

# Avances en la gestión sostenible del agua subterránea El Salvador

## Red de monitoreo: Subcuenca del Acelhuate

Mata, R. ORCID: 0009-0009-5847-0156; Gil, L. ORCID: 0009-0008-8661-9862

*Gerencia de Hidrología, Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, San Salvador, El Salvador.*

[rmata@ambiente.gob.sv](mailto:rmata@ambiente.gob.sv), [lgil@ambiente.gob.sv](mailto:lgil@ambiente.gob.sv)

**Resumen** – El monitoreo continuo del agua subterránea en la subcuenca del Río Acelhuate es crucial para comprender la dinámica y evolución de los recursos hídricos disponibles en una región que históricamente ha experimentado una intensa actividad socioeconómica y una alta demanda de agua. Este artículo describe la experiencia en la implementación de la red de monitoreo de niveles de agua en pozos de observación para generar información clave que contribuya a una mejor comprensión del estado del recurso hídrico subterráneo. Desde su establecimiento en el año 2007, la red ha sido gestionada y fortalecida por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) con el apoyo de otras instituciones del estado y organismos de cooperación internacional, con el objetivo evaluar las tendencias a lo largo del tiempo que pongan en riesgo la disponibilidad del recurso y detectar la sobreexplotación del acuífero. A pesar de los desafíos enfrentados, como el vandalismo en los pozos y la discontinuidad de los datos por fallos en los equipos de medición, la red ha proporcionado información valiosa sobre niveles de agua, permitiendo identificar patrones estacionales, tendencias y efectos de eventos extremos. Los resultados obtenidos hasta la fecha están sentando una base para realizar análisis más profundos, incluyendo la posibilidad de modelados para el pronóstico de niveles futuros que contribuyan a la toma de decisiones informadas sobre la gestión del recurso hídrico en la subcuenca.

**Palabras clave:** – Subcuenca del Acelhuate, acuífero, agua subterránea, red de monitoreo

**Abstract** – Monitoring of groundwater in the Acelhuate River sub-basin is required to improve the understanding of its dynamics and evolution regarding water resource availability. This monitoring is especially important in regions that have historically experienced intense socio-economic activity and high-water resource demand. The article focuses on the experience of implementing a network that was established in 2007 for monitoring water levels with observation wells. The network was created to detect aquifer overexploitation and evaluate long-term trends that may be vulnerable to resource availability for priority uses. The network was also managed and strengthened by the Ministry of Environment and Natural Resources (MARN) with the support of other national institutions and international cooperation agencies. Despite the challenges faced, such as vandalism in wells and data discontinuity due to measurement equipment failures, the network has provided valuable information on water levels, allowing the identification of seasonal patterns, trends, and the effects of extreme events. The results obtained to date are laying the groundwork to perform deeper analyses, including the possibility to forecasting and modelling of future water levels.

**Keywords:** Acelhuate sub-basin, aquifer, groundwater, monitoring network.

### I. INTRODUCCIÓN

El monitoreo del agua subterránea de la subcuenca del Río Acelhuate es fundamental para realizar el análisis de la evolución de los recursos hídricos y generar información oportuna que apoye la gestión responsable de los recursos naturales del país.

Históricamente sobre esta subcuenca se ha desarrollado la mayor actividad socioeconómica del país. Además, dicha área se ha caracterizado por tener una alta densidad poblacional lo que ha generado una demanda creciente de agua para usos consuntivos que han llevado a los gestores del recurso hídrico a implementar soluciones enfocadas principalmente en la extracción del recurso natural. Solución propuesta debido a la carencia de planes de

regulación que aborden la disponibilidad del recurso hídrico a mediano y largo plazo.

Este hecho plantea un desafío de gran magnitud para la gestión sostenible del agua en la subcuenca ya que con la contaminación de las fuentes superficiales de agua el recurso subterráneo ha perdido su función reguladora y lo ha consolidado como la principal fuente de abastecimiento para la población.

Desde el año 2007, como una medida para garantizar la gestión sostenible del recurso hídrico y facilitar la toma de decisiones en la planificación de su uso, el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) a través del Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), ahora renombrado como Dirección General de Amenazas y Recursos Naturales (DOA), adquiere el compromiso de implementar, gestionar y fortalecer la red de monitoreo continuo de niveles en pozos de observación a nivel nacional. Este esfuerzo fue y ha sido posible gracias a la colaboración de organismos internacionales de cooperación, así como a iniciativas desarrolladas por la propia institución, enfocadas en detectar de manera temprana la sobreexplotación de los acuíferos, eventos hidrológicos extremos, como inundaciones o sequías, y la evaluación a mediano y largo plazo de tendencias y patrones en el comportamiento del recurso subterráneo.

Los datos registrados en la red han sido recopilados por el MARN y desde el año 2017, publicados en el Sistema de Información Hidrológica [http://srt.snet.gob.sv/sihi/public/app/1/pozosmonitor\\_eo](http://srt.snet.gob.sv/sihi/public/app/1/pozosmonitor_eo) con el objetivo de mantener informada a la población del estado del recurso subterráneo.

Esta publicación se enfoca en describir la experiencia en la implementación de la red de monitoreo de aguas subterráneas en la subcuenca del río Acelhuate. Además de mostrar los resultados obtenidos en dicho proceso después de 17 años de monitoreo continuo y las principales lecciones aprendidas hasta la fecha.

## II. ÁREA DE ESTUDIO

La subcuenca del Acelhuate (Fig.1) se encuentra ubicada dentro de la Región Hidrográfica Río Lempa. Cuenta con una superficie aproximada de 718 km<sup>2</sup> distribuidos en los departamentos de San Salvador, Cuscatlán y La Libertad.

La parte alta y donde nace el curso principal de agua se encuentra al sur, en la cordillera El Bálsamo (1,000 msnm). Desde esta, a través del terreno con pendientes variables, desciende hacia la parte media

donde se genera el mayor desarrollo urbanístico y actividad socioeconómica (entre 800 y 400 msnm). La parte baja (aproximadamente 250 msnm), se encuentra al norte, en los distritos de Guazapa, Aguilares y Suchitoto.

Orográficamente, se distinguen las elevaciones formadas por el estratovolcán antiguo volcán San Salvador - volcán joven Boquerón (1,950 msnm), los cerros Nejapa (900 msnm), Guaycume (750 msnm) y el volcán Guazapa (1400 msnm). Históricamente, el carácter erosivo y extrusivo de estas elevaciones ha condicionado el comportamiento del recurso subterráneo en la subcuenca.

La red hidrográfica de la subcuenca, se caracteriza por cursos tributarios ramificados que forman ángulos agudos con el tributario de mayor orden. (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012). El cauce principal, el río Acelhuate, es un curso de agua perenne que atraviesa la cuenca de sur a norte en un recorrido de 63 km descargando sus aguas en el lago Suchitlán, un cuerpo de agua creado por la presa Cerrón Grande. Sus afluentes principales son los ríos Tomayate, Las Cañas, San Antonio, Guazapa y Los Limones. Además, existen otros cursos de agua estacionales y perennes de menor orden provenientes de las partes altas de la cuenca.

Desde el punto de vista geológico, en la subcuenca predominan piroclastos de diferentes orígenes en la parte superior. Desde la zona intermedia y en profundidad, el subsuelo se caracteriza por la alternancia de lavas con diferentes grados de fracturación junto con sedimentos aluviales y materiales piroclásticos. La presencia de lavas está supeditada a la proximidad a focos eruptivos efusivos.

La naturaleza de los materiales y su distribución en la subcuenca permite distinguir dos tipos de acuíferos: aquellos en los que el flujo subterráneo es principalmente a través de un medio intergranular, localizados en el valle de la parte media y baja; y aquellos en los que el flujo subterráneo es principalmente a través de fracturas, ubicados en las proximidades del estrato volcán San Salvador-Boquerón y volcán de Guazapa.

El mecanismo de recarga y descarga natural del sistema consiste en agua que infiltra el terreno en las partes altas y con mayor capacidad de infiltración, ubicadas en el estrato volcán de San Salvador-Boquerón, Cordillera El Bálsamo, volcán Guazapa e Ilopango; y descarga en la parte baja a través de cursos de aguas y/o manantiales.

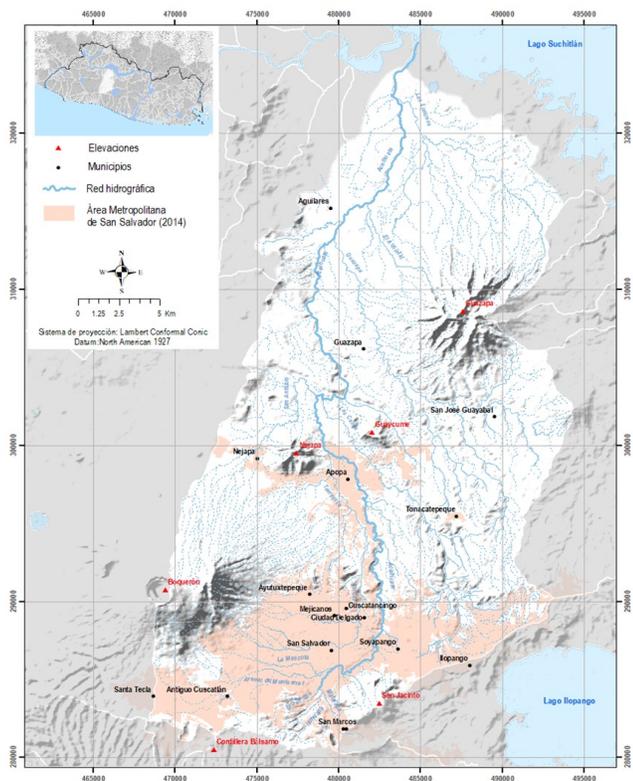


Fig. 1. Mapa de situación de la subcuenca del Acelhuate. Fuente: elaboración propia a partir de capas de información del Ministerio de Medio ambiente y Recursos Naturales.

### III. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

En primer lugar, se definieron los criterios y consideraciones para la implementación de la red de monitoreo, teniendo en cuenta parámetros a medir, ubicación geográfica, frecuencia de medición, equipo y almacenamiento de la información.

Ya que la subcuenca del río Acelhuate se caracteriza por su elevada densidad poblacional, intensa actividad socioeconómica y una significativa dependencia del agua subterránea como principal fuente de abastecimiento, la prioridad en la implementación de la red de monitoreo ha sido el seguimiento a la cantidad de agua disponible.

La disponibilidad de recursos económicos para la perforación de pozos y la accesibilidad a terrenos adecuados para su ubicación han sido los principales factores que han condicionado la implementación de la red. El limitado acceso a recursos económicos destinados a este objetivo se ha abordado mediante convenios con otras instituciones gubernamentales como la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) que ha puesto a disposición pozos fuera de operación para que sean equipados con equipo de monitoreo. También, a través de proyectos como "Fortalecimiento de la Gestión Ambiental en El Salvador" (FORGAES) y el "Proyecto Integrado, Agua, Saneamiento y Medio Ambiente" del

"Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento" (FCAS), el MARN ha obtenido recursos económicos para la perforación de pozos de observación con condiciones para ser instrumentados para el monitoreo.

Para evaluar de manera continua la cantidad de agua disponible en las zonas prioritarias de la subcuenca, se seleccionaron los sitios a perforar. Los sitios debían ubicarse en áreas representativas y sensibles a los cambios en los niveles de agua. Cada pozo se diseñó teniendo en consideración la profundidad del nivel del agua subterránea del acuífero de interés y la referencia de las profundidades de los pozos de extracción existentes, que, en algunos casos, pueden alcanzar o superar el centenar de metros.

Con el objetivo de establecer un sistema de monitoreo sostenible en el tiempo, se decidió ubicar los pozos de observación en terrenos que estuvieran en propiedad del estado, por ejemplo, en escuelas y parques. Para aquellos casos en los que la ubicación estratégica se encontraba dentro de una propiedad privada, se establecieron convenios para la utilización del terreno. Independientemente de cuál fuera el caso, fue crucial asegurar que los sitios de ubicación de los pozos, proporcionaran, al menos, un nivel mínimo de seguridad para prevenir actos de vandalismo contra el equipo.

La frecuencia y duración del monitoreo se definió con el objetivo de capturar las variaciones estacionales, así como la identificación de tendencias a largo plazo y cambios significativos en el acuífero. Considerando lo anterior, quedó establecida una frecuencia en la toma de registros de nivel de pozo de uno o dos datos por día.

Como estrategia de aseguramiento de la calidad del dato y reducción de los costos de operación, cada pozo tiene un equipo con una sonda de medición automática que incluye un recolector de datos con capacidad de almacenamiento de la información de manera interna. Dicha información se extrae posteriormente, por medio de equipos portátiles.

Cada uno de los pozos fue adecuado en su boca o brocal para poder instalar los equipos de medición, almacenamiento y transmisión de datos.

Por último, para mantener informados a los usuarios del estado del recurso hídrico subterráneo en la subcuenca, toda la información recolectada de los pozos; tanto la almacenada internamente en el recolector de datos del equipo como la transmitida a través de telefonía móvil, es revisada diariamente previo a su publicación en el Sistema de Información Hidrológico del MARN: <http://srt.snet.gob.sv/sihi/public/app/1/pozosmonitor eo>.

#### IV. MATERIALES Y MÉTODOS

Como se ha mencionado anteriormente, la red de monitoreo de niveles del MARN en la subcuenca del Río Acelhuate se estableció en el año 2007 con el apoyo del proyecto FORGAES y ANDA, inicialmente con la instrumentación de 13 pozos de observación. Estos pozos se ubicaron en puntos estratégicos como la Planta de bombeo ANDA Campestre, San Salvador; Planta de bombeo ANDA Altamira, San Salvador; Planta de bombeo ANDA Colonia Militar 2, San Salvador; Planta de bombeo ANDA colonia Flor Blanca, San Salvador; Planta de bombeo ANDA colonia Centroamérica, San Salvador; Planta de bombeo ANDA UES, San Salvador; Planta de bombeo ANDA La Cancha, Apopa; Planta de bombeo ANDA Shangallo, Ilopango; Venecia, Soyapango; Los Santos 1, Soyapango; Universidad Don Bosco, Soyapango; Parque Ecológico Chantecután, Soyapango; y Parque Cuscatlán, San Salvador. Cada pozo fue equipado con sondas mecánicas con un recolector de datos MDS-Floater 2 de la compañía SEBA. Sin embargo, después de un periodo de funcionamiento, se enfrentaron desafíos debido al vandalismo contra los componentes de la red de monitoreo, que incluyeron robos de equipos y obstrucción de pozos con rocas u otros objetos. Además, algunos de los pozos cedidos por ANDA fueron rehabilitados para operar nuevamente como pozos de extracción, lo que resultó en una interrupción en la obtención de datos, (Fig.2).

La continuidad de la red de monitoreo se ha sostenido gracias al respaldo brindado por proyectos de cooperación internacional y acuerdos con otras instituciones estatales. A pesar de la interrupción de la medición en algunos pozos de observación, a lo largo de los últimos años se han implementado nuevos puntos de monitoreo en diversos lugares estratégicos, entre estos, se incluyen el Parque Cafetalón, en Santa Tecla; el Parque Bicentenario y la Universidad Centroamérica José Simeón Cañas (UCA), en Antiguo Cuscatlán; la Casa de la Mujer, en Mejicanos; El Salitre, Nejapa 6 e Iglesia Luterana, en Nejapa y Textuflil, en Aguilares. Estos nuevos puntos de observación se unen a los de la Planta de bombeo ANDA Altamira, Planta de bombeo ANDA Flor Blanca y Planta de bombeo ANDA UES, para un total de 12 puntos distribuidos espacialmente tal como la muestra la figura 2.

Con el transcurso del tiempo, los equipos empleados para la recolección de niveles en los pozos han experimentado una notable evolución. Inicialmente, se emplearon sensores mecánicos, como el recolector de datos MDS- Floater2, los cuales fueron sustituidos posteriormente por sensores de presión y temperatura, como el OTT ecoLog500. Este último

consta fundamentalmente de tres componentes: una unidad de comunicación, una sonda manométrica con un colector de datos y un cable para la sonda. En algunos casos, las sondas incluyen unidades de comunicación que transmiten la información a través de telefonía móvil hacia los servidores del MARN.

Para su instalación, en cada uno de los pozos fue necesario medir la profundidad a la que se encontraba el nivel del agua subterránea y profundidad total del pozo, con el objetivo de definir las longitudes de los cables de sujeción de cada una de las sondas manométricas.

Dado que la sonda mide la presión hidrostática de la columna de agua sobre ella, es crucial considerar que el margen de medición de esta columna es un factor fundamental dentro de las especificaciones técnicas del equipo al momento de adquirirlo. Para compensar los efectos de la presión atmosférica, el equipo cuenta con un capilar, situado en el cable de la sonda, que proporciona un valor de la presión instantánea de aire del entorno.

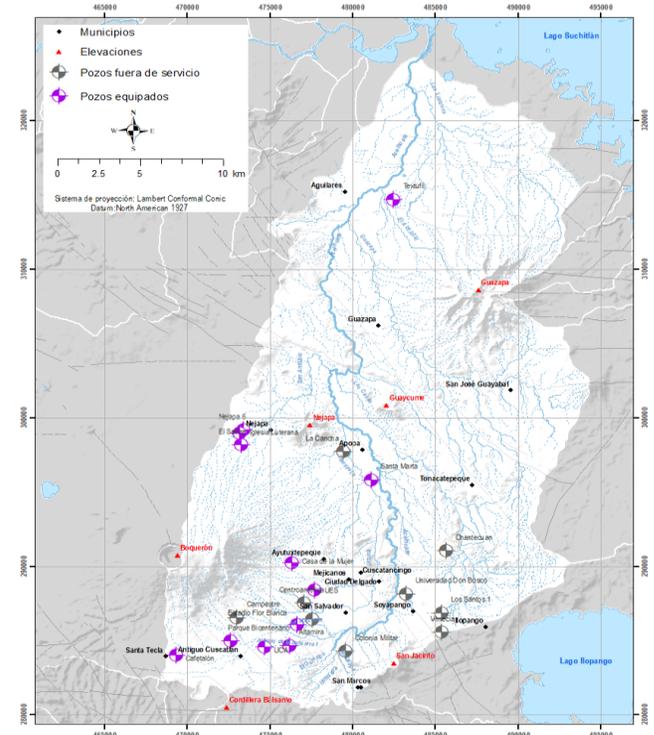


Fig. 2. Red de monitoreo de aguas subterráneas en la subcuenca del Acelhuate. Los puntos en gris representan pozos discontinuados de la red y los violetas, los pozos instrumentados. Fuente: elaboración propia a partir de capas de información del Ministerio de Medio ambiente y Recursos Naturales.

La configuración de los parámetros de servicio del equipo se realiza a través del software "Water Logger Operation Program". La profundidad del agua vendrá dada por la profundidad del nivel freático, medida desde la boca del pozo y que actuará como la

referencia inicial, a la que se sumará o restará las variaciones de la columna de agua medidas en el sensor de presión.

## V. RESULTADOS

En la figura 3, se presentan los datos sin procesar obtenidos de los equipos instalados en los pozos de observación. En esta, se visualizan los cambios experimentados por la red de monitoreo a lo largo del tiempo, incluyendo la incorporación de nuevos puntos de observación, así como la discontinuidad en otros. Los primeros registros datan desde el año 2007 en la planta de bombeo de ANDA ubicada en la Colonia Flor Blanca, en San Salvador y los más recientes ubicados en el parque Cafetalón de Santa Tecla.

A pesar de la discontinuidad en los datos de nivel en algunos pozos de observación, es posible observar la variabilidad de los niveles a lo largo del tiempo. Aquellos con un historial más extenso, como Altamira, Flor Blanca, UES, Nejapa 6 en incluso Textufile, permiten observar claramente tendencias indicativas de cambios en la recarga, la extracción de agua o cambios en el acuífero, el efecto de estacionalidad como aumento durante la temporada de lluvias y disminución durante la temporada seca; e incluso, el efecto de eventos extremos, como la tormenta tropical 12E del año 2011.

También, es importante tener en cuenta que puede haber ruido en los datos proveniente de la operación de pozos cercanos u otras fuentes, que pueden afectar la precisión de las mediciones, tal es el caso del pozo Santa Marta.

Por último, es factible clasificar hidrogramas de niveles con patrones similares en la subcuenca. Los niveles registrados en los pozos Cafetalón, Bicentenario, UCA, Altamira, Flor Blanca, UES y Mejicanos ofrecen una visión de las fluctuaciones del acuífero fracturado de la subcuenca. Con excepción del primero de la lista, los demás muestran una tendencia descendente en los últimos años de registro, lo cual refleja las extracciones (en mayor o menor grado) realizadas para satisfacer las diversas demandas de las actividades que se desarrollan al sur de la subcuenca.

Siempre al sur, pero en el acuífero poroso, los niveles registrados en los pozos Venecia y UDB muestran una tendencia ascendente en los años con registros, es decir, el impacto de las extracciones era menor que el de la recarga en dicho acuífero.

Hacia el norte, los valores al final de cada año en los pozos Santa Marta y El Salitre son notablemente similares. Si se eliminaran los datos de interferencia del pozo El Salitre, se puede constatar que ambos

pozos siguen la misma línea equipotencial. Los datos del pozo de la Iglesia Luterana muestran un comportamiento similar al de los dos anteriores. Sin embargo, debido a su diseño, que incluye tramos de rejillas desde los 70 m hasta los 175 m, está influenciado por aportes del acuífero más cercano a la superficie, tal como lo evidencia el comportamiento del pozo Nejapa6, que obtiene datos de dicho acuífero.

Finalmente, el pozo de observación Textufile exhibe un comportamiento estable, lo que permite visualizar claramente las transiciones entre la época seca y la lluviosa.

## VI. COMENTARIOS FINALES

La implementación de la red de monitoreo en la subcuenca del Acelhuate ha contribuido significativamente a una mejor comprensión de la dinámica de los niveles de agua subterránea en el acuífero. Ha permitido identificar patrones, tendencias y cambios estacionales, así como disminución gradual de los niveles causadas por las extracciones para satisfacer las demandas de agua al sur de la subcuenca.

Hasta la fecha, la creación de la base de datos de niveles constituye el primer paso hacia la posibilidad de llevar a cabo, a corto y mediano plazo, un preprocesamiento de esta que incluya la eliminación de datos atípicos, la interpolación de datos faltantes y, si fuera necesario, la normalización de las series temporales. El propósito de este preprocesamiento es facilitar el análisis de tendencias de las series de tiempo mediante el uso de técnicas como el suavizado exponencial o regresión lineal. Además, abre la posibilidad de realizar una descomposición de las series en sus componentes de tendencia, estacionalidad y aleatoriedad con el objetivo de identificar patrones subyacentes.

Una vez comprendida la estructura de la serie de tiempo se podrá aplicar técnicas de modelado o modelos de suavizado para pronosticar los futuros niveles de agua en los pozos o evaluar los impactos de las medidas de gestión implementadas en la subcuenca, como la implementación de medidas de conservación del agua o la restricción de las extracciones.

El objetivo último de todo el proceso es apoyar la toma de decisiones informadas que contribuyan a una buena gestión del recurso hídrico subterráneo en la subcuenca del Acelhuate (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012)

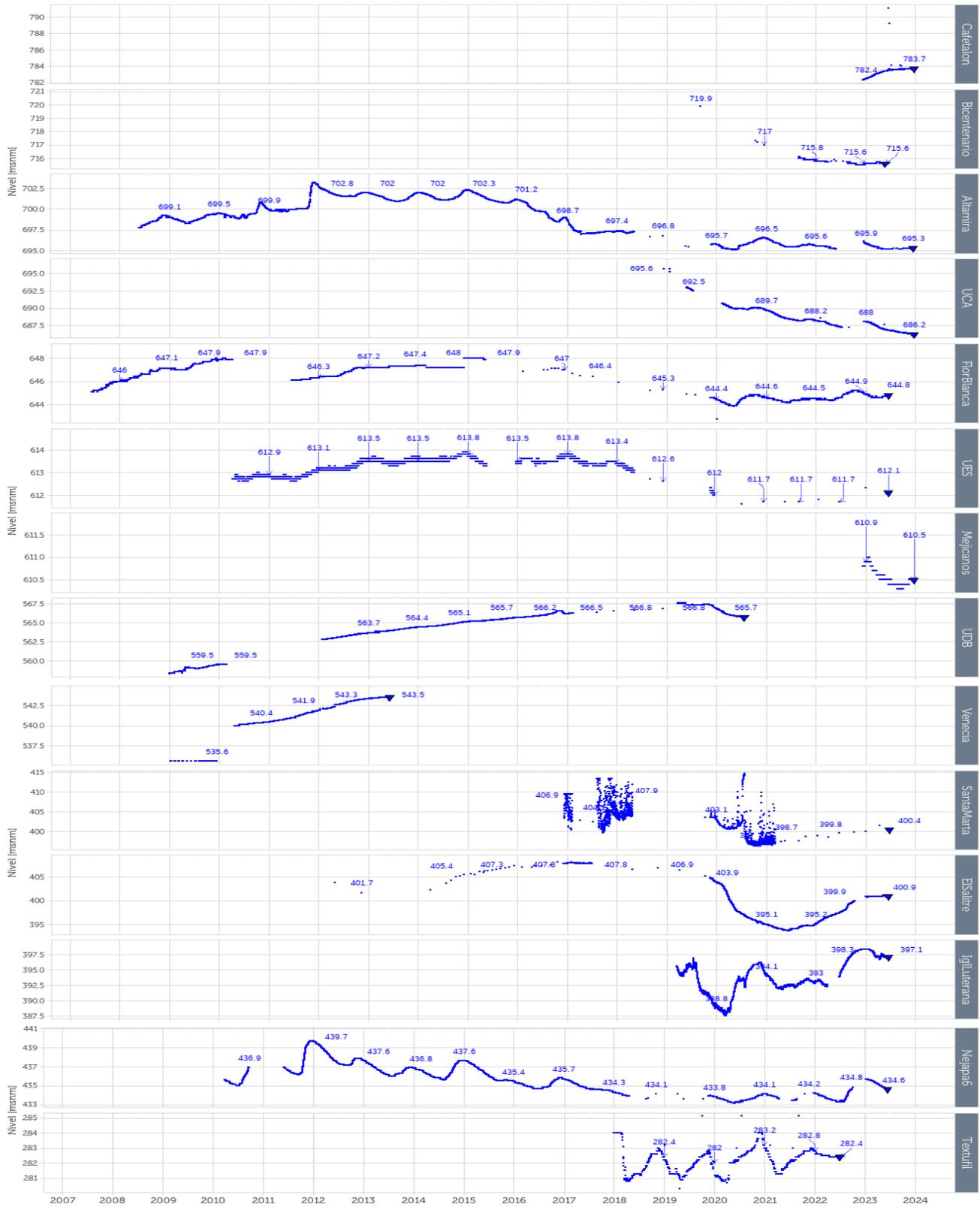


Fig. 3 Hidrograma de nivel en pozos de observación en la subcuenca del Río Acelhuate. Fuente: Sistema de Información Hidrológica del MARN.

### RECONOCIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento a las siguientes instituciones por el apoyo y colaboración en el desarrollo del proyecto:

Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), a la Unión Europea por la implementación inicial de la red a través del proyecto de Fortalecimiento de la Gestión Ambiental (FORGAES), a la Cooperación Española por su aporte a través del Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento (FCAS), a la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS) y al equipo de la Gerencia de Investigación Desarrollo e Innovación de la Dirección de Amenazas y Recursos Naturales del MARN.

Su contribución ha sido invaluable en facilitar la implementación de la red de monitoreo de aguas subterráneas y el avance del entendimiento de la dinámica del agua subterránea en la subcuenca del Acelhuate.

### REFERENCIAS

Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados. (2008). *Mapa Hidrogeológico de El Salvador. Escala 1:100,000*. San Salvador.

Ambiente S.A de C.V. (2011). *Análisis rápido de la situación ambiental dentro de la subcuenca del río Acelhuate*. Informe final, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, San Salvador, San Salvador.

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (Agosto de 2012). Escenarios de riesgo: amenaza por inundación. *Cuenca alta del río Acelhuate: Arenal Montserrat, Arenal Mejicanos, Arenal Tutunichapa, Quebrada El Garrobo*. San Salvador, El Salvador.

Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales. (2017). *Sistema de Información Hidrológico (SIHI)*. Obtenido de Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales: <http://srt.snet.gob.sv/sihi/public/inventario/hidrogeo>