

## **PROYECTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA PLANTA DE SANTA ISABEL PARA LA RECARGA DE ACUÍFEROS**

*Gregory L. Morris, P.E., Ph.D.<sup>1</sup>*

Transcripción y edición de ponencia ofrecida bajo el panel *Realidades de la reutilización de aguas residuales para proyectos agroindustriales en PR* en la conferencia *Reutilización de Aguas Residuales para la Agricultura: 1 de junio de 2016, San Juan, Puerto Rico.*

Resumen - El acuífero aluvial en la costa sur de Puerto Rico se extiende desde Ponce hasta Guayama. Las fuentes naturales de recarga de este acuífero incluyen la infiltración por el lecho de los ríos y la lluvia. Además, se complementan por la infiltración de agua en los canales de riego en tierra y la percolación profunda por el exceso de riego aplicado a las siembras en la planicie aluvial a lo largo de la costa. Sin embargo, cambios en el patrón de utilización de agua durante los últimos 40 años han afectado el acuífero, lo cual ocasiona un balance de agua no favorable. Este impacto ha sido el resultado de una reducción en recarga por consecuencia del aumento en la eficiencia en las prácticas de riego, lo cual reduce la percolación profunda, la reducción en el volumen total de riego, junto con el aumento en la utilización del agua para usos municipales, agua que se descarga hacia el mar luego de su utilización y tratamiento. El rendimiento de los embalses también está disminuyendo a consecuencia de la reducción en su capacidad por la sedimentación, y en el embalse Patillas por la reducción en el nivel operacional debido a consideraciones de seguridad del embalse. Además, debido al balance de hidráulica desfavorable, la calidad del agua en el acuífero también está amenazada por la intrusión salina y por niveles elevados de nitratos, principalmente derivados de actividades agrícolas. El balance de agua desfavorable junto con las amenazas a la calidad del agua ha impulsado al Departamento de Recursos Naturales y Ambientales a evaluar alternativas para la recarga del acuífero. Uno de estas alternativas incluye la utilización del efluente de la planta de tratamiento de Santa Isabel que actualmente se descarga al mar luego de recibir tratamiento secundario. Esto podría proveer una fuente confiable de agua para la recarga, aún durante periodos de sequía que podría afectar la disponibilidad de agua de otras fuentes de recarga. La técnica de recarga considerada más factible envuelve la aplicación de agua directamente a la superficie de terrenos con suelos con alta permeabilidad, aplicando un exceso de riego a una cosecha no comestibles, como es el heno. Un humedal artificial podría ser utilizada como un proceso de tratamiento adicional del efluente previo a su aplicación en la zona de infiltración, reduciendo la concentración de nitrato previo a su recarga.

*Palabras claves: Recarga de acuífero, acuífero del Sur, Puerto Rico, reutilización de aguas residuales tratadas*

---

<sup>1</sup> El autor es socio de GLM Engineering COOP, 742 Calle Prolongación Paz, Santurce, PR 00907, Email: gmorris@glmengineers.com

Abstract - Puerto Rico's south coastal alluvial aquifer extends from Ponce to Guayama. It is recharged naturally by infiltrating streamflow and rainfall, and is complemented by artificial recharge derived from infiltrating water in earthen irrigation canals and the deep percolation of excess irrigation water applied to crops on the coastal alluvial plain. However, changes in the water use pattern over the past 40 years have created an unfavorable water balance, a result of declining recharge due to increased irrigation efficiency, which minimizes deep percolation, decreased volumes of irrigation flows, and the increased extraction of water to supply municipal uses, water which is discharged to the sea following treatment. The yield from reservoirs is also being diminished by volume due to sedimentation, and at Patillas reservoir the additional requirement to reduce the operating level due to dam safety considerations. Beyond the unfavorable hydraulic balance, the quality of the water is also threatened by saline intrusion and high nitrate levels, derived primarily from agricultural activities. This combination of unfavorable water balance and water quality concerns led the Department of Natural and Environmental Resources to evaluate alternatives for aquifer recharge, including the utilization of effluent from the Santa Isabel treatment plant, water which is currently discharged to the sea following secondary treatment. This could provide a reliable source of recharge water, even during drought periods which can affect other potential sources of recharge water. The most feasible recharge mechanism is probably a land-spreading system which provides excess irrigation of non-food crops on permeable soils, such as hay production. A constructed wetland may be used to break the cycle of "direct" application of wastewater effluent to crops, as well as to reduce nitrate levels prior to recharge.

*Key words: Aquifer recharge, South aquifer, Puerto Rico, wastewater reuse*

## **Introducción**

La costa sur de Puerto Rico cuenta con un acuífero aluvial continuo entre los municipios de Ponce y Guayama, formado por depósitos de arena, piedra y grava transportados por los ríos, con zonas de rocas calizas en ciertas áreas en la cercanía del municipio de Ponce (DRNA, 2003). Este acuífero almacena agua, similar a un embalse grande, pero con algunos aspectos muy diferentes. El volumen de agua en un embalse se puede medir directamente, mientras que el volumen dentro de un acuífero se puede estimar solamente de manera indirecta. Por ende, requiere de múltiples pozos de observación para estimar su volumen. Como la reducción en el agua dulce en el acuífero no es visible, por décadas ha habido una tendencia a no prestarle tanta atención a este asunto.

El agua dulce dentro de los acuíferos costeros existe como una lámina en equilibrio con el agua salada del mar. El agua salada penetra tierra adentro en el material aluvial, y el agua dulce reside como una lámina sobre esta agua salada. La extracción de un volumen en exceso de agua disminuye el nivel dentro del acuífero, y a la misma vez permite el avance de agua salada adentro de la zona del acuífero. Mantener el volumen de agua dulce requiere sostener sus fuentes de recarga para mantener el balance entre el agua dulce y el agua salada dentro del acuífero. Mientras

más agua dulce se extrae del acuífero, la lámina del agua dulce disminuye, permitiendo el avance de agua salada hacia los pozos, un proceso denominado intrusión salina, según ilustrado en la Figura 1. Es por tal razón que el uso de esos acuíferos como fuente de agua debe ser un proceso medible para no alterar demasiado el equilibrio del sistema. Este equilibrio se puede preservar limitando la tasa de extracción, al proveer recarga adicional (recarga artificial), o utilizando ambas estrategias. Para mantener esa utilización de agua en la costa sur de modo que apoye las actividades económicas de la zona, el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA) favorece el enfoque de maximizar la recarga.

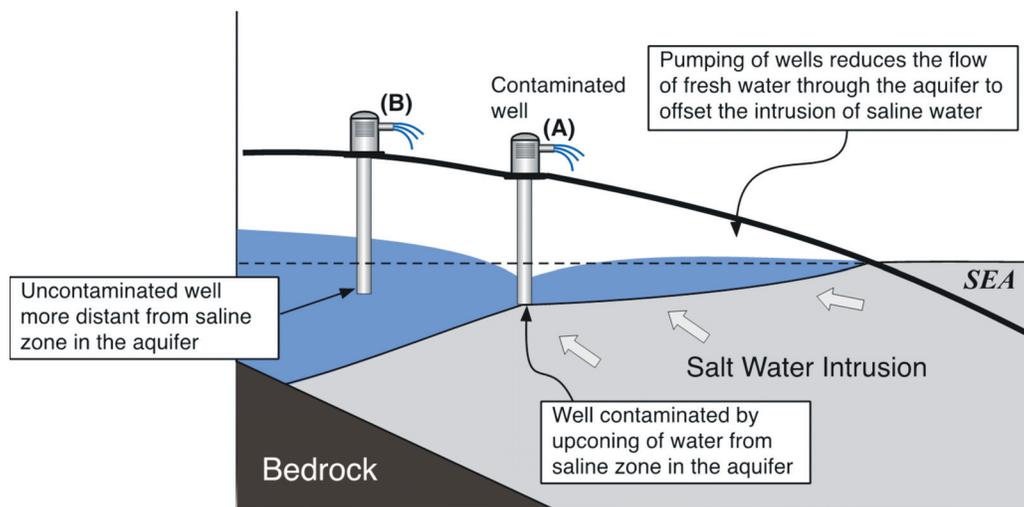


Figura 1. Proceso de la intrusión salina en un acuífero que señala el avance del agua salada dentro del acuífero cuando la tasa de bombeo excede la recarga y desplaza el agua dulce.

Durante el 2015, la región del acuífero del sur entre los municipios de Santa Isabel y Salinas fue declarado en un estado crítico por la DRNA debido al deceso en sus niveles. Pero el problema es aún más crítico ya que no hay información referente a la posición y avance de la cuña de agua salada en el acuífero hacia los pozos de producción a consecuencia del desequilibrio entre la tasa recarga y extracción. El espesor del agua dulce en el acuífero disminuye en la medida en que el acuífero se acerca a la costa (Figura 1), haciendo los pozos más cercanos a la costa los más afectados. Según la relación Ghyben-Herzberg que describe el balance entre el agua dulce y salada en un acuífero costero, cada pie de reducción en el nivel de la superficie del acuífero permite un ascenso de 40 pies de la interface con el agua salada.

### La recarga natural y artificial del acuífero

La recarga del acuífero proviene de fuentes naturales, de la percolación a través de los lechos de los ríos y de los eventos de un exceso de lluvia sobre la

superficie de la tierra, y principalmente por la percolación profunda de agua de riego, como producto de la actividad agrícola en la zona. En este tipo de acuífero, los eventos de lluvia extrema son particularmente importantes como fuente de recarga (Jasecko & Taylor, 2015). Por ende, el acuífero puede experimentar varios años de extracción neta, previo a un evento importante de recarga.

A lo largo del tiempo, la recarga del acuífero del Sur se ha visto afectada por varios factores. Entre estos factores se destacan la reducción en la utilización de agua por riego, junto con el aumento en la eficiencia del riego que ha disminuido sustancialmente la percolación profunda de agua producto de la actividad agrícola de la zona. En la época de producción de caña de azúcar aproximadamente el 30% del agua de riego regresaba al acuífero como recarga, lo cual representa más o menos la tercera parte del agua que entraba al acuífero, debido a que el sistema de riego era mediante surcos en la tierra.

Por otro lado, el patrón de extracción por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA) también ha aumentado la utilización de agua del acuífero. Cabe señalar que una parte del agua que la AAA extrae de los embalses que pertenecen al sistema de riego y de sus pozos, percola y regresa al acuífero debido a las pérdidas en los sistemas de distribución. Sin embargo, las aguas usadas se llevan a las plantas de tratamiento en los municipios de Santa Isabel y Guayama y son descargadas al mar o utilizadas para sistemas de enfriamiento de las plantas generatrices de electricidad. O sea, la modernización de la costa sur ha resultado en un patrón de utilización de su recurso hídrico que ha resultado ser desfavorable para el acuífero, lo que ha provocado un problema en el balance del agua. Por encima de este patrón de modernización, hay una reducción en la oferta de agua en los embalses debido al proceso de sedimentación. En el caso de Coamo hace décadas que la sedimentación provocó la pérdida de este embalse. El embalse Patillas ha perdido casi el 50% de su capacidad original debido a la sedimentación. Además, la AAA ha tenido que reducir la capacidad de este embalse debido al potencial de rotura durante un terremoto; esto representa una reducción de 30% en su volumen operacional actual. De todos los embalses de la región, el embalse de Carite es el único que presenta poca sedimentación.

¿Cuán serio es el problema en este acuífero? La Figura 2 muestra el historial del pozo Alomar-1 en el área de Santa Isabel, uno de los pozos de observación del US Geological Survey. Ese historial muestra el descenso dramático que ocurrió a consecuencia de la sequía de 1967-68, el más fuerte en más de 100 años de record, pero también demuestra que a partir de 1993 los niveles en el acuífero se han mantenido inferior al nivel del mar por periodos prolongados, una situación que impulsa la intrusión salina.

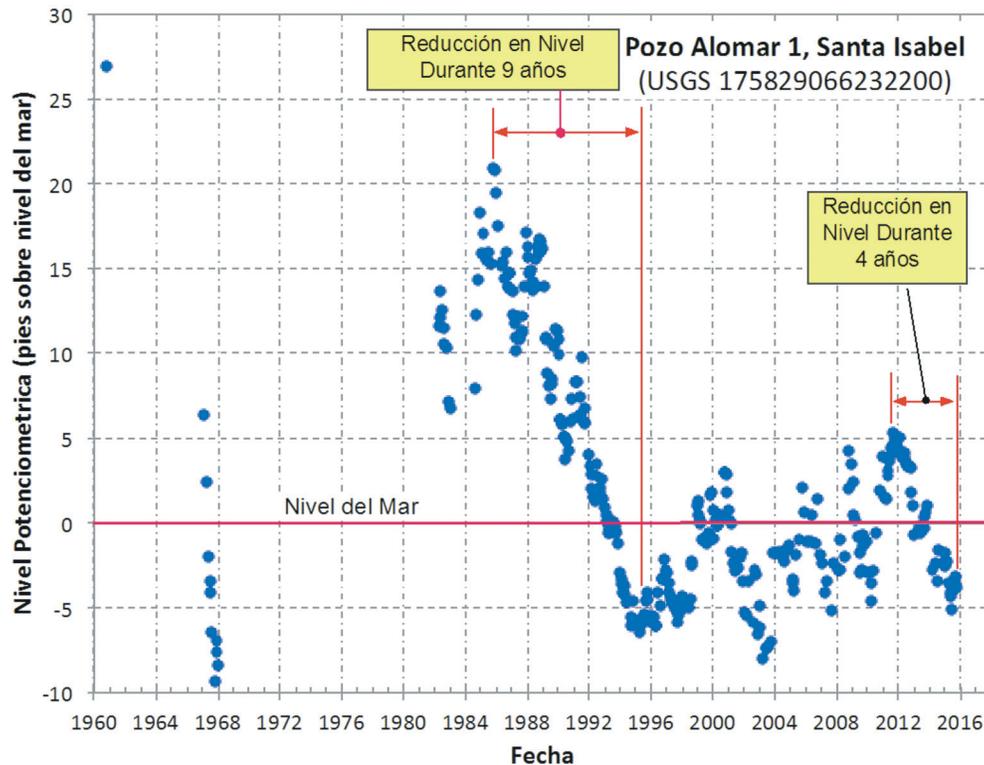


Figura 2. Nivel de agua dulce en el pozo Alomar 1, Santa Isabel.

### Disponibilidad de aguas residuales tratadas

Una de las opciones que ha sido considerada para manejar el estado crítico en que se encuentra el acuífero en la zona de Santa Isabel es la reutilización de las aguas residuales tratadas de la planta de Santa Isabel como fuente de recarga para el acuífero. El efluente de la planta de tratamiento secundario de agua de Santa Isabel se descarga al mar. Esta planta produce aproximadamente 1.4 mgd, pero en días con lluvia la descarga puede subir a 2.0 mgd debido a la influencia de aguas pluviales hacia el sistema sanitario (Figura 3).

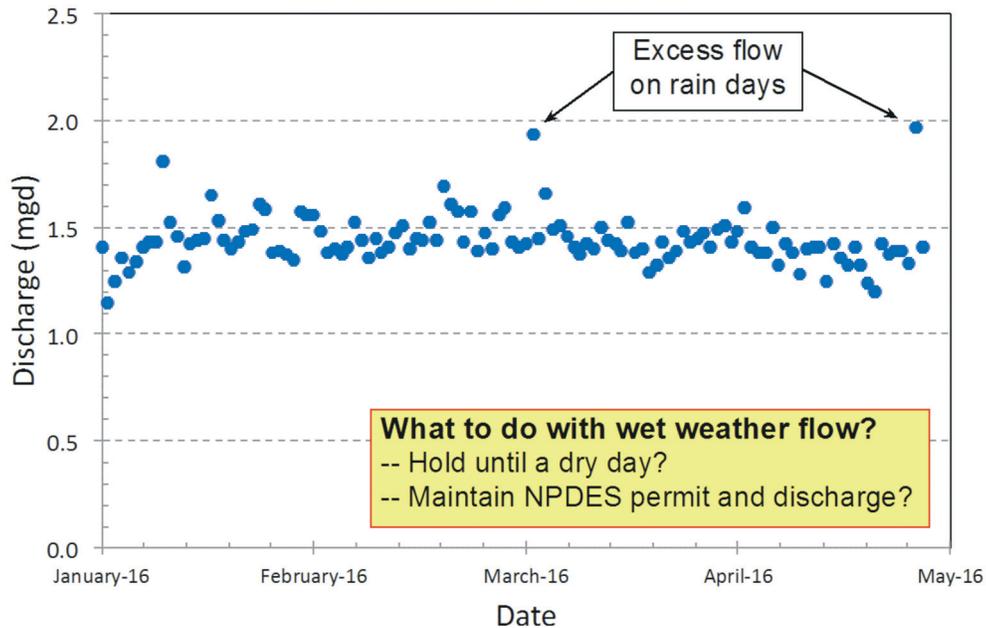


Figura 3. Descargas diarias de la planta de tratamiento de Santa Isabel (datos de la AAA).

La planta actualmente descarga hacia el mar mediante un permiso federal del Sistema Nacional de Eliminación de Descargas de Contaminantes (NPDES, según sus siglas en inglés). Si el sistema de reutilización que se propone no puede manejar los caudales mayores que provienen de periodos lluviosos, será necesario mantener el permiso de descarga. La otra opción sería proveer un volumen de almacenaje para evitar la descarga del efluente en días que no se puede practicar la recarga debido al exceso de lluvia, convirtiéndolo así en un sistema de cero descargas. Para esta opción, se podría utilizar un humedal rodeado por una berma o utilizar charcas de almacenaje, de lo cual existen muchos en la costa sur.

Con respecto a la calidad de agua del efluente, hay que considerar varios parámetros, pero particularmente dos parámetros importantes: los organismos patógenos y la concentración de nitrato. A pesar de que el agua tratada recibe desinfección, el proceso no es perfecto, y hay que proveer barreras adicionales entre el agua tratada y el ser humano. Sin tratamiento adicional al secundario que ya posee, se puede reusar el agua tratada para irrigar forrajes y cosechas similares, pero no debe ser utilizada para riego de cosechas de consumo directo como son los vegetales. De proveer filtración adicional al efluente, esto mejoraría sustancialmente su calidad, y ampliaría las oportunidades de reutilización. Sin embargo, este proceso de filtración puede subir el costo de reutilización del agua de manera significativa.

El acuífero en la zona de Santa Isabel tiene niveles elevados de nitrato ( $\text{NO}_3$ ), un contaminante que puede ocasionar hasta la mortalidad de infantes al ingerirse en

concentraciones elevadas, debido a que interfiere con la transferencia de oxígeno en la sangre. Las regulaciones federales de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) establecen como límite para nitratos solo 10 mg/L, mientras que el Departamento de Salud de Puerto Rico solo permite 7 mg/L. El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) ha documentado un aumento en nitrato en varios pozos en Santa Isabel desde un rango de 0.9 a 5.9 mg/L durante 1967, al rango de 1.3 a 23.6 mg/L durante 2008 (Rodríguez, 2008). El nitrato en el acuífero proviene de actividades agrícolas, principalmente aquellas que utilizan abono y estiércol como fertilizante, pues ambos contienen nitrógeno en forma de amoníaco o nitrato. La infiltración de pozos sépticos también puede ser una fuente importante en las comunidades sin alcantarillado sanitario.

### Técnicas alternas para recargar el acuífero

Otras opciones de recarga al acuífero incluyen un sistema de infiltración o pozos de inyección, ambas ilustradas de manera esquemática en la Figura 4. Los pozos de inyección tienen la limitación de que pueden taparse debido al crecimiento de bacterias y acumulación de sólidos entre los granos de arena en el acuífero.

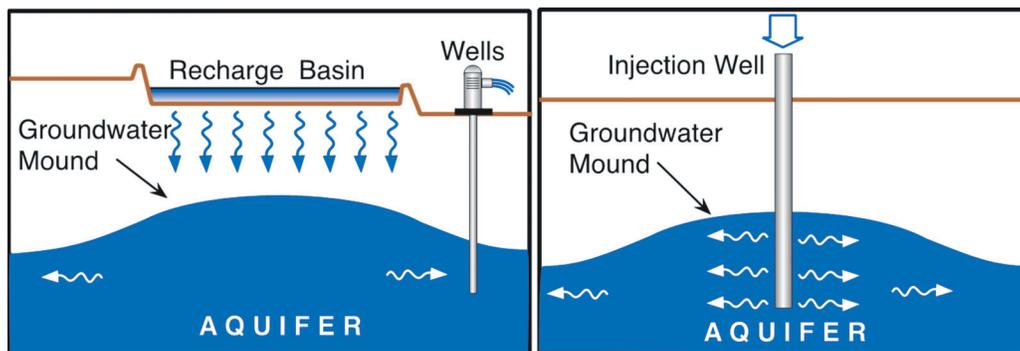


Figura 4. Opciones de recarga de acuíferos.

Considerando el tipo de suelo en la costa sur, la mejor estrategia sería el aplicar el agua a la superficie del suelo en zonas con suelos de alta permeabilidad. En la Figura 5 se muestra un mapa de Santa Isabel que señala la permeabilidad del suelo. Las zonas en rojo tienen la mejor tasa de percolación, las cuales son favorables para la ubicación de un sistema de recarga.

Esta aplicación no debe ser mediante un sistema de inundación continuo por el problema del crecimiento de bacterias que puede sellar el fondo de la laguna de recarga. Por ende, en estos casos para mantener la permeabilidad del suelo se utiliza aplicación intermitente junto con el crecimiento de vegetación, ya que la vegetación es importante para mantener la permeabilidad. El estudio realizado por González-Merchan et al. (2014) demostró que la presencia de vegetación aumenta

la tasa de infiltración de 2 a 4 veces la tasa en suelo sin vegetación. Esto implica que el sitio de aplicación podría utilizarse para la producción de forraje, con la aplicación de un volumen excesivo de riego para maximizar la percolación profunda hacia el acuífero. La vegetación también tiene el beneficio de remover una fracción del nitrato, pero habría que establecer un balance entre la tasa de aplicación y la utilización de nitrógeno por cosecha para minimizar la percolación de nitrógeno hacia el acuífero. También se puede bajar la concentración de nitrógeno en el agua mediante un proceso de remoción o por dilución con agua de los canales de riego.

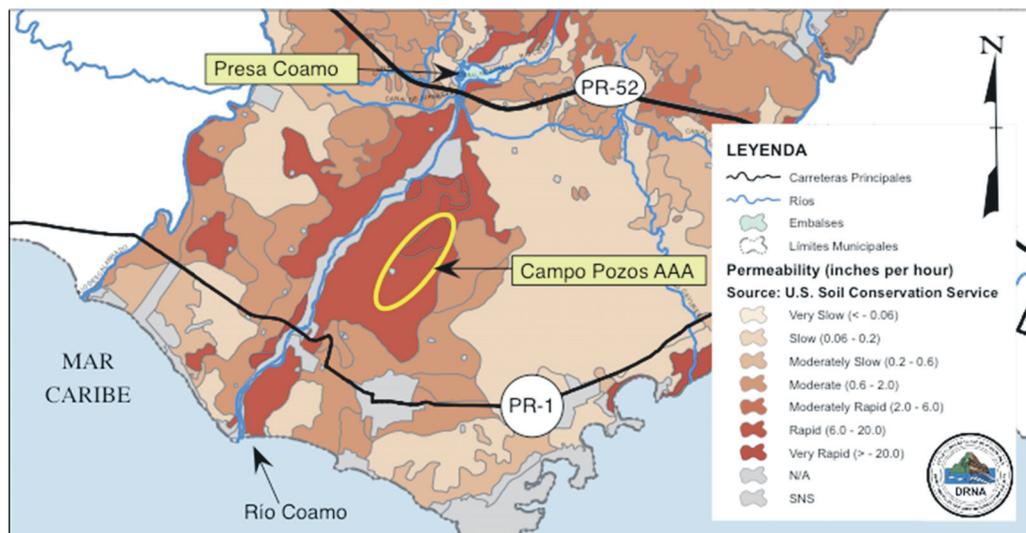


Figura 5. Mapa de permeabilidad del suelo para Santa Isabel (DRNA).

### Utilización del agua para el riego del cultivo de guineo

Otra posibilidad puede ser la utilización del agua para el riego, por ejemplo, de una cosecha de guineo. Para maximizar la recarga, podría aplicarse un volumen de riego mucho mayor a la necesidad de la cosecha. En una plantación de guineo se puede aplicar de 4 a 5 pies de profundidad de agua de riego durante un año, dependiendo de cuánto llueve y la permeabilidad del suelo. Sin embargo, la tasa de utilización del agua por la cosecha no es constante. La Figura 6 muestra la variación mensual en la tasa de utilización de agua en una plantación de guineo en la estación de Fortuna en la costa sur. Algunos meses utilizan 135% de la utilización promedio, y en otros meses la utilización del riego se reduce a la mitad del promedio anual.

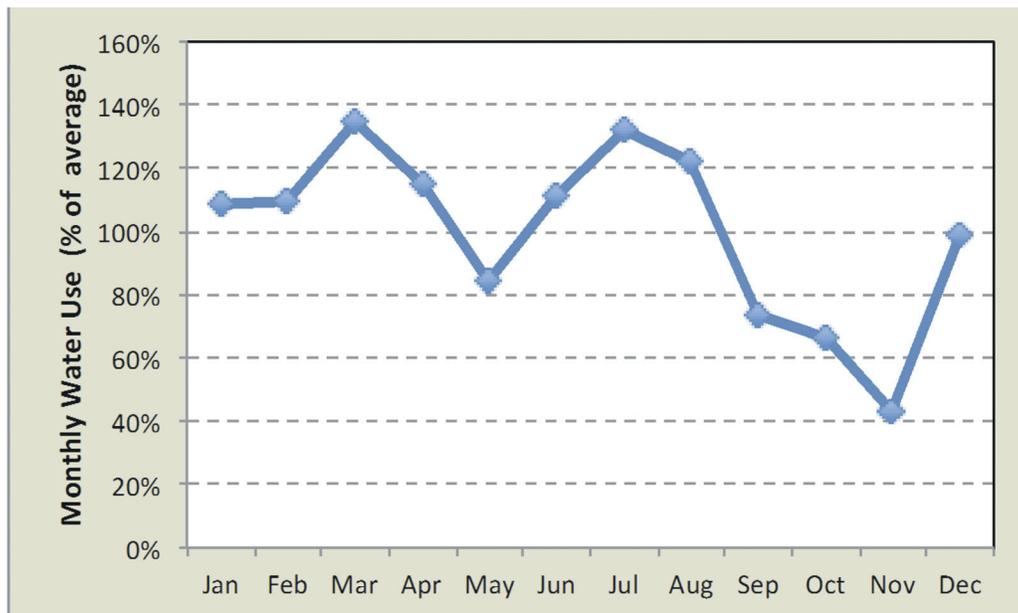


Figura 6. Uso de agua mensual en una plantación de guineo en la estación de Fortuna en la costa sur de Puerto Rico (preparado con datos de Goenaga et al.,1995).

Con aproximadamente 1.4 mgd de aguas residuales tratadas, el efluente de la planta de Santa Isabel podría proveer riego para aproximadamente 300 a 325 acres de las plantaciones de guineo. Sin embargo, al aplicar este mismo volumen a la mitad del total de cuerdas, podría considerarse que aproximadamente la mitad del agua (0.7 mgd) contribuiría a la recarga del acuífero. Otra alternativa sería utilizar el agua tratada para el riego, y aplicar un volumen equivalente de agua del canal de riego a un sistema de recarga en otro lugar. Esta opción aumenta la recarga sin reducir la cantidad de agua utilizada en el riego. Para ser viable esta opción, habrá que ajustar la tasa de aplicación de acuerdo a la tasa de utilización de nitrógeno por la cosecha. La tasa de fertilización con nitrógeno recomendada en Puerto Rico es de 240 kg/ha/año (Irizarry et al., 2002) a 530 kg/ha/año (Goenaga et al., 1995), dependiendo del suelo y método de producción.

### Opciones indirectas de la reutilización de aguas residuales tratadas

Otra de las alternativas analizadas es la descarga de las aguas residuales tratadas hacia un canal de riego. En este caso, estas aguas podrían descargarse al canal de Juana Díaz, el cual se nutre del embalse Guayabal. Sin embargo, para que el agua del canal se pueda aplicar en cualquier cosecha, incluyendo vegetales, requeriría la necesidad de asegurar una mayor calidad del agua descargada, en comparación a la opción de aplicar el efluente a una zona de recarga con una siembra de forraje.

Otra alternativa sería descargar el efluente al río Coamo para permitir que se filtre hacia el acuífero a través del lecho del río, el cual es seco durante una buena parte del año. Sin embargo, esto implica un permiso NPDES, y sin agua de dilución debe requerir una mayor calidad de efluente en comparación a la opción de descarga hacia el sistema de infiltración mediante el riego de forraje.

### **Utilización de humedales para la remoción de nitrato en aguas residuales**

El alto nivel de nitrato es un problema en el acuífero de Santa Isabel. Por lo tanto, el agua de recarga no debe empeorar este problema. La concentración de nitrato en el agua tratada se puede reducir dentro de la planta de tratamiento, o se puede utilizar un humedal para tratar las aguas a un mayor grado luego de salir de la planta de tratamiento. El tratamiento con humedales tiene la ventaja de utilizar procesos naturales en vez de tecnología costosa e intensiva que requieren equipos y energía. Por ejemplo, el sistema de tratamiento por humedales en Riverside, California (Prado Wetlands) recibe y remueve el nitrógeno de las aguas residuales tratadas de las plantas de tratamiento secundario ubicadas aguas arriba a lo largo del río Santa Ana. El humedal reduce sustancialmente la concentración de nitrato y otros contaminantes.

En el caso de Salinas y Santa Isabel, una opción muy interesante sería descargar las aguas de la planta al humedal antes de destinarlo para otro uso, sea infiltración o combinar con las aguas del canal de riego. Se requiere aproximadamente 4 días de tiempo de detención en el humedal para bajar la concentración de nitrato y otros contaminantes como los residuos de productos farmacéuticos.

### **Consideraciones finales**

Todas las opciones de reutilización envuelven un sistema de bombeo y tubería de varios kilómetros de largo para llevar el agua tratada desde la localización de la planta de tratamiento en la costa hacia la zona de aplicación. Esto hace que las alternativas tengan un costo significativo. Además, dado la calidad del agua y las necesidades de proteger contra patógeno y niveles elevados de nitratos, hay que considerar la posibilidad de requerir un nivel de tratamiento adicional previo a la reutilización. Bajo este escenario, el tratamiento dentro de un humedal artificial es, probablemente, la opción más costo-efectiva. La aplicación de un exceso de riego a una cosecha de forraje en suelos de alta permeabilidad puede ser factible sin un cambio significativo en el sistema de tratamiento, y probablemente representa la opción de menor costo.

Sin embargo, existen otras alternativas. Para eliminar el costo de construir y operar una estación de bombas y línea de tubería, y eliminar interrogantes relacionados a la calidad del agua y el tiempo que requiere la modificación de los permisos de la planta de tratamiento para la disposición del efluente, el DRNA

prefiere utilizar el agua del río Coamo como fuente de recarga sobre terrenos de alta permeabilidad (con cosecha de forraje, por ejemplo). O sea, se utiliza la misma técnica de recarga, pero con una fuente de agua de mayor calidad, así elimina el problema de patógenos y del nitrato. Un flujo de hasta 10 pies cúbicos por segundo se puede desviar desde la cresta del vertedero del embalse Coamo, y por gravedad distribuirlo a las zonas de recarga, durante periodos de flujo adecuado en el río. Se considera favorable la reutilización del agua de la planta de tratamiento de Santa Isabel, pero como segunda opción, debido a los costos de transmisión y tratamiento envuelto, y el tiempo prolongado necesario para el proceso de estudios y permisos.

## Referencias

- Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. (2003). *Condición hidrogeológica de los acuíferos de la región sur de Puerto Rico y estrategias para su restauración*. Oficina del Plan de Aguas, Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. Recuperado de [http://www.recursosaguapuertorico.com/Acu\\_\\_feros\\_del\\_Sur\\_DRNA\\_2005.pdf](http://www.recursosaguapuertorico.com/Acu__feros_del_Sur_DRNA_2005.pdf)
- Goenaga, R., Irizarry, H., Coleman, B., & Ortiz, E. (1995). Drip irrigation recommendations for plantain and banana grown on the semiarid southern coast of Puerto Rico. *Journal of Agriculture Univ. Puerto Rico*, 79 (1-2), 13-27.
- Gonzalez-Merchan, C., Barraud, S., & Bedell, J-P. (2014). Influence of spontaneous vegetation in stormwater infiltration system clogging. *Environmental Science and Pollution Research*, 21 (8), 5419-26. doi:10.1007/s11356-013-2398-y.
- Irizarry, H., Goenaga, R., & Chardón, U. (2002). Nitrogen fertilization in banana grown on a highly weathered soil of the humid mountain region of Puerto Rico. *Journal of Agriculture Univ. Puerto Rico*, 86 (1-2), 15-26.
- Jasechko, S., & Taylor, R. G. (2015). Intensive rainfall recharges tropical groundwater. *Environmental Research Letters*, 10 (12), 124015. doi:10.1088/1748-9326/10/12/124015.
- Rodríguez, J. M. (2013). Evaluation of groundwater quality and selected hydrologic conditions in the south coast aquifer, Santa Isabel area, Puerto Rico, 2008-09. USGS Scientific Investigations Report 2012-5254, San Juan.