

IMPORTANCIA DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL COMO FUENTE DE AGUA FRESCA A LA RESERVA JOBANERR DE LA BAHIA DE JOBOS EN SALINAS, PUERTO RICO, EN COMPARACION A LAS DESCARGAS DE AGUA SUBTERRÁNEA DEL ACUIFERO LOCAL

Por
Ferdinand Quiñones/1

La Reserva de la Bahía de Jobos, en la zona de Aguirre del Municipio de Salinas, es uno de los recursos costaneros y marítimos más importantes en Puerto Rico. La reserva es formada por terrenos costaneros al oeste de Aguirre y una serie de cayos e islotes denominados Cayos Caribe y la Zona de Mar Negro en la Bahía de Jobos (Figura 1). La zona incluye un bosque subtropical seco en el litoral costanero, planicies salinas y fangosas, humedales intermitentes, varias lagunas salinas, bosques de mangles en los cayos e islotes y la periferia de costa, canales entre los mangles, y comunidades de corales y hierbas marinas en la zona marítima. Debido a esta diversidad ecológica, la zona fue seleccionada en 1981 como una de las 25 áreas en la red del Sistema Nacional de Reservas Estuarinas Federal (NEERS, por sus siglas en inglés). El sistema de reservas se estableció mediante la Ley Federal de Manejo Costanero de 1972, y opera mediante una colaboración entre la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés) y los estados o territorios que tienen costas. La NOAA aporta fondos y dirección a nivel nacional, mientras que entidades estatales operan las reservas. En el caso de la Reserva de Jobos (conocida para efectos del programa federal por las siglas Jobanerr), el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA) es responsable del manejo diario de la zona, con el apoyo de socios o grupos locales. La Reserva incluye 2,800 acres en la zona costanera y el litoral marítimo. Una foto aérea reciente (2004) de la zona de la reserva se ilustra en la Figura 2.

Figura 1. Ubicación general y límites de la Reserva de la Bahía de Jobos.

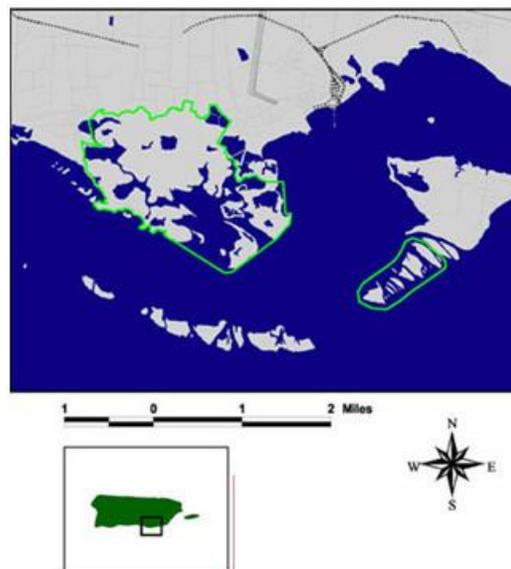


Figura 2. Foto aérea de la zona de la Reserva de la Bahía de Jobos



La zona incluida en la Reserva fue denominada como un sistema estuarino usando el criterio general que define estos ecosistemas. Los estuarios son lugares donde el agua dulce de los ríos y/o acuíferos se mezcla con el agua salada o salobre. Un estuario puede ser formado en la desembocadura de un río a una bahía, en una laguna, o en ciénagas costaneras (humedales costaneros). Los estuarios son ecotonos ambientales de gran importancia a la vida terrestre y acuática, sirviendo de “incubadoras” en distintas etapas del desarrollo de un gran número de especies de fauna marina. Se estima que aproximadamente dos terceras partes de todos los peces y mariscos de valor alimentario utilizan estos importantes hábitculos como áreas de desove y como viveros. Los humedales asociados a los estuarios protegen de marejadas e inundaciones las áreas más altas tierra adentro donde predominan especies de flora menos tolerantes a las altas salinidades del mar. Los estuarios son también zonas de importancia para las aves, particularmente en los trópicos donde la presencia de árboles de mangle y otras especies de flora proveen hábitats atractivos a una gran variedad de pájaros.

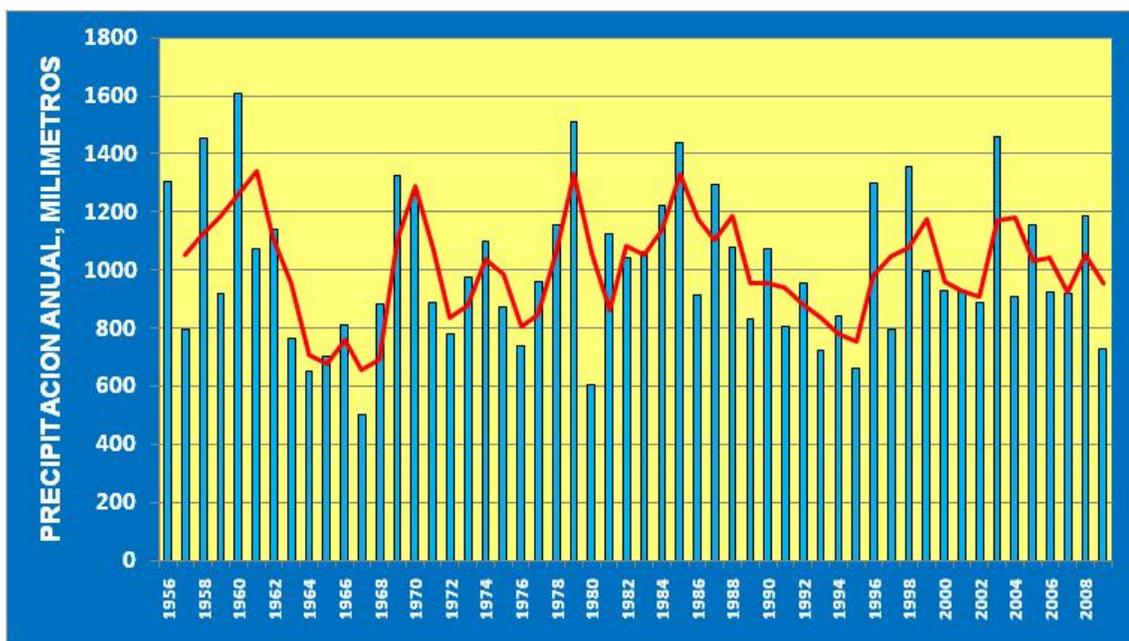
Históricamente se concluyó sin estudios o datos sistemáticos que las aguas subterráneas son la fuente principal de agua dulce a la Reserva Jobanerr. Esta presunción se basó en la presencia de humedales perennes en los límites terrestres de la Reserva en una zona de lluvia limitada como es la Región Sur de Puerto Rico y el área de Salinas a Guayama, incluyendo a Aguirre. En esta zona la lluvia promedio anual es de aproximadamente 1100 milímetros (mm) anuales, con variaciones desde solamente 500 mm en años de sequía hasta

1600 mm en años húmedos (National Weather Service (NWS), 2008). Un análisis de los datos históricos de lluvia del NWS en la zona de Aguirre permite enfocar en los años de lluvias abundantes y eventos ciclónicos.

Los datos de lluvia del NWS documentan los años en que ocurrieron precipitaciones sobre el promedio en consecuencia de huracanes o vaguadas que afectaron a Puerto Rico directa o indirectamente. Los datos de lluvia total anual en la estación operada por el NWS en Aguirre desde el 1956 se resumen en la Figura 3. Estos datos reflejan años de lluvia en exceso de 125 cm anuales en varios años:

1. En 1956, debido al huracán Santa Clara (Betsy), que afectó directamente la Isla entrando por Yabucoa.
2. En 1958, debido a los huracanes Ella y Gerda, que pasaron al sur de la Isla, induciendo lluvias severas.
3. En 1960, debido al huracán Donna, que pasó al sur de la Isla causando inundaciones generales mayores en todo Puerto Rico.
4. En 1970, debido a una vaguada inducida por el huracán Dorothy que causó severas inundaciones en toda la Región Sur.
5. En 1979, debido a la tormenta tropical Federico.
6. En 1985, debido a una depresión tropical que causó lluvias históricas e inundaciones severas en la Región Sur.
7. En 1987, debido al huracán Emily que pasó al sur de la Isla.
8. En 1996, debido al huracán Hortense.
9. En 1998, debido al huracán Georges.
10. En el 2003, debido a varias vaguadas tropicales y frentes de frío.

Figura 3. Lluvia anual (negro) y promedio (rojo) desde 1956 al 2006 en la estación de Aguirre.

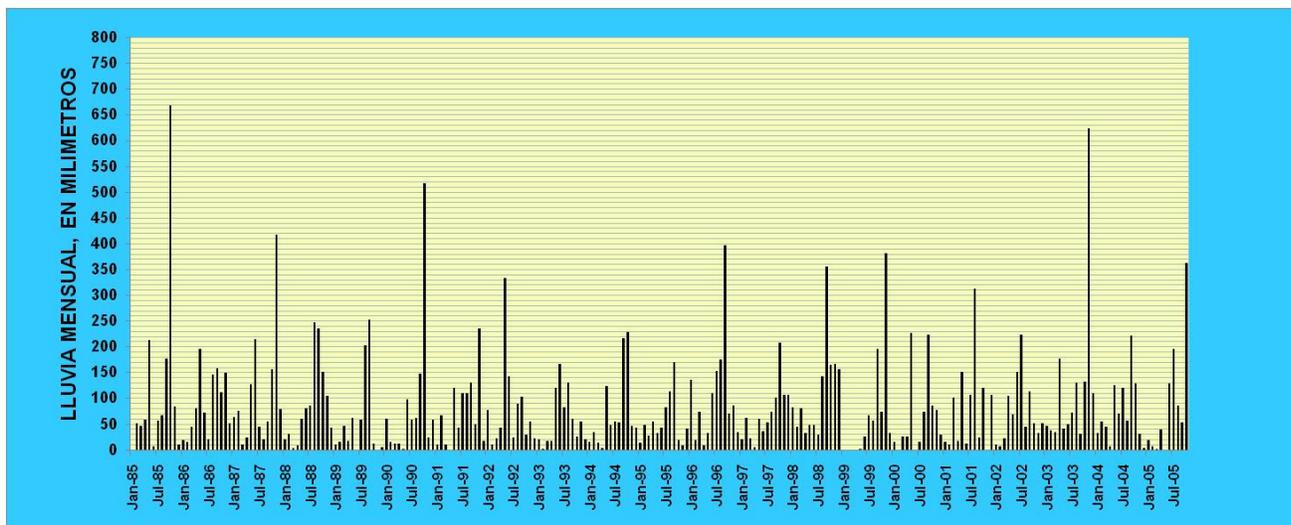


Fuente: NWS, 2010

Los datos en la Figura 3 también documentan las sequías severas con precipitaciones en Aguirre menores de 630 mm anuales, incluyendo los eventos de 1963-67; 1979-80; de 1986; y 1993-94. En esta figura también se presenta el promedio de lluvia anual acumulativo (“moving average”) en Aguirre. A pesar de las sequías periódicas antes indicadas, la tendencia general del promedio es ascendente, particularmente desde 1994.

Análisis adicionales de los datos mensuales de lluvia establecen que generalmente durante septiembre a noviembre de cada año ocurren las acumulaciones mayores de precipitación en la zona de Aguirre y la Reserva Jobanerr. La lluvia promedio mensual en Aguirre se presenta en la Figura 4.

Figura 4. Lluvia mensual en Aguirre desde 1985 al 2006.



Fuente: NWS, 2008

Lluvias torrenciales de hasta 660 mm en 24 horas se han registrado en las laderas sur que drenan escorrentía hacia la zona de Aguirre y la Reserva. La Figura 4 documenta lluvias totales mensuales que excedieron 120 mm en diez (10) instancias entre 1985 y el 2006. En tres (3) instancias, la lluvia total mensual en Aguirre excedió 508 milímetros (1985, 1990, y 2003). Estas lluvias torrenciales causan inundaciones severas en todo el litoral sur, arrojando los valles aluviales y descargando grandes cantidades de agua dulce hacia los sistemas costaneros tales como los que caracterizan a la Reserva Jobanerr.

El rol en suplir agua dulce a la zona de la Reserva de las escorrentías superficiales normales y las generadas durante las inundaciones periódicas no ha sido caracterizado anteriormente, ni comparado con las posibles contribuciones de agua subterránea de los acuíferos de la zona. Este estudio evalúa ambas fuentes de agua dulce y estima sus contribuciones anuales y a largo plazo. Este conocimiento será útil en optimizar el manejo de la Reserva a medida que aumentan las presiones sociales y económicas para el desarrollo

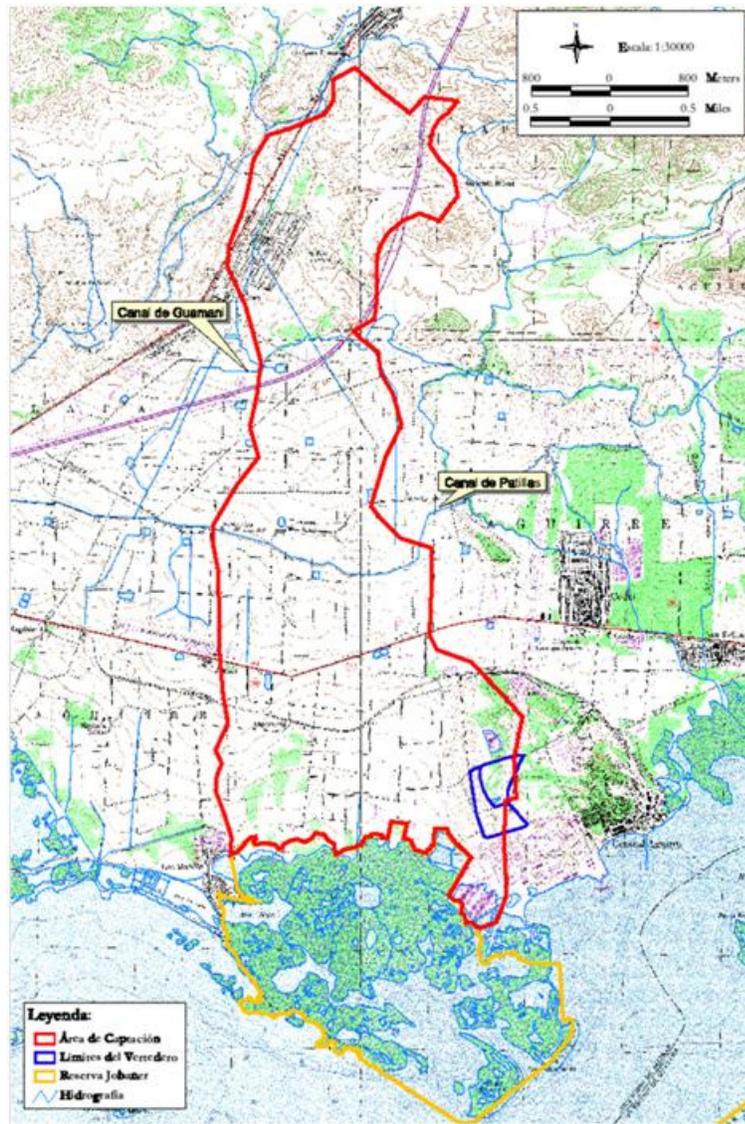
con fines urbanos, turísticos, y recreativos de la cuenca hidrogeológica (componentes de agua superficiales y subterráneos) que nutre la Reserva.

Hidrología Superficial de la Cuenca que Nutre la Reserva Jobanerr

La hidrología superficial de la cuenca que descarga escorrentía a la Reserva Jobanerr es típica de la Región Sur de la Isla. Ríos intermitentes fluyen de las laderas sur de las cordilleras al norte de la zona, incluyendo los Ríos Salinas hacia el oeste y el Río Guamaní hacia el este, los cuales no influyen la reserva. En la zona inmediata propia que se define posteriormente como la “cuenca” de Jobanerr no existen ríos significativos. La Quebrada de Aguas Verdes fluye desde las colinas en la vecindad del Albergue Olímpico, cruzando por debajo de la Autopista PR-53, y discurriendo hacia el sur hasta descargar en la vecindad de la Comunidad de Jobos, al este de los límites de Jobanerr. Esta quebrada tiene un área de captación menor, estimada por el USGS en aproximadamente 257 acres.

Utilizando los mapas topográficos del USGS se puede estimar el tamaño y forma de la cuenca que nutre agua a la Reserva Jobanerr, ya sea por infiltración alimentando el acuífero o por escorrentía superficial. Los límites de la cuenca se ilustran en la Figura 5. Como se documenta más adelante, el área superficial de la cuenca es de aproximadamente 3,976 acres.

Figura 5. Cuenca hidrológica inmediata a la Reserva Jobanerr.

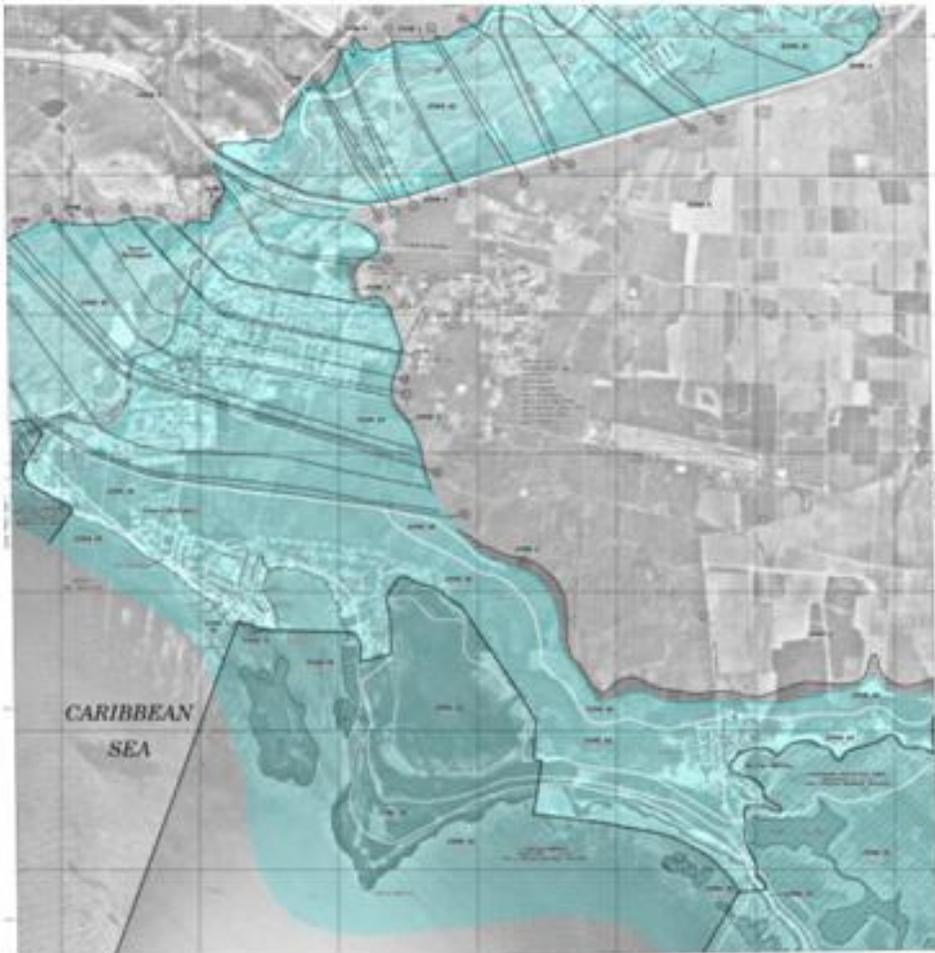


El régimen hidrológico de la Quebrada de Aguas Verdes refleja condiciones de estiaje la mayor parte del año, excepto durante eventos de lluvia periódicos. Sin embargo, crecientes con un pico de hasta 17 metros cúbicos por segundo (m^3/s) pueden ocurrir durante eventos de lluvias intensas, tales como las ocasionadas por el Huracán Hugo en 1989. Durante este evento la lluvia total durante 24 horas en Aguirre fue de 120 mm la cual es equivalente a un intervalo de recurrencia de 100 años (probabilidad de 1 % de ocurrir en un año). Esta lluvia generaría una cantidad de escorrentía equivalente a 60 mm en la Quebrada de Aguas Verdes, luego de descontar la evapotranspiración y la infiltración neta a los suelos. Esta escorrentía se puede convertir en un volumen total de agua tomando en cuenta el área total de captación de la quebrada. Igualmente, si

asumimos que la precipitación durante ese período de 24 horas fue similar en toda la cuenca que nutre la Reserva (lo cual es típico en los valles costaneros del sur), podemos estimar la cantidad total (volumen) de escorrentía que esta lluvia genera. Esto se obtiene multiplicando el promedio de lluvia en mm sobre el tamaño de dicha área de captación (en unidades compatibles como acres). Debido al tamaño menor de la cuenca de la Quebrada de Aguas Verdes, esta escorrentía es equivalente a aproximadamente 62,405 metros cúbicos (m^3). Esta cantidad de agua no es significativa cuando se compara con las descargas que ocurren en ríos principales, tales como en el Río Majada y en el Río Nigüa al oeste de la Reserva Jobanerr. Como elemento de comparación, en el 2008 la descarga promedio diaria más alta en el Río Majada cerca de Salinas fue de 402,100 m^3 , o 6.5 veces mayor que la descarga más alta en la Quebrada de Aguas Verdes, que es la que nutre el estuario.

Los análisis del flujo de agua superficial en la cuenca que nutre la Reserva Jobanerr establecen que la mayor parte de la escorrentía proviene de canales de desagüe y flujo laminar que discurre durante eventos de lluvia intensa. Este régimen se sustenta también con los datos de las zonas inundables para la creciente de 100 años en la zona de la Reserva según documentado en los mapas de inundaciones de FEMA. El mapa vigente de FEMA para la zona de Salinas y la Reserva Jobanerr se incluye en la Figura 6 enfocado en la zona de la Reserva adyacente a la planta termoeléctrica de Aguirre de la Autoridad de Energía Eléctrica (AEE). El propósito de esta figura es demostrar la magnitud de la escorrentía que fluye del Río Salinas justamente al este de la Reserva. Es evidente del mapa de inundaciones del Río Salinas que los eventos de crecientes son el factor hidrológico de mayor relevancia a la zona costanera cercana a la Reserva.

Figura 6. Mapa de inundaciones del Río Salinas cerca de la Reserva Jobanerr.



Fuente: FEMA, 2005

COMPARACIÓN ENTRE LAS CONTRIBUCIONES DE AGUA SUBTERRÁNEA Y AGUA SUPERFICIAL A LA RESERVA JOBANERR

Datos hidrológicos e hidrogeológicos históricos de la cuenca que nutre de agua la Reserva Jobanerr se usaron para estimar el flujo promedio anual de agua subterránea y superficial que recibe la zona marítima costanera que representa la Reserva. Cálculos independientes en este informe y en un estudio sistemático llevado a cabo por el USGS en el 2008 (Kuniansky, 2010) coinciden en el estimado de la cantidad de flujo de agua subterránea desde el acuífero de la zona a la costa inmediata a la Reserva. En este informe se utilizaron datos de lluvia histórica en Aguirre, en combinación con la información de la cuenca que alimenta la Reserva, para la cantidad de escorrentía que la misma recibe.

El estudio del USGS, publicado en el 2010, utilizó un modelo bi-dimensional del acuífero al norte de la costa para calcular el flujo promedio de agua subterránea que descarga hacia la Reserva. Sin embargo, el estudio del USGS no tomó en cuenta el flujo de agua superficial hacia la Reserva, particularmente durante eventos de lluvias extremas. El modelo del USGS fue calibrado para condiciones promedio (“steady state”), y no evaluó eventos transitorios (“transient”), por lo que no tomó en cuenta los pulsos extremos de escorrentía y posible recarga al acuífero ocasionados por eventos de lluvias torrenciales tales como en noviembre del 2003, cuando la cuenca que nutre la Reserva recibió 624 mm de lluvia en ese mes solamente (Fig. 4). En el período de simulación del flujo de agua subterránea con el modelo, el USGS utilizó un promedio anual de lluvia sobre la cuenca de 965 mm, cuando en años como en el 2003, el total fue de 1,456 mm (Fig. 3).

Estas comparaciones no implican que el estudio del USGS está errado, sino que el mismo se limitó a condiciones promedios que no tomaron en cuenta la escorrentía superficial que fluye hacia la Reserva en períodos de lluvias intensas como en el 2003. Esta condición fue validada mediante una comunicación telefónica en noviembre del 2010 con la investigadora principal del USGS a cargo del estudio (Eve Kuniansky). El estudio del USGS se enfocó en evaluar los efectos en el acuífero y flujo de agua subterránea ocasionados por cambios en irrigación en la zona de Aguirre (de inundación a riego por goteo). En comparación, en este informe se definen tanto el flujo de agua subterráneo para condiciones promedios similares al estudio del USGS, así como el flujo de agua superficial a la Reserva durante eventos de lluvia significativas. Esto permitió determinar la fracción que el agua subterránea representa del flujo total de agua que recibe la Reserva.

Flujo de Agua Subterránea

Datos de varios estudios de la hidrogeología de la zona de Aguirre llevados a cabo por el USGS permiten estimar el flujo promedio anual de agua subterránea que discurre desde el Acuífero de Salinas hacia la Reserva. Los estudios pertinentes se refieren más adelante.

1. El flujo se calculó utilizando la Ecuación de Darcy (Freeze and Cherry, 1979), que permite calcular el flujo de agua subterránea en una sección transversal de un acuífero donde se conocen sus características hidrogeológicas. La ecuación de Darcy calcula el flujo mediante la relación:

$$Q = (K)(A) dh/dl ,$$

Donde: **K** es la Conductividad Hidráulica;
A es el área de la sección transversal del acuífero utilizada; y
dh/dl es la pendiente o gradiente hidráulico promedio, definido por los niveles freáticos.

El valor de estos parámetros para el área del Acuífero de Salinas aguas arriba de la Reserva de Jobanerr se obtuvo de los estudios del USGS sobre las aguas subterráneas en el área de Salinas, incluyendo la zona del Vertedero Municipal de Salinas (VMS) y la Reserva Jobanerr. Estos estudios incluyen los de Renken y otros (2002); Quiñones Aponte y otros (1997); Renken y Gómez (2003); Bennett (1974); Quiñones Aponte (1989); Gómez y otros, 1990); y USGS (1986).

El estudio del USGS "Potentiometric surface of the alluvial aquifer and hydrologic conditions in the Salinas quadrangle, Puerto Rico, March 1986", (WRIR 87-4161) es de vital importancia en el análisis pues ilustra los niveles freáticos en la vecindad de la Reserva y su elevación, lo que permite definir con certeza la dirección del flujo subterráneo. Este mapa potenciométrico se ilustra en la Figura 7.

Figura 7. Mapa de elevaciones del nivel freático en la zona de Salinas y Aguirre.

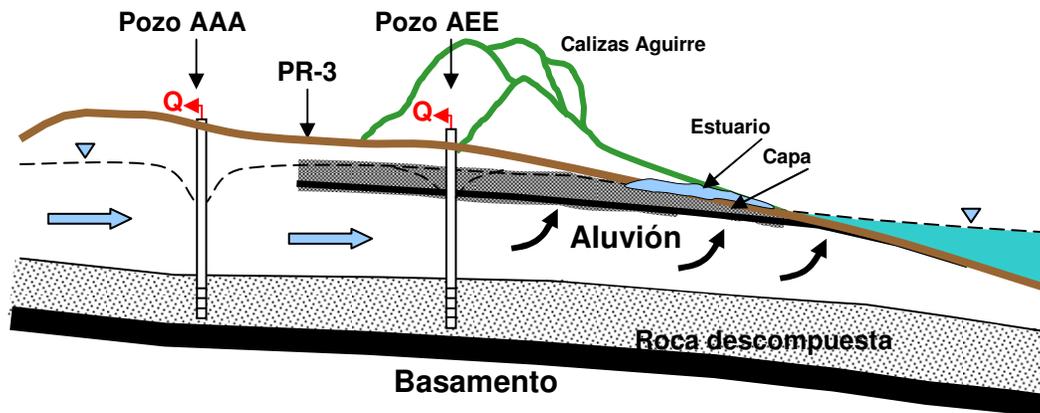


Fuente: USGS, 2010

Con la información de los estudios anteriores se desarrolló una sección lateral del Acuífero de Salinas en la zona de descarga de agua subterránea hacia la Reserva Jobanerr (Figura 8). Esta sección lateral provee un cuadro claro de la naturaleza del flujo de agua subterráneo en la vecindad de la Reserva. El estudio del USGS del 2010 utilizó una sección transversal similar y características hidrogeológicas comparables, ya que los datos surgieron de las mismas fuentes en estudios anteriores.

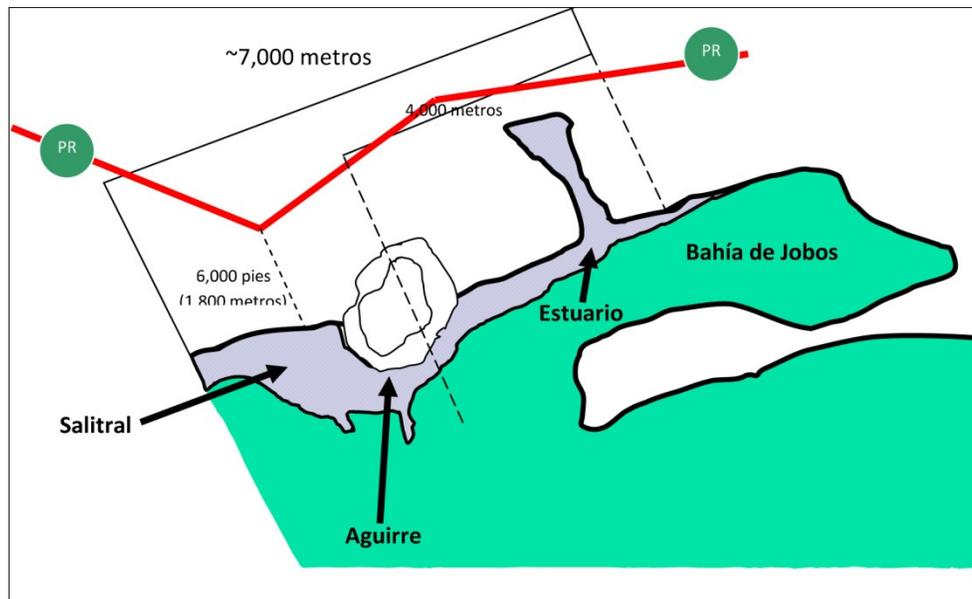
1. Lo importante de esta sección lateral es que el espesor de la capa del acuífero que contribuye agua hacia la Reserva es limitado, y varía entre 50-100 pies. Esto se debe a que el material poroso formado por aluvión y rocas descompuestas (ilustrado en el diagrama) se reduce hacia la costa, y está semi-confinado por capas de arcilla impermeables o semi-impermeables.

Figura 8. Sección lateral del Acuífero de Salinas en la vecindad de la Reserva Jobanerr.



2. El espesor de los materiales en el acuífero por sí solos no controlan el flujo de agua subterránea, sino la Conductividad Hidráulica (K), que es a su vez afectada por la porosidad del material. En el caso del acuífero que descarga a la Reserva Jobanerr, el USGS estima que la porosidad en esta zona no excede 0.15 unidades, lo que limita la permeabilidad a valores que no exceden 12 metros por día.
3. En el análisis, al asumir la aplicación de la Ecuación de Darcy a sectores del acuífero semi-confinado, se asume que este responde al gradiente hidráulico en forma similar que un acuífero no-confinado. Debido a que los datos de campo sugieren que las capas semi-confinadas no prevalecen, el error potencial de esta presunción es menor y no afecta significativamente los resultados del estimado.
4. La información disponible en los estudios del USGS permitió desarrollar una segunda sección del acuífero que alimenta la Reserva de Jobanerr, esta vez transversal (de este a oeste, denominada PR-PR). El propósito de esta sección fue estimar el área saturada del acuífero que contribuye flujo de agua subterránea a la Reserva, utilizando la ecuación de Darcy. Esta sección se ilustra en la Figura 9, proveyendo también el ancho del área de descarga.

Figura 9. Sección transversal en el Acuífero de Salinas que descarga agua subterránea a la Reserva de Jobanerr.



Los datos hidrogeológicos de las secciones transversales descritas en los párrafos anteriores se utilizaron para definir el área seccional (A) que conduce el agua subterránea. Los datos de los estudios del USGS permitieron estimar los valores de la Conductividad Hidráulica (K), mientras que la pendiente del manto de agua subterránea (dh/dl) se obtuvo del mapa potenciométrico. La integración de estos valores a la ecuación de Darcy permitió calcular el flujo de agua subterránea hacia la Reserva de Jobanerr. Estos cálculos en general coinciden con los resultados para condiciones estables (“steady state”) en el estudio de Kuniansky (USGS, 2010).

Estos cálculos establecen que el flujo máximo de agua subterránea del Acuífero de Salinas a la Reserva Jobanerr es de $0.0.018 \text{ m}^3/\text{s}$ por cada 1,000 pies lineales de la sección transversal que se ilustra en la Figura 9. Al calcular el flujo para toda la sección, cuyo ancho es de 2,897 metros (m), por lo que la descarga de agua subterránea promedio a la Reserva es de $0.175 \text{ m}^3/\text{s}$. Este flujo es equivalente a una descarga promedio del acuífero al estuario de 15,120 metros cúbicos por día (m^3/d). Anualmente, el total de agua fresca que contribuye el acuífero al estuario es de 5.52 millones de m^3 por año. Aunque este valor parece ser alto, en realidad, es menor al compararlo más tarde con la descarga de escorrentía que representa una lluvia de 254 mm, excedida ampliamente durante varios de los huracanes o vaguadas que afectan periódicamente la Región Sur.

Para validar que la contribución de las aguas subterráneas a la Reserva Jobanerr es relativamente menor, se calculó la cantidad de escorrentía que fluye desde el norte hacia el frente costanero de la Reserva. Estos cálculos se obtienen por el método de balance de masa, donde la Escorrentía (definida como R) es igual a la Precipitación (P) menos la Evapotranspiración (ET) menos la Infiltración (I). Los cálculos de se basaron en los siguientes datos o información:

1. Datos de precipitación (P) en la zona de Aguirre y Salinas necesarios para calcular el volumen de escorrentía generado para diferentes lluvias, obtenidos de las estaciones meteorológicas operadas por el Servicio Meteorológico Nacional (NWS) o por el USGS. Estos datos incluyen la lluvia acumulativa en las estaciones en Salinas (NWS) y Aguirre (USGS), los cuales se resumen en las Figuras 3 y 4. Estos datos de lluvia incluyen el total para el día o evento, así como la intensidad de la lluvia, de estar disponible.
2. Datos recientes en la zona de estimados de la Evapotranspiración (ET), en el área de Salinas cercana al VMS y la Reserva de Jobanerr. Los estudios del USGS de 1997 y el 2002 proveen esta información.
3. Datos recientes de la Infiltración (I) al acuífero costanero de parte de la Precipitación. Los estudios del USGS de 1997 y el 2002 proveen datos de Infiltración como parte de la calibración de los modelos matemáticos de flujo de agua subterránea en el Acuífero de Salinas.
4. El balance de agua para calcular la Escorrentía que fluye hacia el Estuario Jobanerr requiere definir con precisión la cuenca que nutre la Reserva. Esto se refiere a definir con precisión el área de captación que contribuye a la escorrentía que se dirige a la Reserva. Normalmente, las cuencas son definidas por diferencias en elevación en el relieve natural de los terrenos. Las montañas o colinas en una cuenca actúan como barreras que definen en qué dirección fluirá la lluvia que no se evapotranspira, convertida en escorrentía. En cuencas costaneras como es la de la Reserva Jobanerr, estos límites no son claramente definibles por métodos tradicionales y es necesario utilizar herramientas más sofisticadas. Para obtener un cálculo correcto y confiable, se utilizó el siguiente procedimiento:
 - a. La cuenca que drena hacia la Reserva Jobanerr se definió utilizando un Modelo de Elevación Digital. Este modelo tiene una base de datos geográfica para todo Puerto Rico, definiendo cada punto de la topografía con una precisión de 0.9 metros (m). Los mapas se prepararon utilizando las herramientas de un Sistema de Información Geográfica (GIS); los modelos digitales de elevación topográfica del USGS y de Pictometría del 1998; fotografías aéreas de Ikonos (OGP del 2004); y los datos hidrográficos del USGS y la Junta de Planificación.
 - b. Se estimó el área de captación por métodos independientes utilizando las fotos de Ikonos de OGP y los mapas topográficos del USGS. La Figura 5 muestra el área de captación a la Reserva con la base del mapa topográfico del USGS.

- c. El área de captación se calculó en aproximadamente 15.36 kilómetros cuadrados (km^2). El área de captación es fragmentada parcialmente por las carreteras PR-52 y PR-3 y los canales de Guamaní y Patillas de este a oeste.
- d. A pesar de que las líneas de contorno definen el área de captación con precisión, no se pudo identificar ningún cuerpo de agua definido que descargue superficialmente en la Reserva Jobanerr. La topografía del área no muestra áreas de concentración de flujo, lo que sugiere que la escorrentía superficial discurre como flujo laminar. Esto se puede deber a que existen varios canales y pequeñas charcas de irrigación que interceptan parte de la escorrentía que se genere a causa de eventos de lluvias menores.
- e. El área de captación estimada para la Reserva Jobanerr es de 3,796 acres, lo que es equivalente a 3,796 acres x 4,047 metros cuadrados (m^2) por acre, ó 15,362,412 m^2 de área de la cuenca contribuyente.
- f. Utilizando la lluvia promedio sobre el área de 1,016 milímetros (mm) (NWS, 2009), convirtiéndola en metros ($40/39.37$)=1.02 m, resulta en un volumen de lluvia promedio anual de 15.6 millones de m^3 .
- g. El DRNA estima que la evapotranspiración anual promedio en la cuenca de Salinas, cerca de Aguirre consume un promedio de hasta el 25 por ciento de la lluvia anual (75-250 mm, DRNA, 2004). Usando el valor más alto de 250 mm, resultaría en un volumen residual anual de escorrentía en la cuenca de 11.6 millones de m^3 .
- h. El volumen de escorrentía de 11.6 millones de m^3 anuales se reduce por la infiltración del agua al Acuífero de Salinas en el área de la cuenca de la Reserva de Jobanerr. Los estudios del USGS antes citados han determinado que la infiltración en la zona cercana a la costa de Aguirre puede variar entre 50 a 125 mm al año (USGS, 1997), dependiendo de las condiciones antecedentes de lluvia y humedad.
- i. Usando el valor de infiltración más alto de 125 mm anuales, lo que resulta en el número menor posible de escorrentía, obtenemos un sobrante de escorrentía que discurre hacia la Reserva Jobanerr de por lo menos 635 mm anuales sobre toda la cuenca (balance de la lluvia (1,016 mm anuales), menos la Evapotranspiración (25 % ó 254 mm, menos la Infiltración (127 mm). Estas 635 mm son equivalentes a 9.76 millones de m^3 anuales.
- j. Estos cálculos establecen que en años de lluvia promedio de 1,016 mm, la escorrentía superficial a la Reserva Jobanerr es casi dos veces la contribución de las aguas subterráneas (9.76 millones de m^3 versus 5.52 millones de m^3).
- k. Ahora, si tomamos en cuenta un evento de lluvia como Hortense, la cantidad de escorrentía hacia la Reserva es mucho mayor. La Figura 10 ilustra la lluvia promedio causada por Hortense sobre Puerto Rico en el 1998. En la cuenca que drena hacia la Reserva Jobanerr, la lluvia promedio fue de aproximadamente 152 mm en 24 horas. Para

Estos datos y análisis establecen que la fuente principal de agua a la Reserva Jobanerr no es el Acuífero de Salinas, sino la esorrentía proveniente de la cuenca que drena hacia la Reserva. La contribución de agua subterránea es importante durante los períodos de sequías anuales y severas, pero más importante para la salud ecológica de la Reserva son los pulsos de agua que son descargados durante eventos de gran magnitud como ocurrió en el 1960, 1970, 1979, 1985, 1989, 1996, y 1998, entre otros años de mucha lluvia. El 2009 y 2010 han sido años de lluvias abundantes en la zona de Aguirre, y es de esperarse que la salinidad en los humedales costaneros se haya reducido debido a la esorrentía que ha descargado hacia la Reserva.

El análisis en este informe sugiere que el balance ecológico de la Reserva Jobanerr oscila con los pulsos hidrológicos de lluvias intensas en la cuenca que nutre la reserva. En instancias como el 1985 y 1996, la Reserva recibe volúmenes extraordinarios de agua fresca en forma de un pulso casi instantáneo. Esta agua fresca en gran magnitud causa una reducción súbita en la salinidad de los ecosistemas costaneros como los mangles de agua salobre y salina que habitan parte de la Reserva, alternado el equilibrio dinámico alcanzado durante 10-15 años (Figura 11). Luego al sucederse un período normal de lluvia y esorrentía, el sistema regresa al equilibrio de condiciones promedio típico de la zona, prevaleciendo las especies que se adaptan lentamente a los cambios en incrementos de salinidad. Las condiciones de deterioro de la Reserva, con mortandad de secciones de mangles de varias clases, es probablemente la combinación de eventos cíclicos de lluvias intensas y sequías de entre 10 a 200 años, que se repetirán con el tiempo. La Reserva sufrirá estos cambios y las especies de flora y fauna alcanzaran un equilibrio dinámico de supervivencia.

Figura 11. Zona de manglares en la Reserva Jobanerr



Fuente: USGS, 2010

No se pretende concluir que las extracciones de agua subterránea aguas arriba de la Reserva Jobanerr no afectan el flujo de agua subterránea hacia la Reserva. Reducciones en niveles freáticos al norte de la Reserva se propagan hacia la costa, reduciendo el espesor de la zona saturada del acuífero, y por la Ley de Darcy, reduciendo el flujo hidráulico hacia la Reserva. Este efecto no es tan significativo como se supone, debido a que el espesor normal de la zona saturada en el Acuífero de Salinas en la costa cerca de la Reserva no es sustancial en comparación con otras áreas. Las reducciones históricas en los niveles freáticos cerca de la Reserva han sido menores, según lo demuestran los estudios del USGS. Las reducciones en los niveles freáticos en el acuífero son hacia el norte y el oeste de la Reserva, lo que no afecta significativamente el flujo de agua subterránea hacia la Reserva.

Es importante llevar a cabo estudios adicionales sistemáticos para medir con relativa precisión la escorrentía superficial y el flujo de agua subterránea que descarga a la Reserva Jobanerr. Esto permitirá desarrollar un plan de manejo más efectivo para la Reserva, incluyendo estrategias para minimizar los impactos de sequías severas y maximizar el uso del agua superficial en la Reserva.

REFERENCIAS

1. "Geology and Hydrogeology of the Caribbean Islands Aquifer System of the Commonwealth of Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands": by Robert A. Renken¹, W.C. Ward², I.P. Gill³, Fernando Gómez-Gómez¹, Jesús Rodríguez-Martínez¹, and others, 2002.
2. "Geohydrology and simulation of ground-water flow in the Salinas to Patillas area, Puerto Rico", by Quiñones-Aponte, Vicente, Gómez-Gómez, Fernando, and Renken, R.A.: U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 95-4063, 37 p., 1997.
3. "Structure and Depositional Patterns and their Influence on the Hydraulic Conductivity of Fan-Deltas in Southern Puerto Rico", by Robert A. Renken, Fernando Gómez-Gómez and others: in Aquifers of the Caribbean Islands, American Water Resources Association Monograph Series No. 15: AWRA, 1190, 2003.
4. "Electrical Analog Simulations of the Aquifers along the South Coast of Puerto Rico", by Gordon D. Bennett, USGS Open File Report 76-4, 1974.
5. "Horizontal Anisotropy of the principal ground-water flow zone in the Salinas alluvial fan, Puerto Rico" by Quiñones-Aponte, Vicente, 1989: Ground Water Journal, v. 27, no. 4, p. 491-500.
6. "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-

7. "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.
8. "Groundwater": Freeze R.A. y Cherry, J.A., Prentice Hall, Inc. New England, 1979.
9. "Effects of changes in irrigation practices and aquifer development on groundwater discharge to the Jobos Bay National Estuarine Research Reserve near Salinas, Puerto Rico", 2010, by Kuniansky, E.L and Rodríguez, J.M., USGS Scientific Investigations Report 2010-5022.

