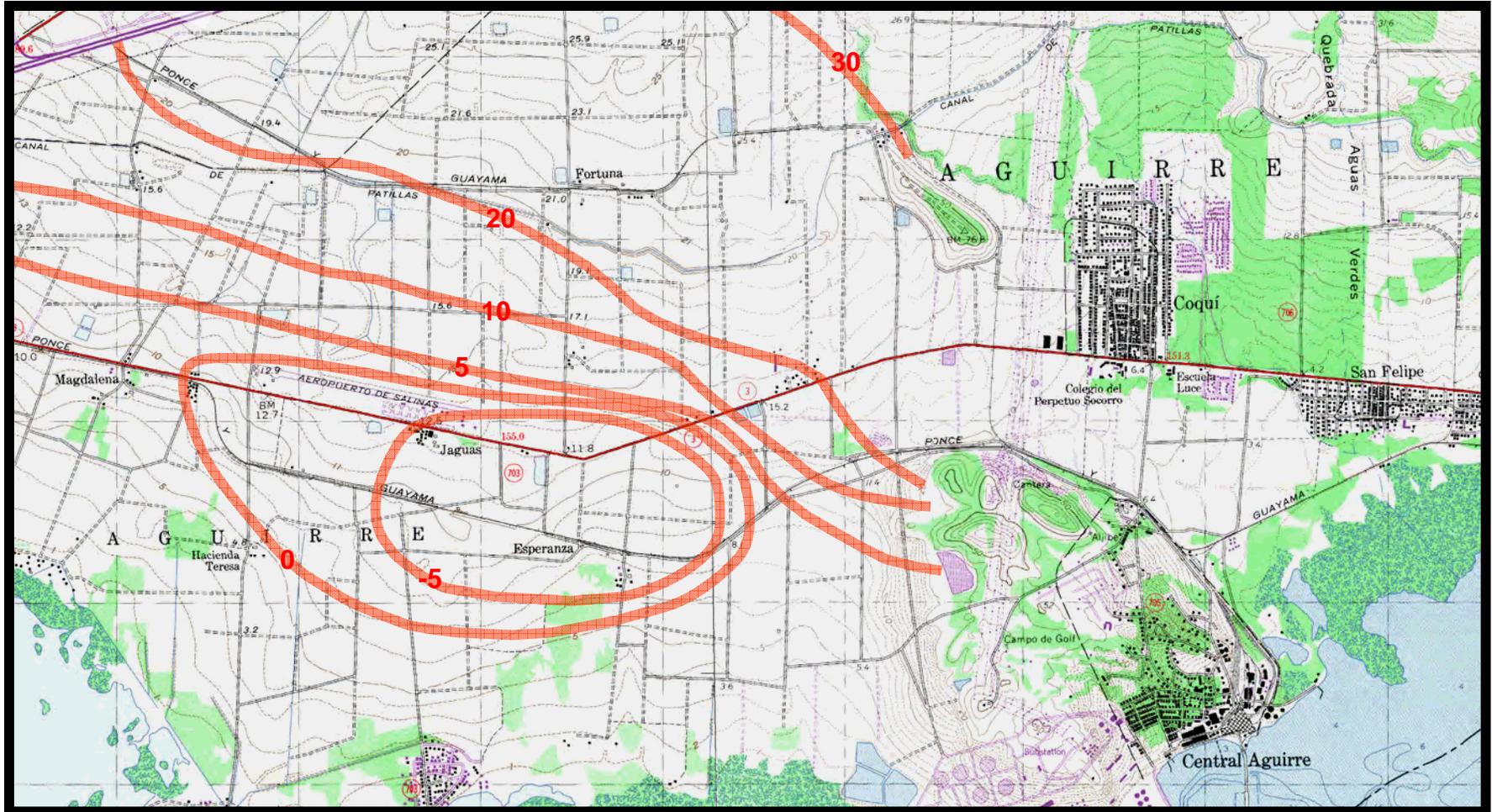


Figura 7.0a— Niveles Potenciométricos en Pies Sobre el Nivel Promedio del Mar para el Acuífero Principal del Abanico Aluvial de Salinas, Junio del 2001
 (Adaptado de Rodríguez, 2006a)

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO
 Paseo Costa del Sur III
 Bo. Aguirre, Salinas, Puerto Rico



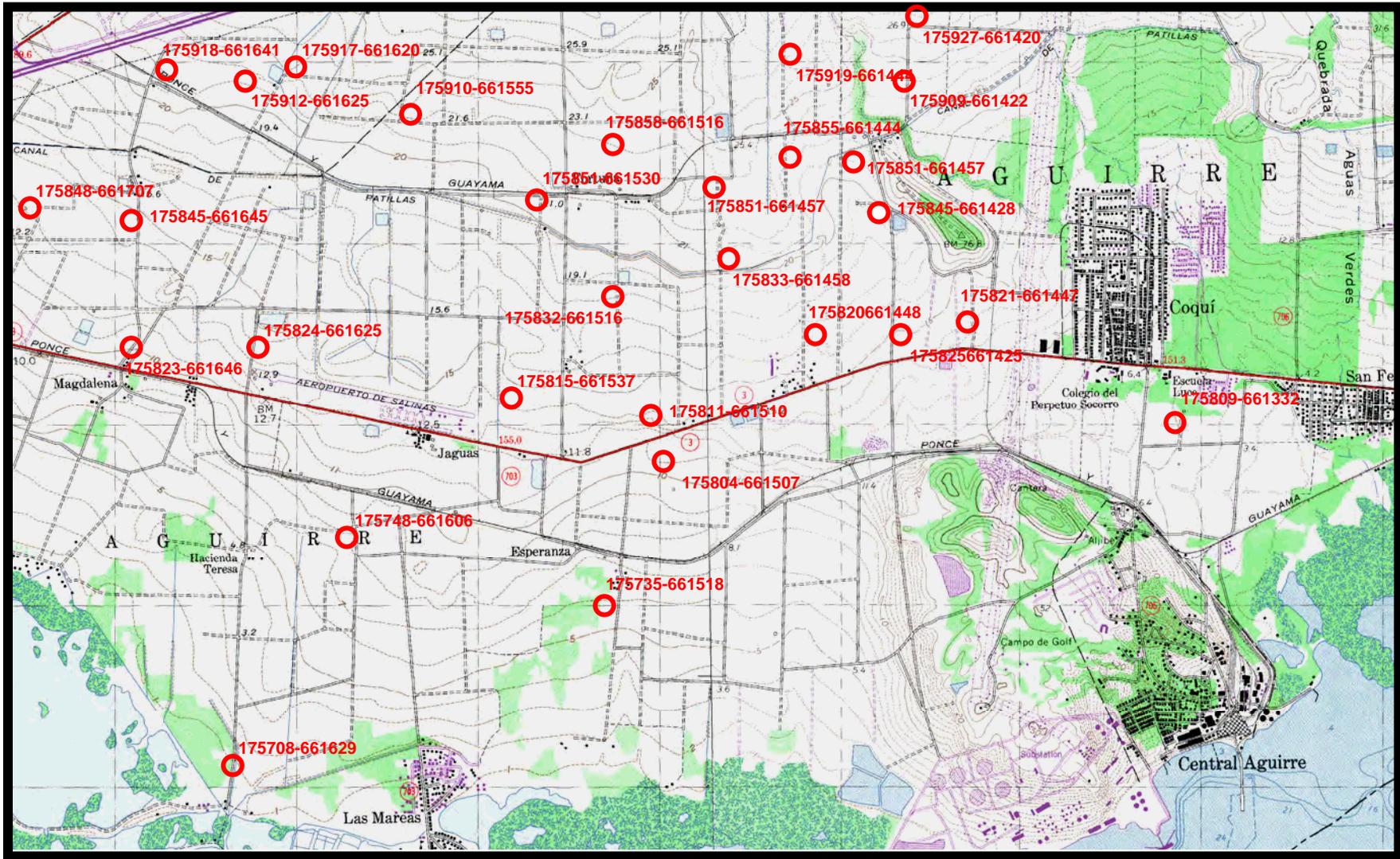


Figura 7.0b— Pozos Localizados Abanico Aluvial de Salinas que Tienen Datos de Niveles de Agua para los Años de 1986 al 2005
 (Adoptado de los archivos electrónicos del USGS)

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO
 Paseo Costa del Sur III
 Bo. Aguirre, Salinas, Puerto Rico



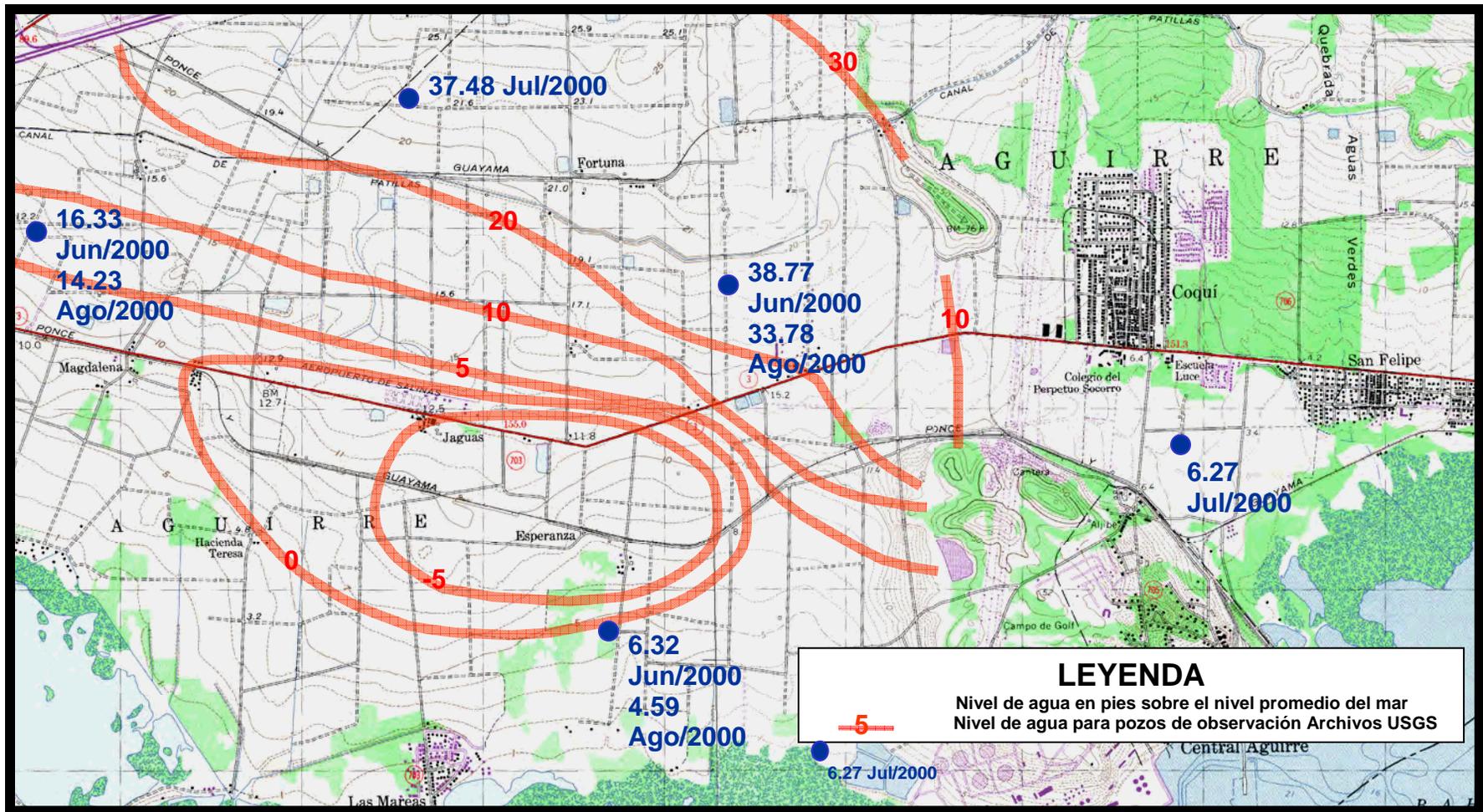


Figura 7.0c— Relación de Niveles Potenciométricos Reportados por Rodríguez 2006 y los Reportados en los Archivos Electrónicos del USGS

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO
 Paseo Costa del Sur III
 Bo. Aguirre, Salinas, Puerto Rico

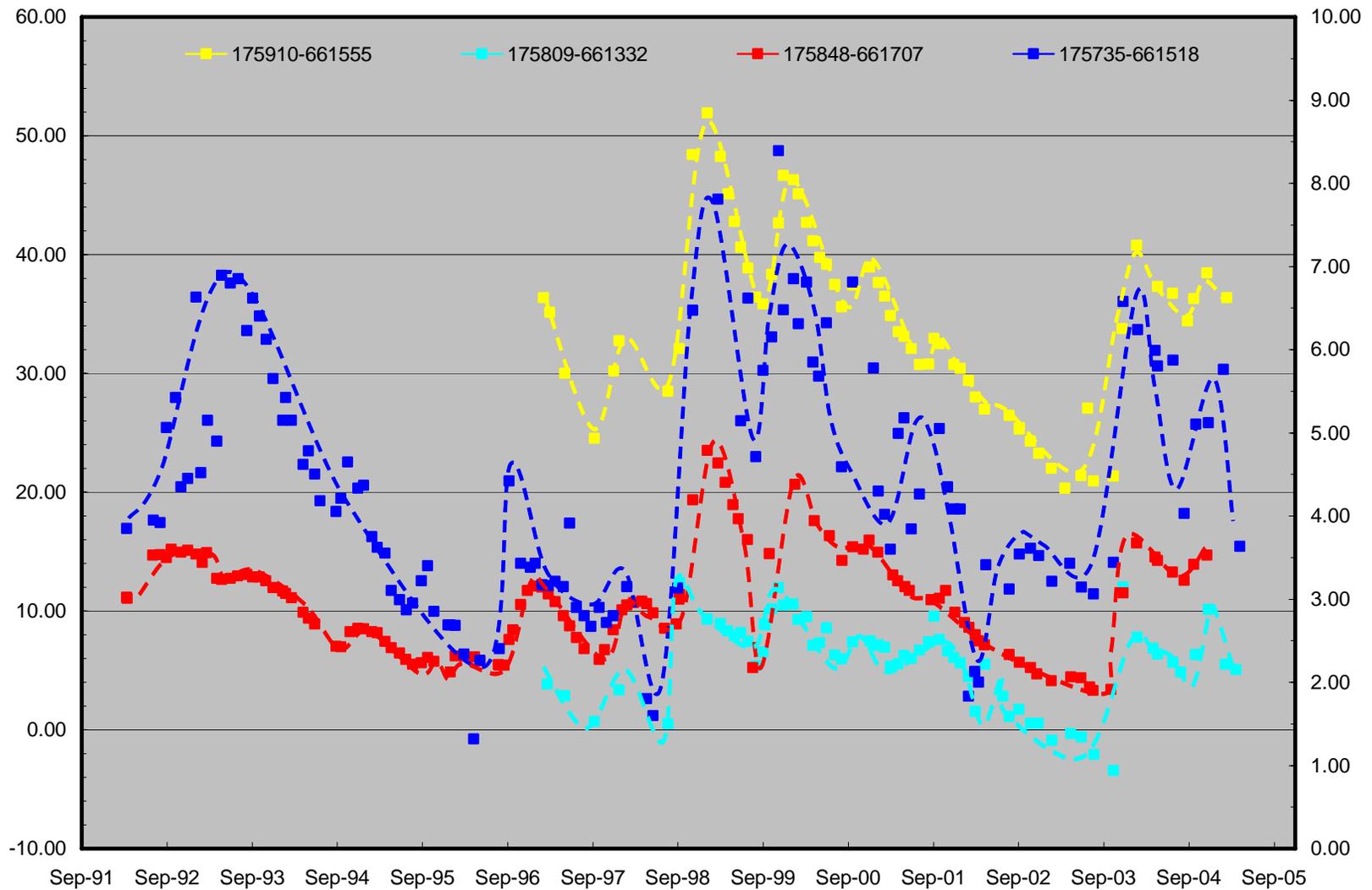


Figura 7.0d—Niveles de Agua para Varios Pozos de Observación en el Acuífero Principal del Abanico de Salinas

(Nota: La escala de Y a la izquierda debe usarse solamente para el pozo 175735-661518. Para los demás pozos usar escala de Y a la derecha)

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO

Paseo Costa del Sur III
Bo. Aguirre, Salinas, Puerto Rico



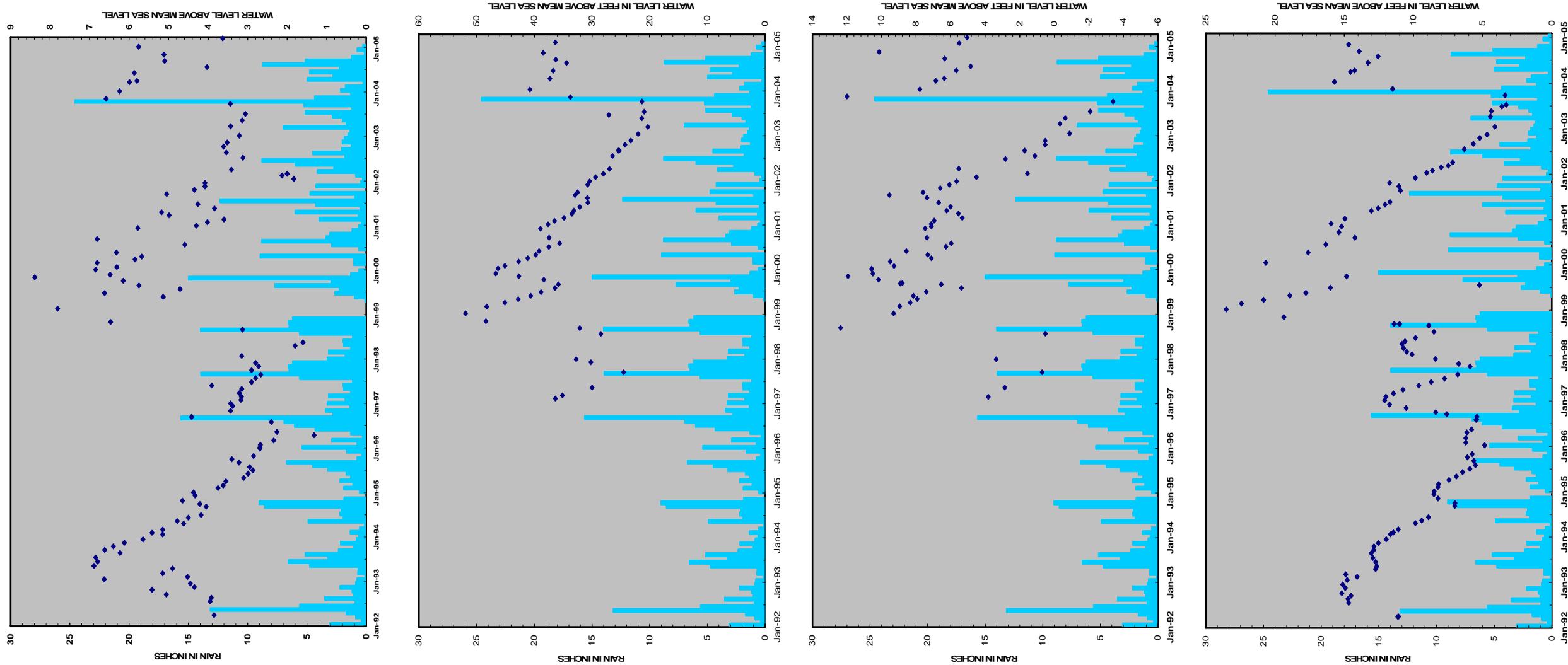


Figura 7.0e.—Niveles de Agua para Varios Pozo Observación y Precipitación para la Estación Metereológica de Central Aguirre

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO
 Paseo Costa del Sur III
 Bo. Aguirre, Salinas, Puerto Rico

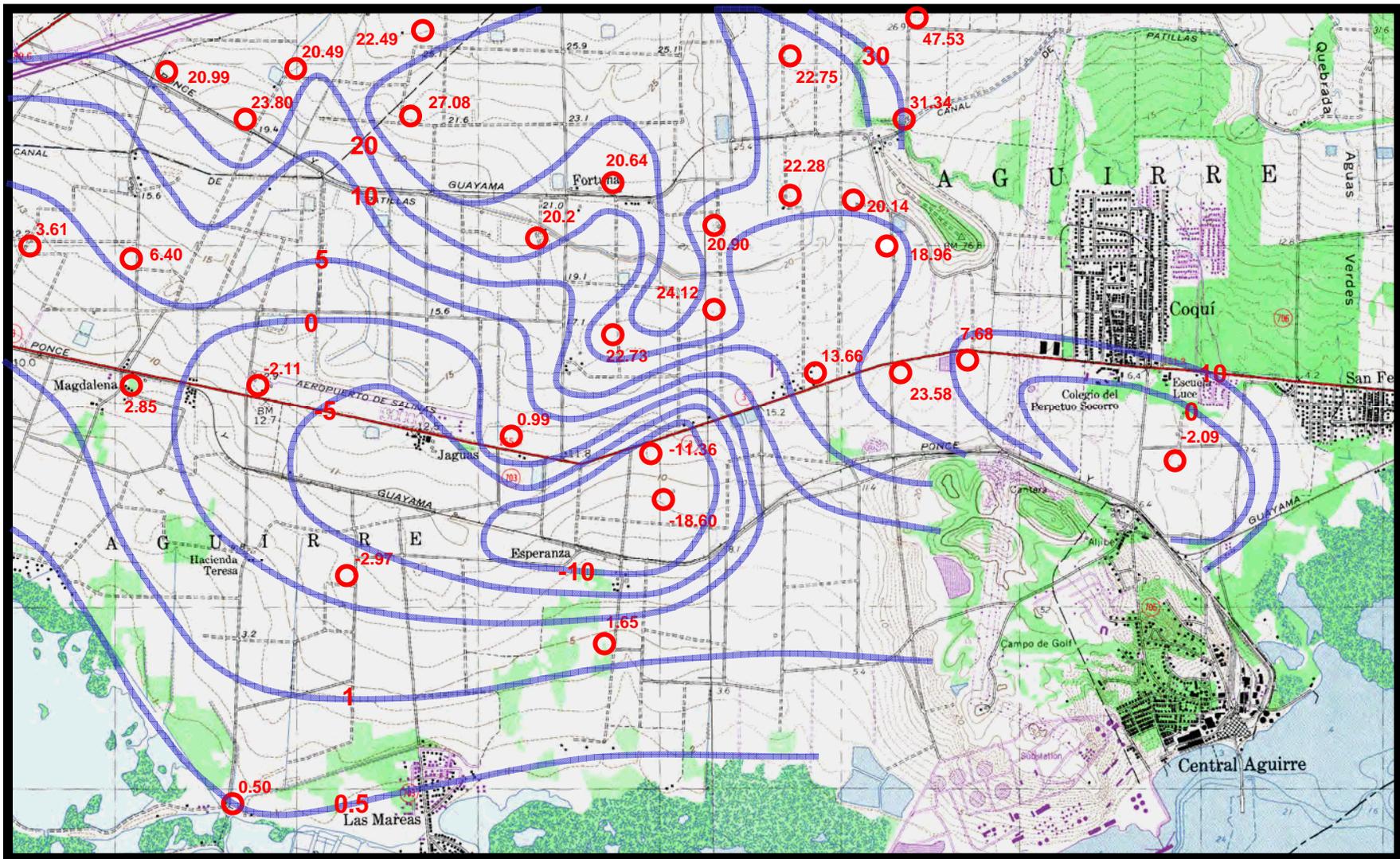


Figura 7.0f— Niveles Potenciométricos en Pies Sobre el Nivel Promedio del Mar para el Acuífero Principal del Abanico Aluvial de Salinas, Julio del 2003

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO
 Paseo Costa del Sur III
 Bo. Aguirre, Salinas, Puerto Rico

8.0 USO Y DISPONIBILIDAD DE AGUA DEL ACUÍFERO PRINCIPAL

En 1999 la compañía de consultores ERTEC llevó a cabo un estudio para determinar el rendimiento seguro del Acuífero Principal del Abanico Aluvial de Salinas. De acuerdo al estudio de ERTEC el rendimiento seguro de este acuífero computado mediante un balance de agua fue de 33,690 y 30,662 m³/d (8.9 y 8.1 mgd) durante condiciones promedios y durante sequía respectivamente. ERTEC también computa el rendimiento seguro del acuífero utilizando la técnica de Redes de Flujo en 32,933 m³/d (8.7 mgd) para condiciones promedio.

De acuerdo al inventario de usos de agua del USGS para el año 2000 en el Municipio de Salinas se extraían cerca de 7,533 y 41,905 m³/d (1.99 y 11.07 mgd) de fuentes superficial y subterráneas respectivamente (Tabla 4.6.4a). Las extracciones llevadas a cabo por la AAA para sus abonados son 17,678 m³/d (4.67 mgd) y provienen en su totalidad de una batería de pozos localizada en las al Noreste de Central Aguirre. Unos 7,533 y 21,842 m³/d (1.99 y 5.77 mgd) son extraídos de fuentes superficiales (Canal Patillas) y subterráneas (Acuífero Principal) respectivamente para el riego de los campos agrícolas. Finalmente la Central Termoeléctrica de Central Aguirre extrae 2,385 m³/d (0.63 mgd)

Table 8.0aa.—Uso de Agua en el Municipio de Salinas Según el Inventario de Uso de Agua del USGS para el Año 2000.

USO	TASA DE EXTRACCIÓN (MGD)		
	AGUAS SUPERFICIALES	AGUAS SUBTERRANEAS	TOTAL
Doméstico	0.00	4.67	4.67
Agrícola	1.99	5.77	7.76
Termoeléctrica	0.00	0.63	0.63
TOTAL	1.99	11.07	13.06

En 1996, la AAA publicó un Estudio de Necesidad Producción de Agua Para Puerto Rico hasta el Año 2050. Este estudio proyecta la demanda de agua para Puerto Rico por municipio. El programa de computadoras IWR-MAIN (Institute of Water Resources Municipal and Industrial Needs), Versión 5.1, desarrollado por el Instituto de Recursos de Agua del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos fue utilizado para llevar a cabo las proyecciones. Este programa es un modelo econométrico basado en algoritmos desarrollados por varios estudios de demanda de agua realizados en Estados Unidos. Como parte del estudio se evaluaron la necesidad de producción bajo cuatro (4) escenarios:

1. la tendencia de crecimiento de la demanda, basada en las condiciones socioeconómicas actuales,
2. la opción de intervenir para reducir la producción de agua controlando las pérdidas en el sistema de 50 a 25 por ciento,

3. la opción de intervenir para reducir la producción de agua mediante la aplicación de medidas dirigidas a estimular una disminución en el consumo,
4. la opción de intervenir para reducir la producción de agua mediante la aplicación de medidas dirigidas a estimular una disminución en el consumo y controlando las pérdidas en el sistema.

La Tabla 4.7.2 resume los resultados de este estudio para el año 2050 en el Municipio de Salinas. Nótese que en el peor de los escenarios (No Acción) la necesidad de producción de agua sería de 12,530 m³/d (3.31 mgd). Esto dista significativamente de los 7,678 m³/d (4.67 mgd) que extrajo la AAA del Acuífero Principal en el año 2000 y de requisitos que la propia AAA le impone a los proyectistas para poder prestar el servicio de agua potable.

Tabla 8.0b.—Resultados del estudio de necesidad producción de agua para Puerto Rico para el año 2050 en el Municipio de Salinas

USUARIO	ESCENARIO			
	NO ACCIÓN (mgd)	CONTROL DE PÉRDIDAS (mgd)	MEDIDAS DE CONSERVACIÓN (mgd)	CONTROL DE PÉRDIDAS Y CONSERVACIÓN (mgd)
Comercial	1.72	1.57	1.72	1.57
Residencial	0.10	0.10	0.10	0.10
Industrial	0.01	0.01	0.01	0.01
Gobierno	0.013	0.13	0.13	0.12
Fuentes Públicas e Hidratantes	0.15	0.15	0.15	0.15
DEMANDA	2.11	1.95	2.11	1.95
Pérdidas	1.20	1.20	0.53	0.49
NECESIDAD DE PRODUCCIÓN	3.31	3.15	2.64	2.44

Según se ha indicado las extracciones presentes exceden el rendimiento seguro del Acuífero Principal del Abanico Aluvial de Salinas. Por lo tanto, esta fuente no esta disponible para suplir las necesidades del proyecto.

9.0 CONCLUSIONES

A continuación se resumen los hallazgos más relevantes de este estudio.

- El principal mecanismo de recarga a este acuífero lo es la infiltración directa de la lluvia la cual representa cerca 36.41 por ciento de la recarga total.
- Cualquier actividad que resulte en impermeabilización de los terrenos tendrá un impacto significativo en la recarga al acuífero.
- Actividades que resulten en impermeabilización de terrenos tienen que adoptar las medidas necesarias para garantizar la recarga de la lluvia al acuífero principal (sistema de infiltración).
- Las áreas más sensitivas del acuífero y donde se pudiera ocurrir intrusión de agua salobre lo son: (1) el cono de depresión que se registra en la región central del Abanico Aluvial de Salinas y que aparenta estar asociado a extracciones para usos agrícolas y (2) el cono de depresión que se registra al Noreste de Central Aguirre y que aparenta estar asociado con una batería de pozos operados por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados.
- Los niveles de agua reportados en el análisis sinóptico de julio del 2000 no son consistentes con los niveles de agua encontrados en los archivos electrónicos del USGS
- No hay un patrón histórico de recesión en el nivel freático del acuífero principal en el abanico aluvial de Salinas.
- Fluctuaciones significativas en los niveles de agua son observadas en función de la lluvia, los ritmos de extracción y la distancia entre el pozo y los principales centros de extracción.
- La recuperación en los niveles de agua depende de la recarga de las lluvias en particular durante eventos extraordinarios.
- El nivel freático en el área donde se propone construir el proyecto no ha experimentado las severas recesiones en los niveles de agua que otras áreas de acuífero principal en el Abanico Aluvial de Salinas han registrado.
- El nivel freático en el Acuífero Principal del Abanico Aluvial de Salinas alcanzó su nivel más bajos en julio del 2003.
- Las extracciones presentes exceden el rendimiento seguro durante eventos de sequía del Acuífero Principal del Abanico Aluvial de Salinas.
- El Acuífero Principal del Abanico Aluvial de Salinas no debe ser considerado para suplir las necesidades del proyecto.

10.0 BIBLIOGRAFÍA

Berryhill Jr., 1960. Geologic Map for the Central Aguirre Quadrangle, US Geological Survey, Miscellaneous Geologic Investigations MAP I-318, 1 map

Gómez-Gómez, Fernando, 1990, Hydrochemistry of the South Coastal Plain Aquifer System of Puerto Rico and its relation to surface-water recharge: in Gómez-Gómez, Fernando, Quiñones-Aponte, Vicente, and Johnson, A.I., eds., Aquifers of the Caribbean Islands, Proceedings of the International Symposium on Tropical Hydrology, San Juan, PR, July 23-27, 1990, AWRA Monograph Series no. 15, p. 57-75.

Gómez-Gómez, Fernando, 1998, Hydrochemistry of the south coastal plain aquifer system of Puerto Rico and its relation to surface water recharge, in Gómez-Gómez, Fernando, Quiñones- Aponte, Vicente, and Johnson, A.I., eds., Regional Aquifer Systems of the United States: Aquifers of the Caribbean Islands, American Water Association Monograph Series No. 15, International Symposium on Tropical Hydrology, July 1990, San Juan, Puerto Rico, p. 57-75.

Quiñones-Aponte, Vicente, 1989, Horizontal Anisotropy of the principal ground-water flow zone in the Salinas alluvial fan, Puerto Rico: *Ground Water Journal*, v. 27, no. 4, p. 491-500.

Quiñones-Aponte, Vicente, 1991, Water-resources development and its influence on the water budget for the aquifer system in the Salinas to Patillas area, Puerto Rico: in Gómez-Gómez, Fernando, Quiñones-Aponte, Vicente, and Johnson, A.I., eds., Aquifers of the Caribbean Islands, Proceedings of the International Symposium on Tropical Hydrology, San Juan, Puerto Rico, July 23-27, 1990, AWRA Monograph Series no. 15, p. 37-

Quiñones-Aponte, Vicente, and Gómez-Gómez, Fernando, 1987, Potentiometric surface of the alluvial aquifer and hydrologic conditions in the Salinas quadrangle, Puerto Rico, March 1986: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 87-4161, 1 sheet.

Quiñones-Aponte, Vicente, Gómez-Gómez, Fernando, and Renken, R.A., 1997, Geohydrology and simulation of ground-water flow in the Salinas to Patillas area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 95-4063, 37 p.

Ramos-Gines, O., 1996. Ground-Water Resources Areas in Puerto Rico, Puerto Rico Offshore Islands, Santa Isabel – Patillas Region, in T.D. Veve and B.E. Taggart, Editors, Atlas of Ground-Water Resources in Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands: U.S. Geological Survey Water Resources Investigation Report 94-4198, pp 50-58.

Molina-Rivera, W.L., 1995, Estimated Water Use in Puerto Rico –1990, USGS Open File Report 1995-263

Molina-Rivera, W.L., 1998 Estimated Water Use in Puerto Rico –1995, USGS Open File Report 1998–276

Molina-Rivera, W.L., 2005, Estimated Water Use in Puerto Rico – 2000, USGS Open File Report 2005-1201.

Rodríguez, J.M., 2005, Potentiometric surface of the alluvial aquifer and hydrologic conditions at the Río Nigua de Salinas alluvial fan, Salinas, Puerto Rico, July 9-11, 2002: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 2910, 1 sheet.

Rodríguez, J.M., 2006, Evaluation of hydrologic conditions and nitrate concentrations in the Río Nigua de Salinas alluvial fan aquifer, Salinas, Puerto Rico, 2002-03: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5062, 38 p.

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