



# Proyecto de adecuación de la Presa de Beniarrés, Valencia

Rafael López Manzano  
Director de la División de Obras Hidráulicas y Gestión del Agua

Ensayo, en modelo físico reducido y modelo numérico, del aliviadero de la Presa de Beniarrés.



Actualmente TYPESA se encuentra inmersa en la redacción del Proyecto de Adecuación de la Presa de Beniarrés (Valencia). La presa entró en servicio en 1958 y fue recrecida en 1970.

Si bien ha cumplido su funcionalidad durante más de 64 años, la presa requiere un *lifting* que la ponga a tono con los criterios de seguridad actuales y que afectan tanto a la estabilidad de la propia presa, como a su seguridad hidrológica. En particular, el aliviadero de la presa se diseñó para una capacidad de 1.000 m<sup>3</sup>/s, muy inferior a la necesaria con criterios actuales, como veremos a continuación.

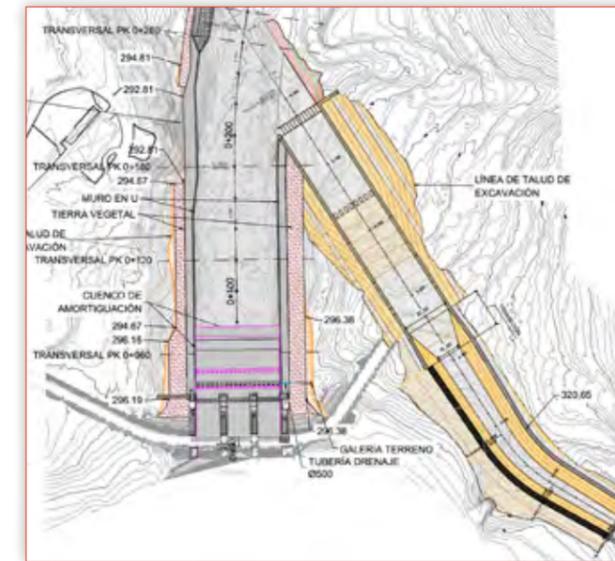
Es un proyecto muy singular, tanto por ser presa como por ser una adecuación, donde se diseña un aliviadero complementario y de emergencia

## EL ALVIADERO PROYECTADO

Tras la revisión de los cálculos hidrológicos, el caudal punta de la avenida de diseño de 1.000 años de período de retorno es de 2.139 m<sup>3</sup>/s y el de la avenida extrema de 5.000 años alcanza los 3.350 m<sup>3</sup>/s. Los sistemas hidráulicos deben funcionar perfectamente para el primero y tan solo evitar el rebasamiento de la presa y/o daños severos en la misma para el segundo.

Si bien la presa es de hormigón y el aliviadero actual, con una longitud de 45 m y dotado de compuertas, se sitúa sobre el propio cuerpo de presa, la altura de lámina vertiente viene limitada por la afección a los terrenos situados aguas arriba y, de forma más drástica, por la capacidad resistente de la presa. Así que, como a grandes males hay que enfrentar grandes remedios, el equipo de proyecto, tras un exhaustivo análisis de soluciones, ha concluido en la necesidad de disponer de un aliviadero de emergencia. Se trata de un aliviadero encajado en la margen derecha, con 155 m de longitud de vertedero de tipo lateral, cuya embocadura se sitúa por encima del umbral del aliviadero principal, de manera que sólo actuará en caso de grandes avenidas.

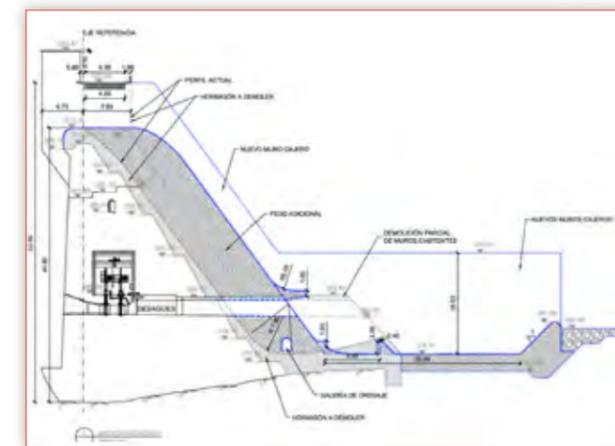
En esta tipología de aliviadero, el flujo, tras superar el labio vertiente, cae en una cubeta que provoca el giro del mismo 90°, orientándolo en el sentido del eje del aliviadero. Si bien es una tipología muy usada en presas de materiales sueltos, su empleo es singular en el caso de una presa de hormigón.



En la figura podemos apreciar la planta del conjunto de presa actual, nuevo aliviadero y cauce aguas abajo. Resulta llamativo que la entidad del nuevo aliviadero supera no solo la del aliviadero actual, sino a la de la propia presa. Aplíquese aquello de "era una presa a un aliviadero pegada"... que hubiera dicho nuestro sin par Quevedo.

Con este esquema, los caudales desaguados por cada aliviadero, una vez laminados en el embalse son:

Avenida de proyecto:	Principal: 1.436 m <sup>3</sup> /s	Lateral: 560 m <sup>3</sup> /s
Avenida extrema:	Principal: 1.612 m <sup>3</sup> /s	Lateral: 1.565 m <sup>3</sup> /s



También ha sido necesario rediseñar el aliviadero principal, adoptando tanto su labio vertiente como el cuenco de amortiguación a los nuevos caudales. En la figura vemos el nuevo perfil, compa-

rado con el existente. Observamos igualmente que el perfil de la presa ha sido reforzado con objeto de garantizar la estabilidad de la presa.

## LA TEORÍA DE LA SEMEJANZA HIDRÁULICA

Una de las peculiaridades de los aliviaderos de presas es que, aún cuando su diseño suela responder a modelos perfectamente contrastados, la importancia de un comportamiento impecable recomienda ensayarlos en modelo reducido. Así, los prototipos son asimilados a modelos, según los criterios que contamos a continuación.

Esta técnica es clásica y se viene empleando desde hace más de un siglo. Obedece a la Teoría de la Semejanza Hidráulica y que es empleada en muchas tecnologías: túneles de viento para pruebas de coche, alas de avión, cascos de barco y, como no, aliviaderos y desagües de presas.

La teoría de la semejanza, que es bastante prolija, nos permite afirmar que, permaneciendo invariable la gravedad y la densidad del agua, no existe la semejanza perfecta. Es por ello que se han llegado a realizar ensayos (obviamente no de presas) en naves aeroespaciales, donde la gravedad es inferior.

Los ingenieros hidráulicos, más modestos, hemos desarrollado algún "atajillo" para afrontar la escasez de nuestro programa espacial. Así, si podemos asegurar que determinadas fuerzas (en nuestro caso las relativas a viscosidad y tensión superficial) son despreciables, podemos asegurar un resultado suficientemente preciso. Eso es lo que nos enseña la denominada semejanza de Froude, que no es más que una simplificación al problema. Otras semejanzas son empleadas en otras tecnologías. En nuestro caso, ello suele exigir que la escala del modelo no sea excesivamente pequeña, lo que acaba conduciendo a modelos enormes.

Una vez fijada la escala geométrica, la semejanza de Froude nos permite conocer la semejanza de todo el resto de magnitudes: tiempo, velocidades, rugosidad, caudales, etc.

Así, estas magnitudes serán medidas en el modelo y, tras traducirlas a la escala del pr

## LAS FASES DE UN ENSAYO EN MODELO REDUCIDO

Un ensayo en modelo reducido es costoso y exige una esmerada preparación.

En primer lugar, determinamos la escala del modelo y hacemos un proyecto de modelo. Ello incluye una estructura de recirculación de agua (aportación y recogida); un sistema de bombeo; un depósito de almacenamiento; estructuras "tranquilizadoras" del flujo afluente, que garanticen que el modelo se comportará de forma similar al prototipo y, por último, lo que es propiamente el modelo.

El modelo se puede construir de muchos materiales. El clásicamente empleado es el mortero de cemento revestido de yeso y pintura. Actualmente utilizamos metal, madera, cristal e incluso impresora 3D.

A la par que se construye el modelo, se instala la instrumentación que monitorizará el mismo. Empleamos sondas de nivel y escalas graduadas para medir calados, molinetes y otros dispositivos para medir velocidades, caudalímetros para caudales y sensores de presión rápidamente variable para analizar subpresiones. Otras técnicas de ensayo incluyen el uso de trazadores cuya trayectoria es captada por ráfagas de fotografías de alta velocidad.

Una vez construido, procedemos a la entrada en carga del modelo. Suele ser un día complicado donde descubres todo lo que falla ... y alguna que otra gotera.

Tras subsanar las deficiencias que haya, entramos en la fase realmente interesante, que es la de explotación del modelo, de acuerdo a un plan de ensayos previamente diseñado.

Durante esta fase se introducen siempre mejoras al diseño, idealmente de poca entidad, si el diseño fue acertado, que son las que justifican el trabajo realizado.

Se comprueba la capacidad del aliviadero, su curva de gasto, la suficiencia de los cajeros, que la lámina de agua y las velocidades se ajusten a las calculadas, que no se produzcan despegues del flujo, vórtices u otros efectos hidráulicos indeseables. Se evalúan las eventuales subpresiones bajo los cuencos de amortiguación, los arrastres aguas abajo de la presa y un largo etcétera. Cuando todo ello es superado, hemos validado y optimizado el diseño.

Finalmente nos queda la redacción del informe, complementado con una exhaustiva documentación gráfica.

#### EL MODELO REDUCIDO DE LA PRESA

Nuestro modelo se ha construido a escala 1/45 en las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica de AIN ACTIVE, colaborador habitual de TYPESA en este tipo de ensayos. Ocupa un total de 17x8 m<sup>2</sup>. Se ha construido en un mes y ha sido ensayado durante otros meses. Actualmente se está finalizando el informe final.

Vemos a continuación una serie de fotografías que ilustran el comportamiento de los dos aliviaderos, que ha resultado plenamente satisfactorio. Siendo el objetivo de estas líneas puramente divulgativo, nos limitaremos a dar unos comentarios meramente cualitativos.



Modelo en vacío visto desde aguas arriba. A la izquierda la presa principal y a la derecha el aliviadero de embocadura lateral.

En todas las fotos que siguen, el caudal de ensayo corresponde con el de la avenida extrema.



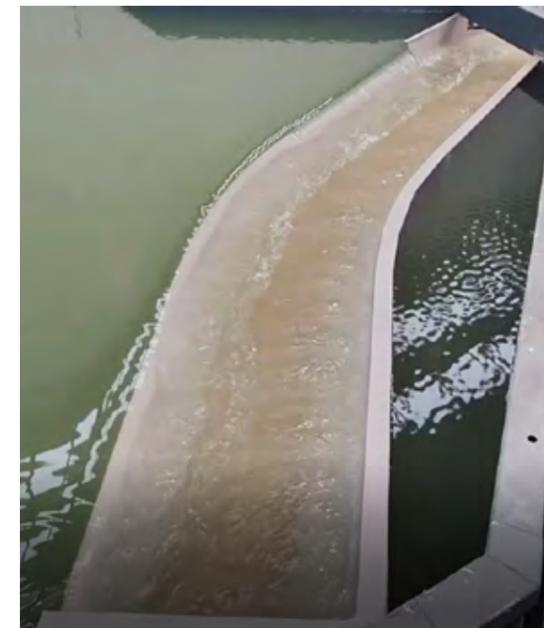
Vista de detalle del aliviadero principal y de la macro-turbulencia generada en el resalto hidráulico. Se puede apreciar el vórtice creado al pie de la presa, con un flujo en forma de rodillo que gira en sentido horario.



Detalle de simulación de fallo de compuerta en vano central del aliviadero principal. La seguridad de la presa queda garantizada.



Presa y aliviadero principal visto desde aguas abajo. El resalto hidráulico se encuentra perfectamente confinado. Se detecta un cierto despegue aguas abajo de las pilas centrales, que ha conducido a mejorar la hidrodinámica de las mismas. La tabla superior de madera es un artificio para comprobar que no existe constricción al flujo provocada por las pilas levantadas.



Aliviadero lateral: vista del vertedero y la cubeta. Se observa que ésta está prácticamente anegada, empezando a limitar la capacidad del flujo. Esto demuestra lo acertado del diseño. Si la cubeta estuviera más vacía estaría sobredimensionada. Si estuviera más llena, la capacidad de desagüe disminuiría y provocaría el vertido sobre la coronación de la presa.

Vista desde aguas abajo del funcionamiento conjunto de ambos modelos. Se observa cómo el flujo alcanza el cauce en condiciones compatibles con la estabilidad del mismo, evitándose erosiones regresivas.



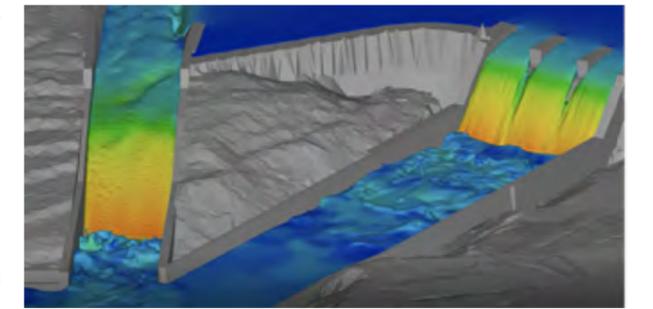
#### EL MODELO NUMÉRICO

Si bien el ingeniero que esto suscribe es claramente análogo, no es ajeno a la inmersión digital que vivimos, por lo que todos nuestros modelos físicos vienen acompañados por su correspondiente modelo numérico. En este caso se ha empleado el software FLOW-3D.

En este caso, el movimiento del fluido se fundamenta en sistemas de ecuaciones diferenciales de segundo orden, no lineales y transitorias, correspondientes a la ecuación de continuidad y a la del momento de Navier-Stokes. El flujo calculado contiene las 3 componentes espaciales.

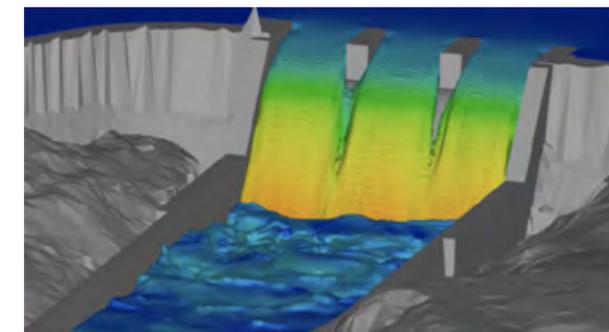
Hemos sido testigos de cómo en cinco años los modelos numéricos han pasado de requerir más tiempo que los físicos a mucho menos. Además, inicialmente el modelo físico servía para calibrar el numérico. Hoy en día, ambos empiezan a tener una solvencia similar.

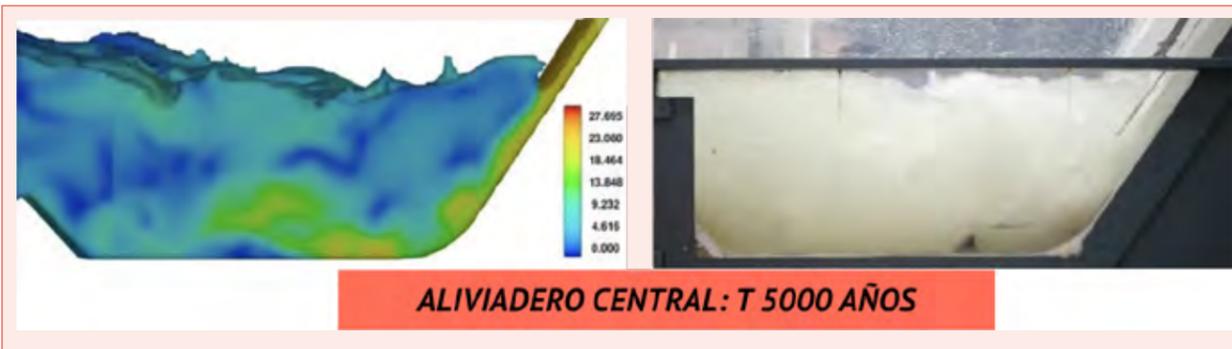
Como una imagen vale más que mil palabras, vemos a continuación una serie de vistas comparadas de ambos modelos y sus resultados, que son muy similares.



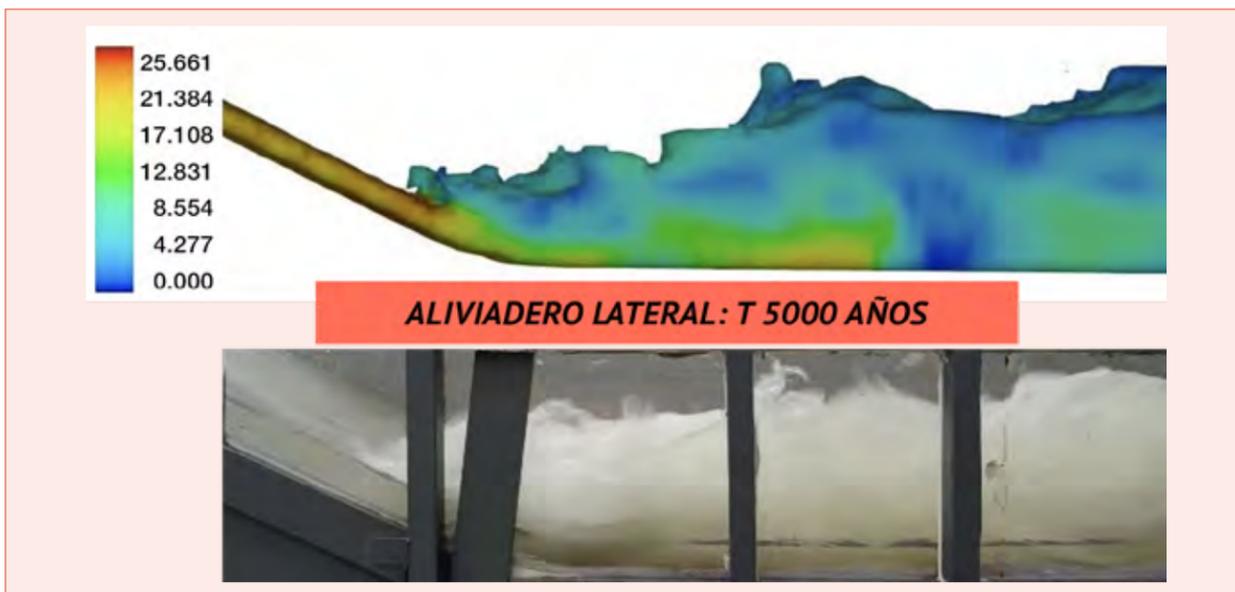
Vista desde aguas debajo de ambos modelos y ambos aliviaderos

Vista desde aguas debajo de ambos modelos y ambos aliviaderos





Vista comparada del resalto en el cuenco principal. El código de colores del modelo numérico representa el campo de velocidades. También en el modelo numérico podemos observar la corriente de fondo en el cuenco y su carácter rotacional al comienzo del mismo, forzado por los dientes deflectores de la solera.



Vista comparada del resalto en el cuenco del aliviadero lateral

**CONCLUSIONES**

El estado del arte nos permite comprobar y optimizar el diseño de las estructuras hidráulicas de presas a través de modelos físicos y numéricos. Si bien su realización entraña un esfuerzo, tiempo y coste no desdeñable, la importancia y criticidad de los elementos modelizados los hace preceptivos.

Además, a juicio del que esto suscribe, la modelización física es la mejor escuela del ingeniero hidráulico y, afortunadamente, la

única manera de visualizar el funcionamiento de diseños que sólo funcionarán en tales condiciones extremas cada muchos años. O siglos.

**BONUS TRACK**

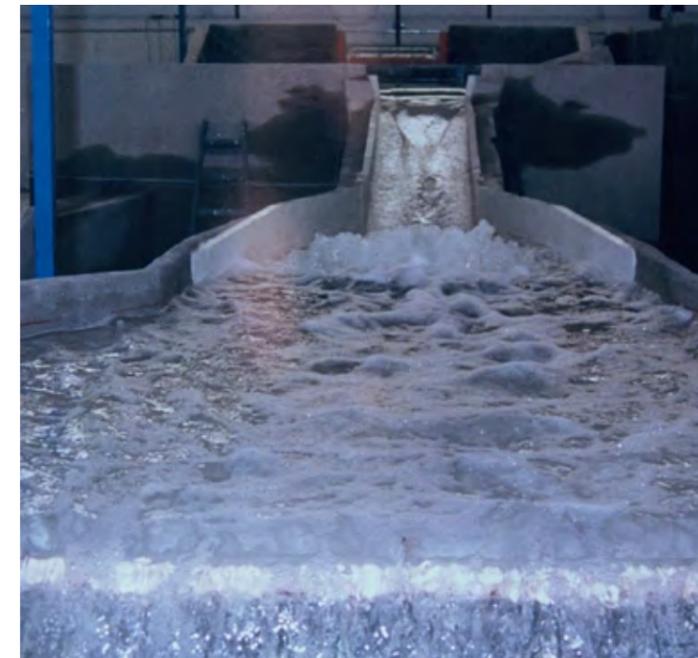
Como regalo para los aficionados, os deleito con alguna foto de otros modelos de presas. Alguno de ellos realizados por TYPESA, otros durante mi vida profesional en FCC.



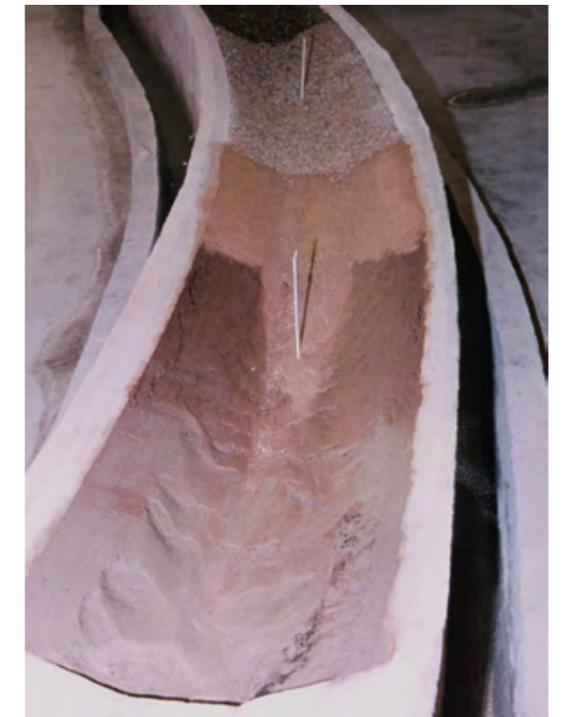
Presa de Carrizal: ensayo de aliviadero en trampolín y desvío del río. La altura de presa es de 160 m y el caudal aliviado de 6.000 m³/s.



Presa de Casupá. Aliviadero escalonado en presa de hormigón compactado con rodillo y cuenco de amortiguación



Presa del Bayco: a la izquierda el ensayo del aliviadero. A la derecha ensayo de diferentes revestimientos del cauce a la salida de desagües de fondo.



Presa de Moratalla: canal de descarga con cajeros convergentes. Muy apropiado para cauces estrechos con caudales punta elevados.

Presa bóveda de Alqueva. Trampolín con cajeros convergentes y solera de radio y ángulo de lanzamiento variable para evitar el impacto en la central hidroeléctrica.



Presa de la Risca: disipación de energía en dos etapas, con dos cuencos en serie. Diseño forzado por la presencia de una oquedad en el extremo aguas abajo del cuenco.



Este es el futuro claro de las presas: adecuarlas al contexto de seguridad actual

Presa de Mora de Rubielos: vista desde aguas abajo del aliviadero con embocadura lateral y trampolín de lanzamiento.



**AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a nuestros amigos de AIN ACTIVE el gran trabajo realizado y el espíritu colaborativo del mismo.

Igualmente, mi agradecimiento más sincero a todo el equipo de TYPESA, que con su profesionalidad y entrega está consiguiendo un extraordinario proyecto del que la sociedad se beneficiará, espere- mos, al menos otros 70 años más. ■

Presa del Romeral: soluciones especiales para aliviaderos especiales. Embocadura en laberinto, ovoide y cardiode. Salvo la primera, son soluciones "ad hoc" nunca antes ensayadas ni estudiadas. Tratan de maximizar la longitud de vertido, para conseguir que un flujo de 4.000 m3/s pasar a través de un collado de 70 m con una lámina vertiente muy reducida.



# Transformación digital del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados

José Delgado Cáceres / Jefe de Proyecto. Consorcio Aguas de Escazú, Costa Rica

Como ya se ha informado en boletines anteriores, TYPESA está liderando un contrato que tiene como objetivo principal el diseño de una estrategia de reducción del agua no contabilizada en la red de distribución del país centroamericano, implantando un modelo de gestión inteligente y eficaz, y desarrollando un Plan de Acción que incluye proyectos y obras por valor de unos 160 mills. de USD, a desarrollar en un período de 5 años.

El Proyecto, denominado RANC-EE, tiene como cliente al Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) y cuenta con la financiación del Banco Centroamericano de Integración Económica (BCIE) con el apoyo de la cooperación alemana, a través de su banco de desarrollo, KfW. Se está desarrollando mediante el llamado Consorcio Aguas de Escazú, liderado por TYPESA, en el que participa también la empresa alemana GOPA-Infra y que tiene su sede en la ciudad de San José de Costa Rica.

El AyA suministra agua potable y de muy buena calidad a más de 700.000 clientes, algo más de 2,2 mills. de habitantes. En 2021, produjo y distribuyó 260 mills. de m<sup>3</sup> de agua tratada, de los que solo facturó 111,7 m<sup>3</sup>, es decir, el 43% de lo producido y distribuido.

Los 148,3 mills. de m<sup>3</sup> restantes corresponden a Agua No Contabilizada (ANC), agua que se perdió por el camino y no llegó hasta el usuario o bien llegó, pero no hubo forma de medirla y facturarla. Esta situación se deriva, fundamentalmente, del mal estado de las conducciones y de la obsolescencia del parque de medidores, que día a día va empeorando.

Reducir el agua no contabilizada reviste gran importancia para el AyA, por lo que, en agosto de 2019, se puso en marcha un ambicioso proyecto para conseguir revertir esta insostenible dinámica, encargando la consultoría especializada al Consorcio Aguas de Escazú, liderado por TYPESA.

El objetivo del Proyecto es promover y generar los cambios necesarios en la institución para lograr la eficiencia en la gestión y en la prestación del servicio, haciéndolo de manera sostenible en el tiempo. El cambio se construirá sobre la base de la digitalización, la capacitación y la optimización de los procedimientos.



Esquema hidráulico en tapa de arqueta | Curva de gastos de caudal producido



Evolución del índice de Agua No Contabilizada (ANC) en el acueducto

Actualmente, AyA es una institución con sistemas informáticos obsoletos. Entre los hallazgos más relevantes del diagnóstico realizado por el Consorcio, destaca la ausencia de digitalización en la institución. No existe un GIS corporativo, no se cuenta con un catastro de infraestructuras digitalizado, la base de datos de clientes no está georreferenciada –sólo se cuenta con direcciones descritas a la manera "tica": la casa verde, 200 m al este y 100 m al sur del palo de mango–, no existen herramientas de control de la producción, no se cuenta con herramientas adecuadas para gestionar el sistema comercial, fundamentalmente la medición y facturación, etc.