

# Viabilidad de la construcción de un túnel desde el Río Bauta en Orocovis hasta el Embalse Toa Vaca en Villalba para aumentar los abastos de agua a la Región Sur

Ferdinand Quiñones, PE y Alberto Lázaro, PE

Los municipios de Ponce, Peñuelas, Villalba, y Juana Díaz reciben agua potable de plantas de filtración que se alimentan de varias fuentes, primordialmente de los embalses Cerrillos, Toa Vaca, Matrullas, Guineo, Guayabal, y Garzas (Figura 1). Los acuíferos costaneros también contribuyen cantidades menores de agua potable a los sistemas de distribución en la zona de Ponce. Las proyecciones de crecimiento de la población en la zona, y los estimados de demanda futura de agua potable, establecen que eventualmente será necesario aumentar los abastos para mantener un servicio de agua potable seguro y confiable. Una de las alternativas potenciales que podrían aumentar los abastos de agua a la zona de Ponce es la construcción de un túnel desde el Río Bauta, cerca de Orocovis, hasta un tributario del Embalse Toa Vaca cerca de Villalba. Este proyecto fue propuesto en 1970 por el "US Bureau of Reclamation" (USBR, 1970). Un análisis adicional del Túnel Bauta fue llevado a cabo en el 2004 para la Autoridad para el Financiamiento de la Infraestructura (AFI) por Greg Morris Engineering (GME, 2004).

Este artículo resume un estudio adicional de la viabilidad del Túnel Bauta, llevado a cabo en el 2007-08 por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA), como parte de los análisis a largo plazo de las necesidades de agua en Puerto Rico. En adición a los estudios antes referidos, la AAA utilizó la siguiente información en el nuevo análisis: datos de flujos promedios diarios históricos en la estación 50034000 operada por el USGS en el Río Bauta cerca de Orocovis; mapas topográficos del USGS de la zona del proyecto (USGS, 2007); datos climatológicos

de la zona de estaciones operadas por el Servicio Nacional de Meteorología (NWS); estudios de consultores sobre el costo estimado de túneles para conducir agua; y consultas con firmas especializadas en el diseño y supervisión de la construcción de túneles para abastos de agua o sistemas sanitarios.

## Concepto del Túnel Bauta

El desarrollo del Embalse Toa Vaca (completado en 1972) tenía como propósito aumentar en varias etapas el rendimiento seguro de agua para la zona de Ponce. El Embalse Toa Vaca drena un área de captación en el Río Toa Vaca de solamente 22.0 millas cuadradas (mi<sup>2</sup>). En esta cuenca

en la parte alta de la Región Sur, la lluvia promedio anual es de aproximadamente 65 pulgadas, mientras que la evapotranspiración potencial puede alcanzar hasta 45 pulgadas anuales. Esto resulta en escorrentías moderadas y sequías intensas y frecuentes. En consecuencia, se reconoció desde un principio que la cuenca del Río Toa Vaca no tenía la capacidad hidrológica para suplir un volumen adecuado de agua al nuevo embalse.

El diseño original de Toa Vaca incluyó la construcción del Túnel Bauta como un elemento de un ambicioso complejo de embalses, túneles, e interconexiones para desviar hasta 100 mgd de la Región Norte a la Región Sur (USBR, 1970). La Autoridad de las Fuentes Fluviales (AFF, ahora AEE) contrató los servicios del USBR para construir solamente la represa que forma el Embalse Toa Vaca y abandonó los planes para los elementos de las fases subsiguientes, incluyendo el Túnel Bauta.



Figura 1. Zona de Ponce y embalses que le proveen agua.

## Viabilidad Hidrológica del Túnel Bauta

La disponibilidad de agua es uno de los factores críticos en la viabilidad del Túnel Bauta. El Río Bauta, la fuente de agua potencial para el túnel, es un tributario del Río Grande de Manatí en su cuenca superior cerca de Orocovis (Figura 2). En esta zona, la lluvia promedio anual es de aproximadamente 80 pulgadas, lo que resulta en una escorrentía abundante (Figura 3). El USGS ha operado desde 1969 en el puente de la Carretera PR-157 una estación para medir la escorrentía en el Río Bauta (estación 50034000). Esta estación, con un área de captación de 16.7 mi<sup>2</sup>, fue establecida precisamente como parte de los planes para el desarrollo del Embalse Bauta, fuente potencial de agua al Túnel Bauta (USBR, 1970). Los datos de la escorrentía histórica en la estación operada por el USGS se resumen en la Figura 4.



Figura 2. Cuenca del Río Bauta en la cuenca superior del Río Grande de Manatí.

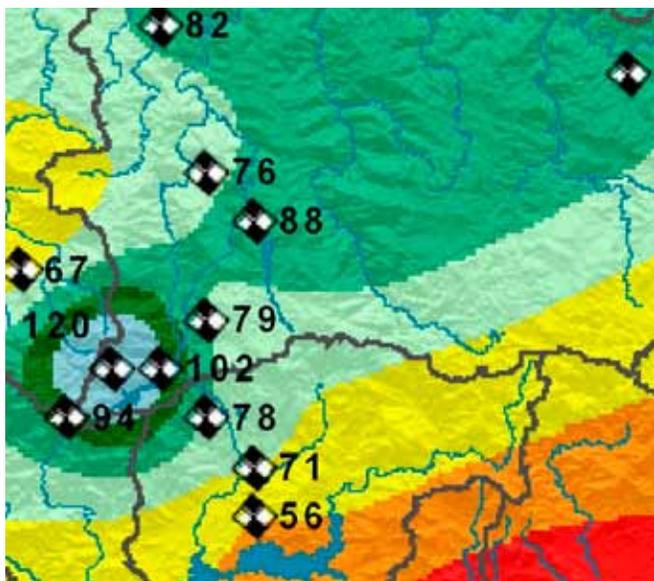


Figura 3. Lluvia promedio en la cuenca del Río Bauta (pulgadas anuales). Fuente: DRNA, 2004

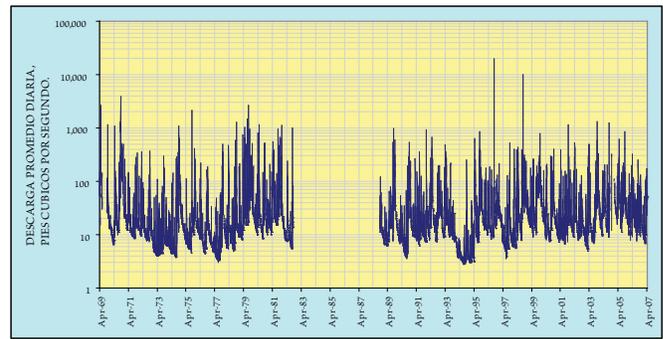


Figura 4. Flujo promedio diario desde 1969 hasta el 2007 en la estación 50034000 operada por el USGS en el Río Bauta cerca de Orocovis. Fuente: USGS, 2007

Un análisis de la frecuencia de los flujos de dichos datos (Figura 5) refleja un rendimiento seguro (Q99, o el flujo que es excedido el 99 % del tiempo) de 3.4 pies cúbicos por segundo, pcs (equivalente a 2.2 millones de galones por día, mgd).

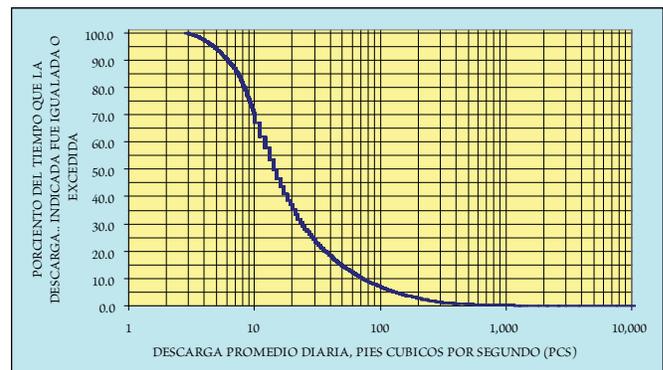


Figura 5. Curva de frecuencia de flujos en la estación 50034000, Río Bauta cerca de Orocovis. Fuente: USGS, 2007

La acumulación histórica de escorrentía (curva de masa) en la estación se resume en la Figura 6, reflejando un promedio anual de escorrentía de 25,000 acres-pies, sin cambios significativos en el patrón histórico de escorrentía en el lugar. Esto se debe a que no existen extracciones de agua significativas en el Río Bauta aguas arriba de la estación. La curva de frecuencia en la Figura 5 establece que el flujo de 4 pcs (2.6 mgd) se excede el 97 % del tiempo, mientras que el flujo de 200 pcs (129 mgd) se excede el 2.8 % del tiempo. Estos datos nos permiten, junto a la curva de masa de flujos de la estación (flujo acumulativo), estimar la cantidad de agua que podría extraerse entre las frecuencias indicadas. La curva de masa se ilustra en la Figura 6. La curva refleja el período de 1983-89 cuando la estación no fue operada. Este período fue estimado mediante una correlación con la estación del USGS 50031200 (Río Grande de Manatí cerca de Morovis).

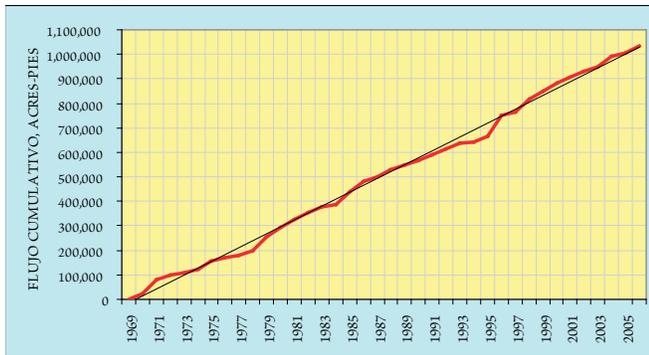


Figura 6. Curva de masa para la estación 50034000 en el Río Bauta (línea roja; la línea negra es la de rendimiento constante). Fuente: USGS, 2007

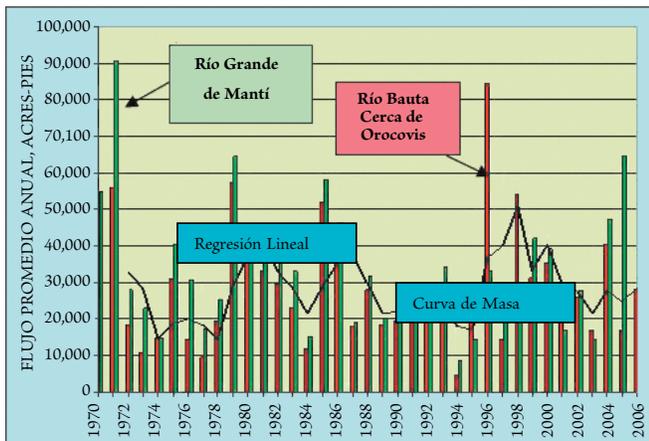


Figura 7. Correlación entre el flujo promedio anual en las estaciones 50034000 (Río Bauta cerca de Orocovis) y 50031200 (Río Grande de Manatí near Morovis). Fuente: USGS, 2007

Los datos de frecuencia de flujos, masa acumulada y variaciones anuales en las figuras 5, 6, y 7 permiten elaborar una estrategia conceptual para la extracción de agua del Río Bauta y su posible desvío mediante el Túnel Bauta al Embalse Toa Vaca. Utilizando la curva de frecuencia de flujos se derivó la siguiente estrategia:

1. Mantener en el Río Bauta aguas abajo de la posible toma un flujo que exceda el 100% del Q99, cumpliendo con las normas del DRNA sobre flujos mínimos. Se extraerían solamente los flujos que excedieran 4.0 pcs, lo que es mayor que el Q99 de 3.4 pcs calculado de la Figura 5.
2. Extraer toda el agua que exceda los 4 pcs indicados hasta un máximo de 600 pcs. El diseño de la toma y el túnel permitiría esta extracción por gravedad, la que podría totalizar hasta 20,000 acres-pies anuales. La cantidad final de agua que se podría exportar dependerá del diámetro y pendiente del túnel, así como del diseño de la toma. En el mejor de los escenarios, de exportarse 20,000 acres-pies anuales, esto

representaría en el Embalse Toa Vaca un aumento en su rendimiento seguro de aproximadamente 18 mgd. Este aumento en el rendimiento seguro del Embalse Toa Vaca sería adecuado para satisfacer las demandas de agua en la zona de Ponce hasta el año 2050.

Es importante anotar que el escenario anterior representa la condición de flujo anual promedio de 28,000 acres-pies. Ocurre una gran variabilidad en el flujo total anual en el Río Bauta, como se ilustra en la Figura 7. En el 1994, durante la sequía histórica que afectó la Región Norte, el flujo anual en la estación 50034000 en el Río Bauta fue de solamente 8,822 acres-pies. Esto hubiera limitado las extracciones a menos de un tercio del promedio de 20,000 acres-pies propuesto. En comparación, en varios años los flujos totales anuales excedieron 40,000 acres-pies, con un máximo de 90,489 acres-pies en el 1971. De construirse el Túnel Bauta, requeriría extracciones mayores en años de escorrentía abundante, por lo que el diseño de su capacidad máxima es de gran importancia.

En conclusión, los datos y análisis anteriores demuestran que el Río Bauta en la vecindad del puente de la Carretera PR-157 cuenta con suficiente agua para permitir una extracción de hasta 20,000 acres-pies anuales (promedio), agua que pudiera desviarse hacia la Región Sur. El efecto de esta extracción de agua en la cuenca del Río Grande de Manatí sería menor, ya que el área de captación del Río Bauta representa aproximadamente el 8.5 por ciento del área de captación total de la cuenca (16.7 de 197 mi<sup>2</sup>). En términos de la fracción del flujo total de la cuenca que sería extraído, el flujo promedio anual en la cuenca del Río Grande de Manatí en la Carretera PR-1 cerca de Manatí (estación del USGS 50038100) es de aproximadamente 284,600 acres-pies al año, o más de 10 veces el promedio en el Río Bauta cerca de Orocovis.

### Rutas Potenciales del Túnel Bauta

La extracción potencial de agua del Río Bauta para el Túnel Bauta podría llevarse a cabo por gravedad en forma similar a la utilizada en el Río Fajardo. El punto de entrada del agua al túnel tendría que estar a una elevación suficiente para proveer un nivel estático adecuado para permitir el flujo por gravedad a lo largo del túnel hasta un tributario del Embalse Toa Vaca. Un reconocimiento preliminar de campo aguas arriba del puente en la PR-157 indica que existen varios lugares potenciales donde pudiera construirse la toma por gravedad:

- a. **Alternativa en la Vecindad del Puente en la PR-157.** Este lugar es cerca de donde ubica la estación de flujos operada por el USGS (Figura 8). En este lugar donde ubicaría la entrada al Túnel Bauta la elevación del cauce en la vecindad del puente es de aproximadamente 270 metros sobre el nivel del mar (snm).

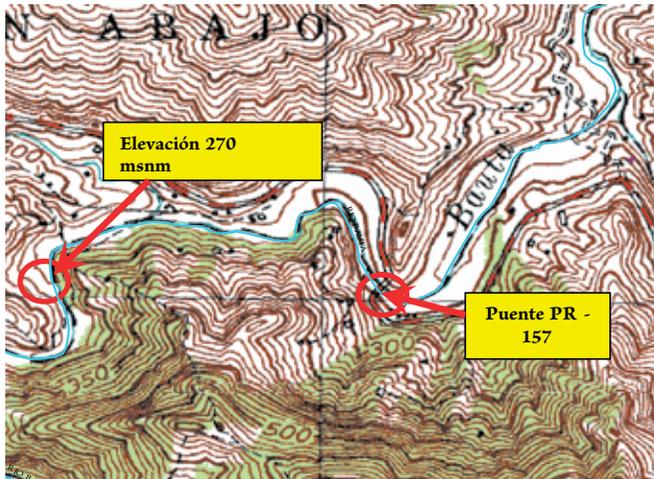


Figura 8. Lugar y elevaciones en el cauce del Río Bauta en la vecindad del puente en la Carretera PR-157.

La viabilidad de este lugar depende del punto en la cuenca del Río Toa Vaca donde el agua pudiera descargarse por gravedad a través del Túnel Bauta. Un análisis con los mapas topográficos disponibles de la zona del Río Toa Vaca identificó el sector en el cauce del Río Toa Vaca aguas arriba del Embalse Toa Vaca donde pudiera descargar el túnel. Es necesario mantener un gradiente hidráulico entre el punto de entrada potencial identificado en la Figura 7 (270 metros snm) y el punto de salida del agua. Este lugar se identifica en la Figura 8, donde el nivel del cauce es de aproximadamente 200 metros snm, proveyendo un gradiente potencial de aproximadamente 70 metros entre ambos puntos. Sin embargo, como se ilustra en la Figura 9, la distancia entre ambos puntos (longitud del túnel) es aproximadamente 7.2 millas. Este factor se evalúa más adelante al considerar la viabilidad económica del túnel.

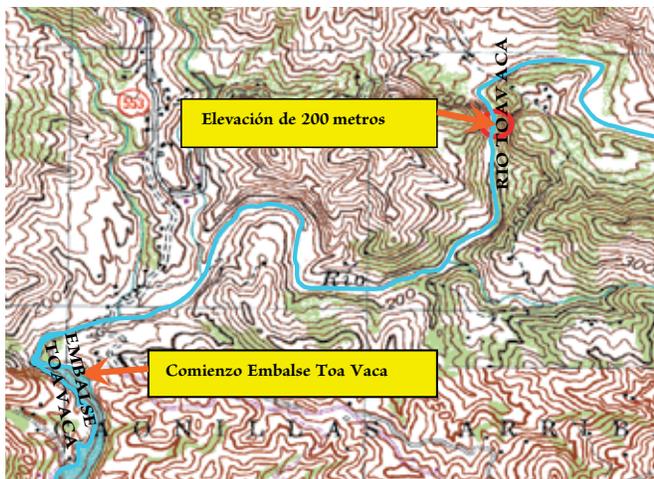


Figura 9. Elevaciones en el cauce del Río Toa Vaca aguas arriba del Embalse Toa Vaca.

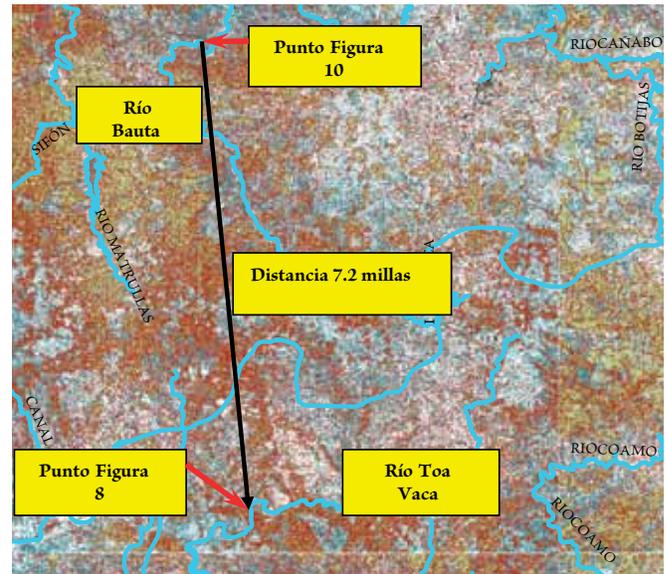


Figura 10. Distancia entre los puntos en los ríos Bauta y Toa Vaca ilustrados en las Figuras 7 y 8.

**a. Alternativa Aguas Arriba del Puente de la PR-157.**

La segunda alternativa evaluada para el Túnel Bauta considera una toma aguas arriba del puente sobre el Río Bauta en la PR-157. El factor primordial al identificar este lugar fue reducir la distancia entre la posible entrada del túnel en el Río Bauta y su salida en el Río Toa Vaca o uno de sus tributarios, pero manteniendo un gradiente mínimo que permita la entrada por gravedad del agua en el Río Bauta y el flujo del agua por gravedad hasta la salida del túnel. Se utilizaron los datos de elevación de los mapas topográficos del USGS, los cuales requerirán validación en el campo utilizando altimetros calibrados. Esta alternativa representa un área de captación efectiva menor en el Río Bauta al compararla con la alternativa anterior en la vecindad del puente de la PR-157. Esto reduce la cantidad de escorrentía disponible en la posible toma en el Río Bauta en proporción a la reducción en área de captación entre ambos puntos.

El punto potencial de ubicación de la toma y entrada al túnel seleccionado para esta alternativa es cercano al recomendado en el estudio de Greg Morris Engineering (GEM, 2004) para la AFI. Este punto se ilustra en la Figura 10, representando una elevación de aproximadamente 370 metros snm. Esta elevación es 10 metros menor que la recomendada en el informe de GEM a la AFI, que fue de 380 msnm. Se escogió el punto de 370 msnm para mantener el área de captación al máximo posible. Una quebrada sin nombre de área de captación relativamente significativa fluye al Río Bauta entre los contornos de ambos puntos de elevación.

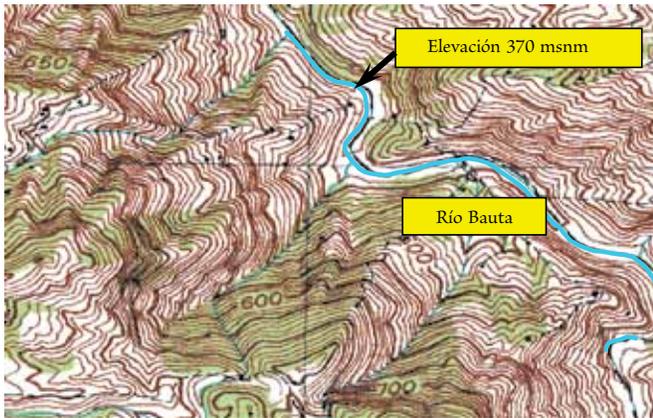


Figura 11. Elevación en el cauce del Río Bauta en el punto sugerido para la posible toma y entrada al Túnel Bauta aguas arriba de la PR-157.

El punto de salida del túnel en el Río Toa Vaca fue seleccionado para tratar de optimizar el gradiente máximo con la distancia menor. Este punto se ilustra en la Figura 11, representando una elevación de 300 metros snm.

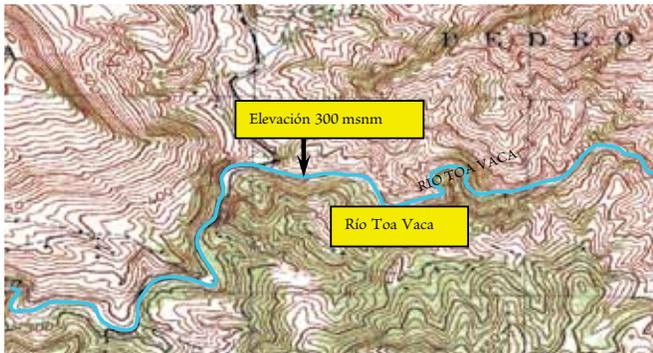


Figura 12. Elevación del cauce del Río Toa Vaca en la vecindad del punto sugerido para la salida del Túnel Bauta.

La distancia entre los dos puntos de entrada y salida del Túnel Bauta en esta alternativa es de 6.0 millas (Figura 12).

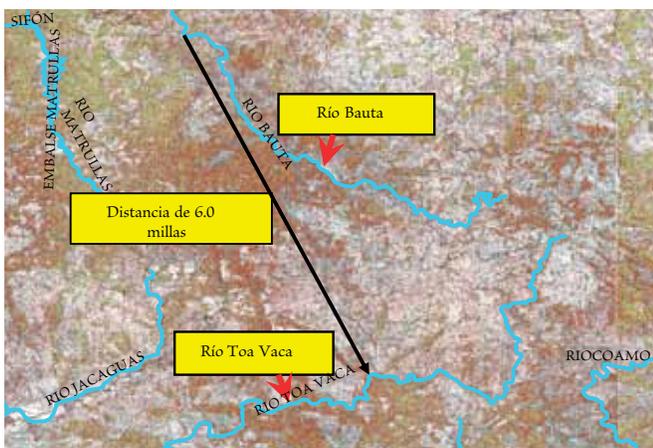


Figura 13. Distancia aproximada entre los puntos de entrada y salida de la alternativa ilustrada en las Figuras 11 y 12.

Como se indicó anteriormente, esta alternativa conlleva una reducción en el área de captación del Río Bauta en comparación con el punto donde ubica la estación 50034000 en el puente de la PR-157. El área de captación del Río Bauta en el nuevo punto es de aproximadamente 13.0 mi<sup>2</sup>. La escorrentía promedio anual en este punto se puede estimar por medio de una correlación matemática utilizando los datos de la estación 50034000 (denominado T1) y el área de captación del nuevo punto, ya que no existen datos de flujo en la vecindad del lugar (denominado de aquí en adelante como T2). Utilizando la fórmula racional siguiente, se estima el flujo promedio anual en el punto T2:

$$\text{Área T1} = 16.7 \text{ mi}^2$$

$$\text{Área T2} = 13.0 \text{ mi}^2$$

$$(\text{Área T2}) / (\text{Área T1}) = 13.0/16.7$$

$$\text{AT2}/\text{AT1} = 0.78$$

$$\text{Flujo Promedio Anual T1 (QT1)} = 28,000 \text{ acres-pies}$$

$$\text{Flujo Promedio Anual T2} = \text{QT1} * 0.78 = 21,840 \text{ acres-pies}$$

Es lógico y razonable asumir que el patrón de flujos en el punto T2 es similar al del punto T1, ya que son en la misma cuenca separados solamente por una diferencia en área de captación de 3.7 mi<sup>2</sup> en una zona de lluvias uniformes. La frecuencia de flujos en ambos puntos debe ser similar, por lo que como primer estimado podemos asumir que las extracciones de agua entre las frecuencias que exceden del 2% al 98% de los flujos se podrían extraer un promedio de hasta 15,600 acres-pies anuales, con las consabidas variaciones dependiendo del clima. Esta cantidad de agua sería equivalente a 13.9 mgd que fluirían al Embalse Toa Vaca. Esta estrategia también permitiría mantener el 100% del Q99 en el Río Bauta, cumpliendo con la política de flujos residuales adoptada por el DRNA.

### Viabilidad Técnica del Túnel Bauta

La tecnología moderna de perforación de túneles similares permitiría la construcción del Túnel Bauta en aproximadamente dos (2) años luego del inicio de la construcción. Durante la evaluación del proyecto se consultaron referencias y estudios múltiples de varias empresas con experiencia amplia en la construcción de túneles similares (B&V, CDM, TMB, España, Francia). Al presente se construyen en varios lugares en el mundo túneles similares, incluyendo en Seattle (estado de Washington), España, Francia, y China.

La técnica moderna para la construcción de túneles utiliza máquinas perforadoras semiautomáticas (TBM, *Tunnel Boring Machines*). Estas máquinas (similares a las utilizadas en los túneles del Tren Urbano en Río Piedras y de la Carretera PR-3 en Maunabo), pueden perforar hasta tres (3) pies por hora en rocas induradas similares a las que existen en la zona central de Puerto Rico. En la mayor parte de la Cordillera Central predominan "breccias" de origen volcánico y rocas graníticas induradas (USGS, 1957; USBR, 1970), por lo que la tasa de perforación indicada es razonable.

El informe de 1970 del USBR y consultas técnicas con las empresas anteriormente referidas establecen que el diámetro del Túnel Bauta sería de aproximadamente 12 pies. La geología subterránea de la ruta potencial del túnel (rocas de origen volcánico) sugiere que no será necesario revestir el mismo, lo que podría acelerar la construcción y reducir su costo. Sin embargo, hasta tanto no se lleven a cabo pruebas geotécnicas más específicas, no es posible validar esta conclusión preliminar. El diámetro de 12 pies representa una capacidad hidráulica de hasta 500 pcs (usando una pendiente de aproximadamente 0.0072 pies/pie y flujo por gravedad). Teóricamente sería factible perforar un túnel de menor diámetro. Sin embargo, las técnicas de construcción de un túnel de un largo potencial de hasta seis (6) millas requieren espacio adicional para actividades de construcción, incluyendo la remoción del material excavado utilizando rieles o "conveyors" durante la excavación. Esto requiere un espacio lateral que aumenta el diámetro de la perforación. Además, la perforación de túneles es reglamentada por las leyes federales de seguridad y salud, manejadas por la "Mining Health and Safety Administration" (MSHA). Estas reglas incluyen requisitos de ventilación en la excavación de túneles, requiriendo espacio en el túnel perforado. Finalmente, la perforación de un túnel en rocas consolidadas tiene el potencial de interceptar fracturas o fallas interconectadas que actúan como conductos de agua. Estas grietas pueden descargar al túnel miles de galones por minuto de agua, que necesita extraerse mientras se sella la fuente. El sellado de grietas productoras de agua se lleva a cabo utilizando revestimientos y "grouting." Mientras el agua fluye de la grieta ocupa espacio en el túnel, es necesario instalar tuberías temporeras para removerla. No existe oportunidad práctica de aprovechar esta agua para aumentar el caudal en el túnel, debido al potencial de erosión (a menos que pudiera construirse un acceso temporal externo mediante un micro-túnel lateral o vertical, lo cual hoy en día no se acostumbra por el costo adicional).

Datos de la empresa TBM establecen que las máquinas perforadoras pueden operar hasta 20 horas diarias, dedicando cuatro (4) horas diarias a mantenimiento y reparaciones. Teóricamente, un túnel de seis (6) millas de largo podría perforarse en aproximadamente 528 días de labor, asumiendo que estas tasas son viables en las rocas volcánicas de la zona del proyecto. La utilización de dos máquinas perforando en direcciones opuestas, a una razón promedio de 120 pies por día (combinado), permitiría perforar una milla de túnel en aproximadamente 44 días. Un túnel de seis (6) millas pudiera perforarse en un poco menos de un año. Sin embargo, la utilización de dos máquinas incrementa el costo de perforación significativamente, al requerirse dos brigadas de mineros y doble equipo de remoción de material y seguridad. Por otro lado, se facilita y acelera la extracción del material excavado y se proveen medidas de seguridad adicionales a los mineros. La decisión de utilizar una o dos máquinas perforadoras depende de los fondos disponibles y la urgencia de completar el túnel, y asume que no ocurrirán eventos catastróficos.

## Viabilidad Ambiental del Túnel Bauta

No existen barreras ambientales significativas que pudieran impedir o dilatar el desarrollo del Túnel Bauta. El proyecto requeriría la preparación de por lo menos una Evaluación Ambiental (EA) "robusta", a menos que la JCA determine que es necesaria una Declaración de Impacto Ambiental (DIA). Posiblemente se requiera una Consulta de Ubicación, ya que será necesario rezonificar los terrenos para la toma en el Río Bauta así como para los predios de acumulación de escombros y posibles estaciones de bombeo permanentes. Los impactos ambientales más significativos del proyecto serían los siguientes:

- a. **Impacto sobre el Río Bauta.** El uso de parte de la escorrentía del Río Bauta reduciría parcialmente los flujos intermedios en su cauce. Los flujos mínimos se mantendrían, ya que no se utilizarían flujos menores de 4 pcs, valor que excede el Q99 para el río en los dos puntos de extracción analizados, cuyo valor menor (lugar T2) no excede 2.6 pcs (0.78 del Q99 del lugar T1). La extracción de agua potencial sería menos del seis (6) por ciento de la escorrentía que genera la cuenca del Río Grande de Manatí, del cual es tributario el Río Bauta, y que ahora descarga al mar.
- b. **Estructuras de toma.** Construcción de estructuras para la toma de agua y salida, que pudieran impactar segmentos menores del Río Bauta y el Río Toa Vaca, así como terrenos adyacentes. Esto podría requerir hasta dos cuerdas en cada lugar.
- c. **Terrenos aledaños a entrada y salida del túnel.** Áreas para la gerencia del proyecto, incluyendo el almacenaje de equipo y maquinarias durante la construcción, que pudieran ser dos años. Estas áreas requerirán la remoción de parte de la corteza terrestre, por lo que será necesario evaluar su flora, fauna y arqueología. Se podrían requerir hasta cinco (5) cuerdas en cada extremo del túnel.
- d. **Materiales extraídos la perforar el túnel.** Generación y disposición de aproximadamente 17,000 metros cúbicos de roca y residuos por cada milla de la perforación del túnel de 12 pies de diámetro. Un túnel de seis (6) millas de largo generaría aproximadamente 101,500 metros cúbicos de material. Es probable que la mayor parte de este material, debido a su naturaleza de origen volcánico e indurado, pudiera utilizarse en la industria de la construcción, o para producir agregados intermedios. En la eventualidad de que el material no pudiera utilizarse como indicado, sería necesario identificar y adquirir predios cercanos a los extremos del túnel para disponer del material. Esto conllevaría el compromiso de hasta 25 cuerdas de terrenos que

podrían utilizarse en el futuro para otras actividades, tales como preservación en bosques, cultivos agrícolas, parques industriales, o desarrollos urbanos.

- e. **Tránsito local.** Efectos en el tránsito local de los camiones que transportarían el material extraído del túnel al lugar de reuso o disposición. El estimado diario de carga sería de aproximadamente 192 metros cúbicos ( $m^3$ , en base a una perforación promedio de tres (3) pies por hora en un túnel de 12 pies de diámetro y 20 horas diarias de labor), lo que requeriría hasta siete (7) viajes de camiones de  $30 m^3$  de capacidad.
- f. **Calidad de Aire.** Habrá emisiones atmosféricas emitidas por las máquinas excavadoras y otro equipo necesario para la perforación del túnel. Este efecto sería únicamente durante la construcción del túnel.

### Viabilidad Económica del Proyecto

El costo potencial de la perforación del Túnel Bauta es uno de los factores más importantes en su viabilidad. El costo del túnel en esta etapa es una aproximación, ya que no se cuenta con parte de la información esencial para refinar los estimados. El costo final del túnel dependerá de los siguientes factores:

- a. **Largo del túnel.** El largo del túnel reduce el costo unitario, el cual se estima en costo por pie de excavación. Esto se debe a las economías de escala. En el caso del Túnel Bauta, el largo de la ruta bajo que preliminarmente aparenta ser la más corta pero viable es de aproximadamente seis (6) millas. Esta longitud necesita validarse con un estudio final de viabilidad del proyecto.
- b. **Diámetro del túnel.** Como se indicara antes, se requerirá un túnel de 12 pies de diámetro para proveer la capacidad necesaria que permita transmitir hasta 15,000 acres-pies al año. Este factor también varía con la pendiente del túnel, lo cual necesita optimizarse.
- c. **Tiempo de perforación.** La urgencia con la que se requiera construir un túnel dicta si se utilizan una o más máquinas perforadoras simultáneamente. En el caso del Túnel Bauta, una sola máquina podría perforar el túnel en menos de dos años. Desde el punto de vista de logística de remoción de material y acceso para efectos de seguridad, sería más lógico el utilizar dos máquinas que perforen en direcciones opuestas hasta encontrarse. Al utilizar dos máquinas es necesario duplicar la mayor parte de la infraestructura y costos diarios (personal; áreas de operaciones; sistemas de rieles para extraer el material minado; áreas para

almacenar o disponer del material minado; sistemas para ventilación; sistemas para remover agua si necesario).

- d. **Geología y geotecnia del subsuelo a perforarse.** La geología subterránea afecta significativamente el tiempo que tomará perforar un túnel. Tomará más tiempo perforar en rocas induradas (como las breccias volcánicas que aparentan predominar en la zona de Orocovis a Villalba) que en rocas calizas. En zonas de rocas calizas como en la Región Norte de la Isla, la velocidad de perforación puede duplicarse, minimizando el tiempo y los costos de perforación. Como se indicara anteriormente, en rocas similares a las del tramo propuesto para el Túnel Bauta, se estima que pudieran perforarse hasta tres (3) pies por hora (con una máquina perforadora). Pero este estimado también puede ser afectado si la ruta intercepta fallas y fracturas frecuentes que requirieran sellarse, lo cual reduce la tasa de avance de las máquinas perforadoras. Será necesario completar varias perforaciones pilotos ("borings") a lo largo de la ruta del túnel para validar el tipo y dureza de las rocas. La presencia de fallas y fracturas no puede determinarse con precisión, y es posible que se encuentren fracturas a medida que el túnel progresa.

Se han desarrollado guías generales para estimar el costo de perforación de túneles como el de Bauta. Esas guías se basan en datos empíricos de experiencias de campo, ya que el costo actual de cada túnel es afectado por la interacción de las variables antes mencionadas. Hanson Engineering (Hanson Engineering, 2003) derivó una relación gráfica aproximada para estimar el costo de túneles perforados en rocas tales como "claystone", "sandstone", "shale" y dolomitas (Figura 14). La relación se derivó de datos de 23 túneles que variaron en longitud desde una (1) a ocho (8) millas. Los costos individuales variaron desde \$650 a \$4,000 por pie perforado.

Consultores especializados en túneles indicaron que para las condiciones de longitud y geología en la ruta que se utilizaría para el Túnel Bauta, el costo máximo pudiera ser de hasta \$4,000 por pie lineal. Este valor asume que será necesario reforzar el túnel con un revestimiento interior, lo cual posiblemente no se requiera en la mayor parte de la ruta debido al tipo de rocas en la zona. El valor de \$3,000 por pie lineal fue sugerido como uno más razonable. Asumiendo este valor y un largo máximo de seis (6) millas (31,680 pies), el costo estimado del Túnel Bauta sería de \$95.0 millones. Este costo no incluye la toma en el Río Bauta ni los costos de ingeniería ambiental y administración del proyecto. Podemos asumir un costo de un 20 % adicional para estos elementos del proyecto (\$19 millones), para un costo total de \$114 millones. Nuevamente, estos estimados necesitan validarse luego de un estudio sistemático de viabilidad que incluya datos de campo recientes.

## Conclusiones

El análisis preliminar de la viabilidad del Túnel Bauta permite concluir con certeza lo siguiente:

- La construcción del Túnel Bauta es viable desde el punto de vista de recursos de agua y aumentos en el rendimiento seguro del Embalse Toa Vaca. El Río Bauta cuenta con recursos de agua adecuados para suplir anualmente un promedio de hasta 15,600 acres-pies anuales al Embalse Toa Vaca mediante el Túnel Bauta. Este volumen de agua aumentaría el rendimiento seguro del Embalse Toa Vaca en aproximadamente 13.9 mgd, garantizando abastos confiables a la Región Sur hasta el año 2050.
- No existen barreras técnicas ni ambientales para construir el Túnel Bauta. La tecnología disponible permitiría perforar el túnel relativamente rápido (en menos de dos años) con impactos ambientales mínimos. El costo preliminar del proyecto se estima en \$114 millones, en base a una longitud de aproximadamente seis (6) millas y un diámetro de 12 pies, con tomas y salidas por gravedad, y un costo aproximado de \$3,000 por pie lineal de perforación. Este costo podría aumentar dependiendo de la geología subterránea de la ruta que se escoja para el túnel. La longitud final necesita validarse con datos de campo de las elevaciones óptimas para obtener el gradiente necesario para el flujo por gravedad. La instalación de un revestimiento en el túnel y la presencia de aguas subterráneas podrían dilatar el tiempo de construcción y aumentar su costo. Los impactos ambientales del Túnel Bauta serían mínimos.

## Referencias

- Greg Morris Engineering, 2004, Schematic Design Analysis, Toa Vaca Reservoir: Autoridad Para el Financiamiento de la Infraestructura, San Juan, PR, 12 p.
- Hanson Engineering Consultants, 2003, Tunnel Costs Estimates Probability Distribution: Springfield, Illinois, 7 Power Point frames.
- United States Bureau of Reclamation, 1970, USBR Feasibility Design Report Bauta-Toa Vaca Tunnel: Puerto Rico Water Resources Authority Technical Paper, Denver, Colorado, 39 p. + folded map.
- United States Geological Survey, 2007, Water Resource Data Reports for Puerto Rico, 1957-2007: USGS Water Data Reports, San Juan, Puerto Rico.
- United States Geological Survey, 1957, Geologic Quadrangle of the Orocovis Area, Puerto Rico: USGS Geologic Quadrangle, San Juan, Puerto Rico, 1 plate.
- Wagner, H., 2007, The Governance of Cost in Tunnel Design and Construction: First Brazilian Congress of Tunnels and Subterranean Structures, Sao Paulo, Brazil, 6 p.

## Notas Biográficas

El Ing. Ferdinand Quiñones es consultor ambiental. Graduado de Ingeniería Química del RUM en 1965, posee una Maestría en Ingeniería Ambiental de la Universidad de Florida y cursó dos años de estudios doctorales en hidrología e ingeniería ambiental en la Universidad de Vanderbilt, Tennessee. Laboró como hidrólogo en el USGS durante 28 años, dirigiendo las oficinas de dicha agencia federal en Puerto Rico y en Tennessee, donde reside al presente. Tiene a su haber cerca de 80 publicaciones sobre asuntos hidrológicos. Dirigió la preparación del primer borrador del Plan Integral de Aguas de Puerto Rico y el Inventario de Recursos de Agua de Puerto Rico.

El Ing. Alberto Lázaro es Director Ejecutivo de Infraestructura para la AAA. Graduado de Ingeniería Civil del RUM, posee una Maestría en Ingeniería Ambiental de MIT. Laboró anteriormente con la firma Malcom Pyrie en Puerto Rico y como Subsecretario del Departamento de Recursos Naturales.

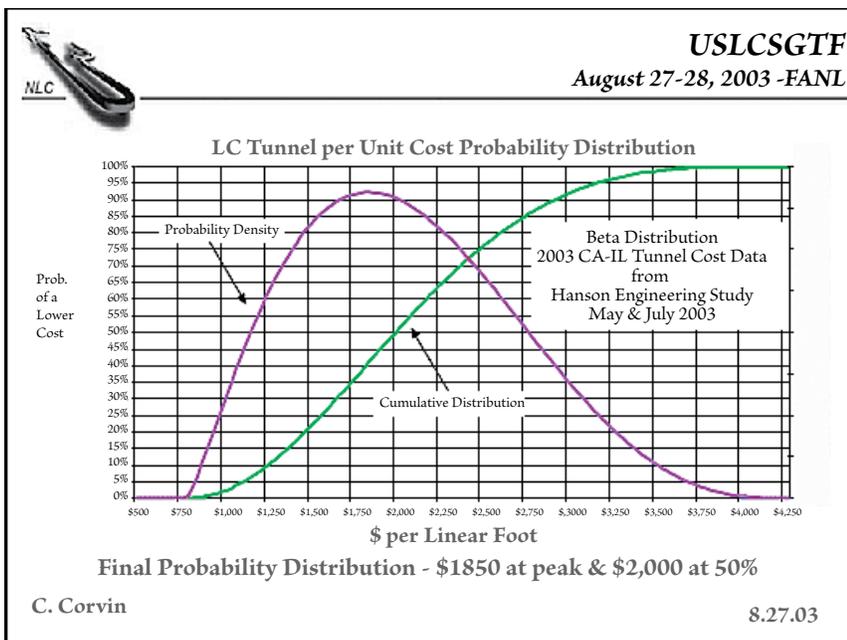


Figura 14. Relación de costos promedios para perforar túneles en rocas variadas (Henson, 2004).