



# PLAN DE MANEJO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA SUBCUENCA DEL RÍO SAN SIMÓN (USULUTÁN, EL SALVADOR)

## FASE I: DIAGNÓSTICO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS



Marzo, 2018

Estilita Ruiz Romera  
Miren Martínez Santos  
Iratxe Alonso



Esta publicación ha sido realizada con el apoyo financiero de la Agencia Española de Colaboración Internacional para el Desarrollo (AECID) con cargo al proyecto de colaboración internacional: *"Apropiación y fortalecimiento de las organizaciones locales y gobiernos municipales en la gestión y dinamización de procesos de mejora de la capacidad de resiliencia ante efectos locales del cambio climático, en tres municipios del departamento de Usulután, El Salvador (16-PR1-141)"*. **"TÍTULO: Plan de manejo de los recursos hídricos de la subcuenca del río San Simón (Usulután, El Salvador): Diagnóstico de los recursos hídricos"**. Su contenido es responsabilidad exclusiva de la Universidad del País Vasco – Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU), Solidaridad Internacional – Nazioarteko Elkartasuna (SI) y Fundación Salvadoreña para la Reconstrucción y el Desarrollo (REDES), y no refleja necesariamente la opinión de la AECID.

Con la **financiación** de:



Con la **colaboración** de:



## Contenido

1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS .....	2
3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO Y DE LOS RECURSOS NATURALES .....	3
3.1. Zona de estudio.....	3
3.2. Recursos Naturales.....	6
<i>Uso potencial del suelo</i> .....	6
<i>Tipos y uso actual del suelo</i> .....	9
<i>Recursos Hídricos</i> .....	13
4. DESCRIPCIÓN DE LAS METODOLOGÍAS SELECCIONADAS PARA DESARROLLAR EL DIAGNÓSTICO .....	14
4.1. Taller de Diagnóstico Rural Participativo (DRP) .....	14
4.2. Evaluación de la calidad química y biológica de las aguas superficiales y subterráneas.....	15
5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN RECOGIDA EN EL TALLER .....	15
5.1. Gestión de los recursos hídricos: problemáticas y expectativas.....	15
5.2. Caracterización de la problemática de las Comunidades locales en el uso de los recursos hídricos .....	17
6. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD QUÍMICA Y BIOLÓGICA DE LAS AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS .....	19
6.1. Red de control de aguas superficiales y subterráneas.....	19
6.2. Metodología de campo y laboratorio .....	21
6.3. Características físico-químicas de las aguas de la subcuenca del río San Simón	21
6.4. Comportamiento y origen de los metales pesados, cationes y aniones en las aguas de la subcuenca del río San Simón .....	26
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	32
8. BIBLIOGRAFÍA .....	37

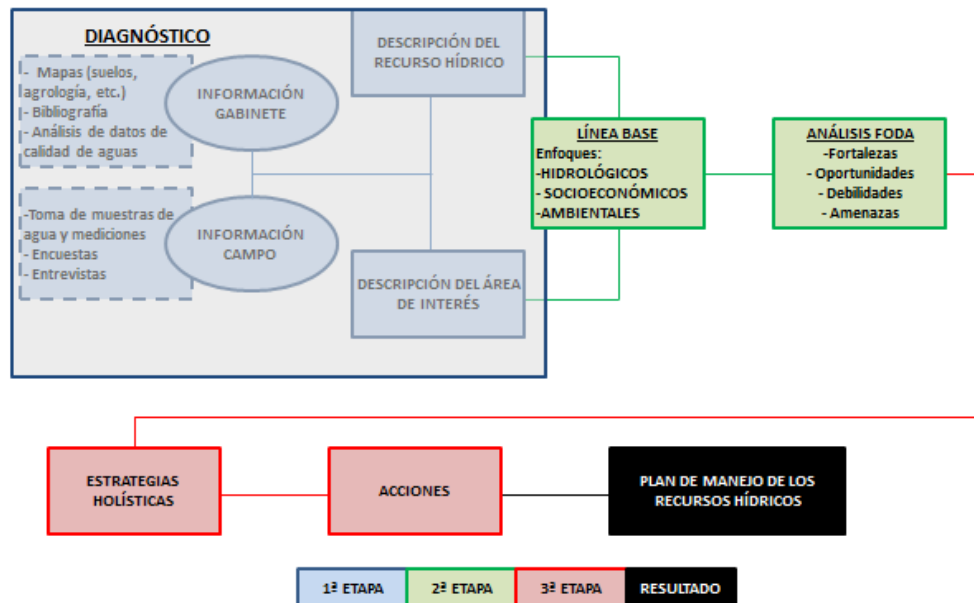
## 1. INTRODUCCIÓN

El principal objetivo de este estudio era la realización de un Diagnóstico inicial de los Recursos Hídricos de la subcuenca del río San Simón (Usulután, El Salvador). El Diagnóstico constituye la etapa preliminar en la elaboración de un Plan de Manejo de los Recursos Hídricos; por lo que su elaboración debe ser lo más precisa y fiable posible. Este Diagnóstico dará como resultado el punto de partida para evaluar el estado de los recursos naturales, concretamente los recursos hídricos, y analizar e interpretar sus interacciones con el ser humano, es decir, la línea base. Según Jiménez (2006), la línea base se define como un conjunto de indicadores que sirven como marco de referencia cualitativo y cuantitativo para poder verificar, analizar, monitorear, dar seguimiento y evaluar los resultados, impactos y cambios a nivel biofísico, socioeconómico y ambiental, relacionados con la implementación de actividades de un plan, un proyecto o un programa de manejo de cuencas hidrográficas.

Tomando como referencia aquellas etapas necesarias para la realización de un Plan de Manejo de los Recursos Hídricos (Figura 1), el presente documento reúne aquellas relacionadas exclusivamente con el Diagnóstico de los Recursos Hídricos. Este Diagnóstico se ha desarrollado en varias etapas:

- Descripción del área de interés y de los recursos naturales:  
En ella se detallan los principales componentes biofísicos de la zona de estudio; tipos de suelo, clases de suelo, uso actual de los mismos, pendientes, cultivos predominantes y principales cursos de aguas superficiales, entre otros.
- Descripción de las Metodologías e Instrumentos Metodológicos para desarrollar el Diagnóstico:
  - *Talleres de Diagnóstico Rural Participativo (DRP):*  
Mediante encuestas, entrevistas y fichas o guías técnicas se detectan y evalúan los factores de mayor influencia medioambiental y los recursos disponibles para la población.
  - *Evaluación de la calidad química y biológica de las aguas superficiales y subterráneas:*

Se determina el estado de la calidad y cantidad de las masas de agua, mediante mediciones *in situ* y toma de muestras de agua, así como la influencia que ejerce el desarrollo socioeconómico (población y actividades industriales) sobre los recursos hídricos de la zona.



**Figura 1.** Fases para la elaboración de un Plan de Manejo de los Recursos Hídricos.

## 2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

La necesidad de realizar un Diagnóstico de los Recursos Hídricos de la subcuenca del río San Simón; viene impulsada por las crecientes demandas por parte de los ciudadanos de los municipios de Berlín, Alegría y Mercedes Umaña, tras un período de consulta realizado por los líderes de varias ADESCO (Asociación de Desarrollo Comunitaria) junto con otras instituciones, para conocer los principales problemas medioambientales a los que debe hacer frente la población residente de esta zona.

Por ello, la asociación REDES (Fundación Salvadoreña para la Reconstrucción y el Desarrollo) junto con SI (Solidaridad Internacional) y en colaboración con la Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea (Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao (Departamento de Ingeniería Química y Medio Ambiente, de la Escuela de Ingeniería de Bilbao), han participado en

la realización y desarrollo del presente Diagnóstico, cuyos resultados darán soporte a algunos estudios previamente realizados, como son el:

- Plan Municipal de Protección Civil, Prevención y Mitigación de Desastres de Alegría, Departamento de Usulután (2008, CEPRODE).
- Plan Municipal de Protección Civil de la Ciudad de Berlín, Usulután (2008, CEPRODE-LWR).
- Plan de Ordenamiento y Desarrollo Territorial del Municipio de Alegría (2002, MARN).
- Plan de Ordenamiento y Desarrollo Territorial del Municipio de Berlín (2002, MARN).

En este sentido, el **objetivo general** del informe se resume en:

La realización del **Diagnóstico del estado de los Recursos Hídricos de la subcuenca del río San Simón**. Este Diagnóstico permitirá conocer cuáles son los recursos hídricos disponibles en la zona de estudio (cantidad), así como el estado de estos mismos (calidad). Esto resulta de máximo interés para hacer frente a los posibles efectos ambientales derivados del cambio climático.

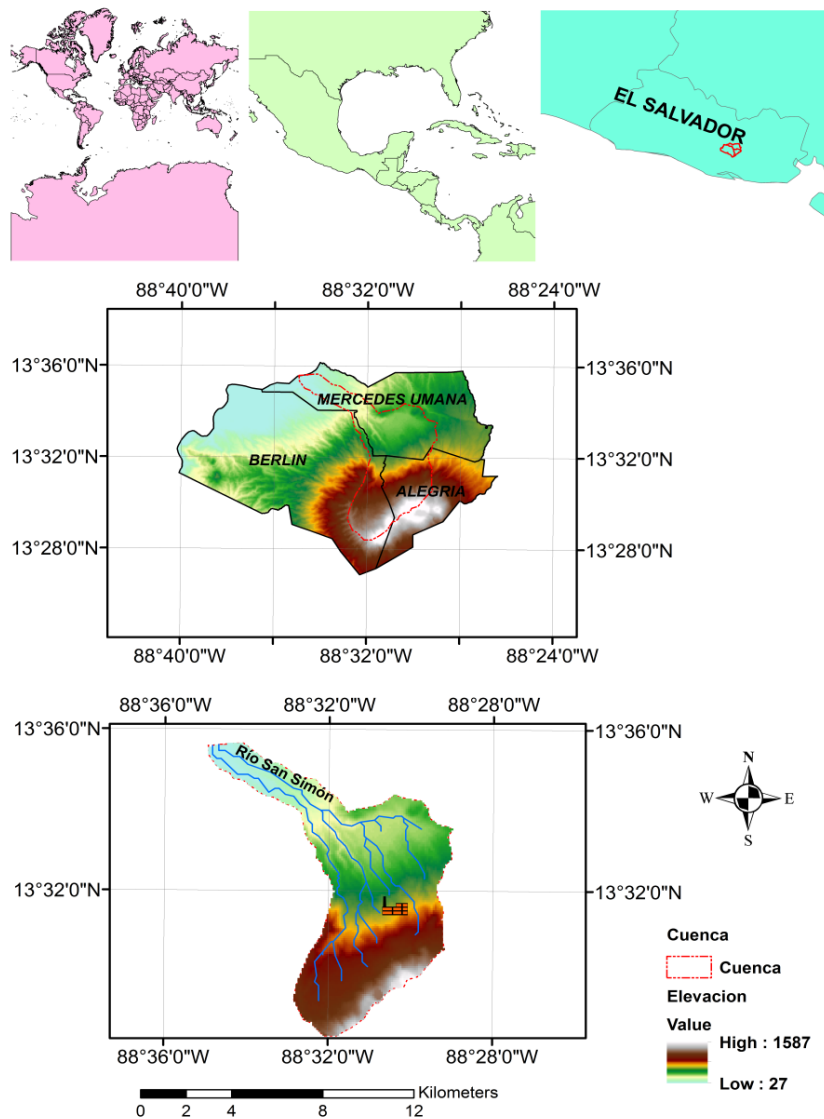
### **3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO Y DE LOS RECURSOS NATURALES**

#### **3.1. Zona de estudio**

La **subcuenca del Río San Simón** con un área aproximada de 58.87 km<sup>2</sup> (Figura 2), se localiza al norte del **departamento de Usulután**, en El Salvador (13°22'33.6"N; 88°31'12"W). El Departamento de Usulután presenta una extensión aproximada de 2,130 km<sup>2</sup> y se sitúa a unos 112 km de la capital, con un total de 23 municipios. Los municipios de **Berlín, Alegría y Mercedes Umaña** son objeto de interés en el presente trabajo, al extenderse sobre ellos la subcuenca de estudio.

Teniendo en consideración la clasificación climatológica de Koppen, Sapper y Laurer (Figuroa, 2008), la subcuenca del Río San Simón presenta un clima de Sabana Tropical Caliente o Tierra Caliente en elevaciones de 0 a 800

m.s.n.m, Sabana Tropical Calurosa o Tierra Templada en las elevaciones de 800 a 1200 m.s.n.m y Tierras Frías en las elevaciones que van desde los 1,200 a 2,700 metros sobre el nivel medio del mar (Boletín Climatológico Mensual, Anual; MARN). Su precipitación media anual, según datos de este mismo informe, es de 1,865 mm, distribuyéndose esencialmente entre los meses de mayo a octubre, mientras que de junio a agosto se registran las precipitaciones más bajas. Por otra parte, las temperaturas promedio mensuales varían entre 20-25 °C.



**Figura 2.** Localización y delimitación de la subcuenca del río San Simón.



El río San Simón, también conocido como río Santa Anita, es uno de los afluentes del río Lempa, cuya cuenca hidrográfica es una de las más grandes de América Central, dividida entre los países de Guatemala, Honduras y El Salvador. En el caso de El Salvador, los recursos hídricos de esta cuenca son importantes por su uso para fines agropecuarios, abastecimiento de agua y generación hidroeléctrica.

En 1945 surge La Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL), a raíz de las preocupaciones gubernamentales por paliar las necesidades eléctricas generadas por un importante crecimiento poblacional en el país. Además, como alternativa a esta fuente de energía eléctrica (hidroeléctrica), nacen las centrales geotérmicas de Ahuachapán y Berlín (LaGeo, empresa del Grupo CEL).

Ésta última central (Berlín), ubicada en el sector norte del complejo volcánico de Tecapa, en el Cantón el Zapotillo (Municipio de Alegría), ha sido objeto de estudio como consecuencia de los efectos ambientales que se generan durante su proceso de producción. Según Guevara (2011), la empresa multinacional ELECTROCONSULT, realizó en el país el estudio "factibilidad del desarrollo geotermoeléctrico a condensación en el campo geotérmico de Berlín" manifestando su no conformidad con el proceso de generación de energía, al no constituir un mecanismo de desarrollo limpio. Además, la inexistencia de una legislación ambiental en la que se enmarque la energía geotérmica, así como un organismo estatal que establezca la forma en que deben realizarse las diferentes etapas para la generación de energía geotérmica (Guevara et al., 2011), propicia que las empresas lleven a cabo sus propios procedimientos para el desarrollo de las actividades geotérmicas, debido a la carencia de un organismo que regule las condiciones de seguridad que deberían ser adoptadas. Como consecuencia, los efectos ambientales negativos sobre el medio se ven incrementados.

A pesar de que algunos sectores consideran la energía geotérmica como una energía limpia, durante la fase de operación se pueden producir:

- **Vertidos gaseosos a la atmósfera** formados por gases no condensables arrastrados por el vapor, tales como dióxido de carbono y sulfuros de hidrógeno, con trazas de amoníaco, hidrógeno,

nitrógeno, metano, radón y algunas especies volátiles como boro, arsénico y mercurio, requiriendo ser tratadas previamente a su emisión.

- **Vertidos y acumulación de fluidos geotérmicos** a las aguas superficiales pudiendo causar la contaminación de las mismas al contener elementos como sodio, potasio, calcio, flúor, magnesio, silicatos, antimonio, estroncio, bicarbonato, boro, litio, arsénico, mercurio, etc; requiriendo el uso previo de tratamientos físico-químicos para su depuración, aunque lo habitual es la reinyección en el subsuelo.
- **Contaminación de las aguas subterráneas** debido al uso de determinados fluidos durante la etapa de perforación (García y Vásquez, 2013) y a las infiltraciones de los efluentes a través de los orificios de las paredes de los pozos durante la etapa de reinyección.

Además de la actividad geotérmica, en la subcuenca del río San Simón existen una serie de problemas ambientales derivados de una mala gestión del territorio, como son la deforestación de los bosques autóctonos, los cambios en los usos del suelo, el uso intensivo de agroquímicos en agricultura, la alteración de los sistemas de drenaje naturales, entre otros (Proyecto AGUA- Acceso, gestión y Uso Racional del Agua, 1999). Estos han provocado un deterioro ambiental de la subcuenca del río San Simón y, en particular, de sus recursos hídricos.

En este sentido, es importante señalar el papel de los recursos hídricos de esta subcuenca, ya que son el suministro de agua para más de 10,000 familias residentes en los municipios de Mercedes Umaña, Alegría, Berlín, Santiago de María, California, Tecapán, Estanzuelas y Nueva Granada (López Hernández, 2005).

### **3.2. Recursos Naturales**

#### ***Uso potencial del suelo***

Con el fin de conocer y mantener los usos potenciales de los suelos atendiendo a sus diferentes características químicas, físicas y mineralógicas, la clasificación de los suelos, en base a su valor de aptitud agrológico, permite

conocer sus restricciones agronómicas y llevar a cabo un buen manejo de estos. La **clasificación agrológica** establecida por el **Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA)** está basada en ocho clases; desde la clase I (la más apta) hasta la clase VIII (la menos apta), permite obtener una visión preliminar sobre la idoneidad de los suelos para usos generales (cultivos, pastos, bosques), pero no para usos concretos.

Algunas de las principales características de los suelos agrupados en cada clasificación serían los siguientes:

**Clase I:** suelos casi planos con pendientes entre 0 y 3% y muy pocas limitaciones de uso. Son profundos, productivos, poseen una buena capacidad de retención de humedad y buen contenido de nutrientes. Son suelos con excelentes rendimientos.

**Clase II:** suelos de pendientes suaves entre 3 y 7%. Tienen una tendencia moderada a la erosión hídrica y eólica, y una profundidad efectiva menor a la de un suelo ideal. Pueden o no, tener algún grado de impedimento como estructura desfavorable, contenido de sales o acidez moderada. También pueden inundarse ocasionalmente y necesitar drenaje. Son suelos con rendimientos de muy buenos a excelentes.

**Clase III:** suelos de pendientes entre 7 y 12%, limitados por una alta susceptibilidad a la erosión, inundaciones frecuentes, baja fertilidad natural, poca profundidad efectiva, baja capacidad de retención de humedad y moderada salinidad o alcalinidad. Requieren prácticas intensivas de manejo y conservación y son adecuados para cultivos permanentes, praderas, plantaciones forestales y ganadería extensiva.

**Clase IV:** suelos de pendientes pronunciadas entre 12 y 20%, susceptibles a los procesos erosivos. Muestran poca profundidad efectiva, baja retención de humedad, muy baja fertilidad natural y baja capacidad de drenaje por lo que requieren prácticas muy intensivas de manejo y conservación. Los cultivos anuales se pueden desarrollar ocasionalmente y su uso se restringe generalmente a cultivos semi-permanentes o permanentes.

**Clase V:** a pesar de ser suelos casi llanos, presentan severas limitaciones dada su pedregosidad y rocosidad por lo que se limitan a ser utilizados para

el pastoreo extensivo, producción forestal, conservación, paisajismo y recreación.

**Clase VI:** son suelos con pendientes superiores al 25%, aptos para la producción forestal o cultivos permanentes adaptados ecológicamente a la zona. Requieren prácticas intensivas de manejo y conservación de suelos y agua.

**Clase VII:** son suelos con pendientes mayores del 25% y restricciones muy fuertes por pedregosidad, rocosidad, baja fertilidad, erosión severa y limitaciones químicas como pH fuertemente ácido. Son áreas de protección que deben permanecer cubiertas por vegetación densa de bosque.

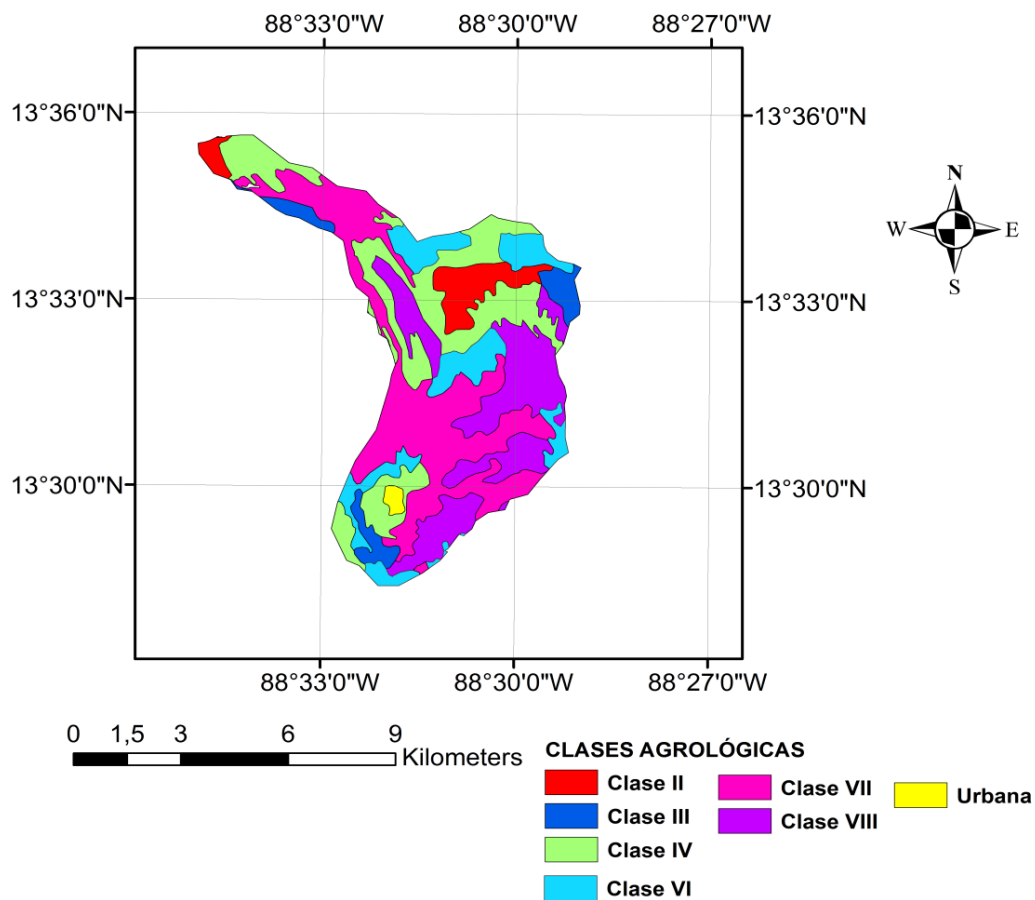
**Clase VIII:** tierras no aptas para ningún uso agropecuario puesto que presentan restricciones fuertes de clima, pedregosidad, textura y estructura del suelo, salinidad o acidez extrema y drenaje totalmente impedido.

Los suelos agrupados en las clases agrológicas de tipo VII (31%) y IV (34%) son los predominantes a lo largo de la subcuenca del río San Simón (Figura 3), ocupando una extensión aproximada de 1,780 y 1,912 Ha, respectivamente. Mientras que los suelos de la clase IV se encuentran distribuidos en la parte baja de la cuenca, los de tipo VII predominan en la cuenca media-alta. Atendiendo a las características descritas por los suelos incluidos en estas clases agrológicas, además de las pendientes requeridas por los mismos para su asentamiento, la cuenca media-baja es más adecuada para fines agrícolas, especialmente cuando se trate de cultivos semipermanentes o anuales. Por el contrario, la cuenca media-alta es más propicia al uso forestal y al cultivo permanente (cafetales).

Los suelos con clasificación tipo VI (10%) y VIII (12%) ocupan una extensión de 581 y 678 Ha, respectivamente. Estos suelos no muestran una distribución tan homogénea como los anteriores, aunque se localizan, por lo general, en las zonas medias-altas de la subcuenca. Los suelos incluidos en la clase VIII, son tierras con limitaciones topográficas y muy susceptibles a la erosión hídrica por lo que deben ser destinados a su protección y conservación.

En general, el territorio presenta una composición muy diversa en cuanto a sus potenciales capacidades de uso. En él, también es posible apreciar la

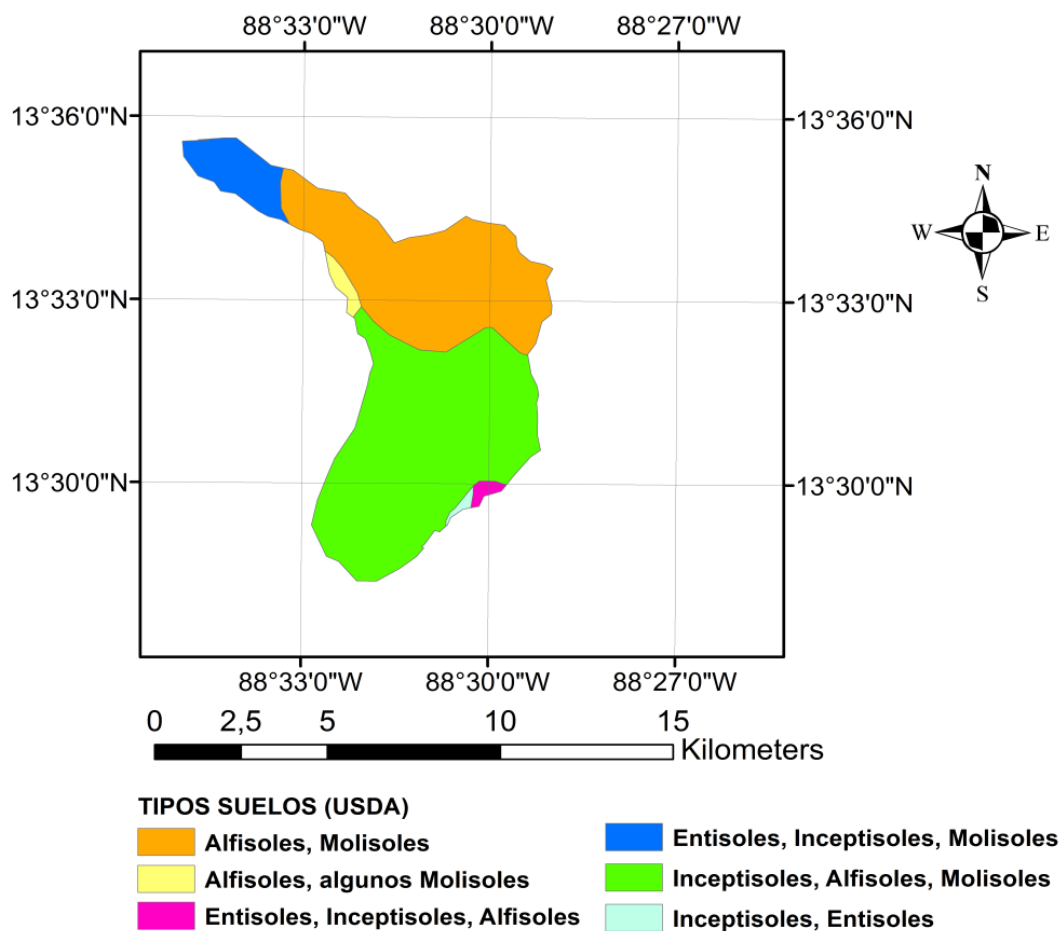
existencia de suelos con clase III (4%) y II (5%), aunque en menores extensiones, alrededor de 235 y 259 Ha, respectivamente. Éstos, se distribuyen en aquellas zonas más llanas de la subcuenca, es decir, parte inferior de la misma. Dada su fertilidad, los suelos agrupados en estas clases son los más idóneos para usos agrícolas, pudiendo ser utilizados para diferentes tipos de cultivos. Sin embargo, su susceptibilidad a la erosión hídrica requiere de prácticas que permitan el mantenimiento de los mismos.



**Figura 3.** Clases agrológicas de los suelos de la subcuenca del río San Simón.

### ***Tipos y uso actual del suelo***

En base a la **clasificación de suelos de Estados Unidos (USDA Soil Taxonomy)** la subcuenca del río San Simón cuenta con diferentes tipos de suelos destacando Alfisoles, Molisoles, Entisoles e Inceptisoles (Figura 4), los cuales son utilizados, en su gran mayoría, para el desarrollo de actividades agrícolas, destacando el cultivo de cafetales y el cultivo de grano básico (maíz y frijol), entre otras mezclas de sistemas productivos (Figura 5).

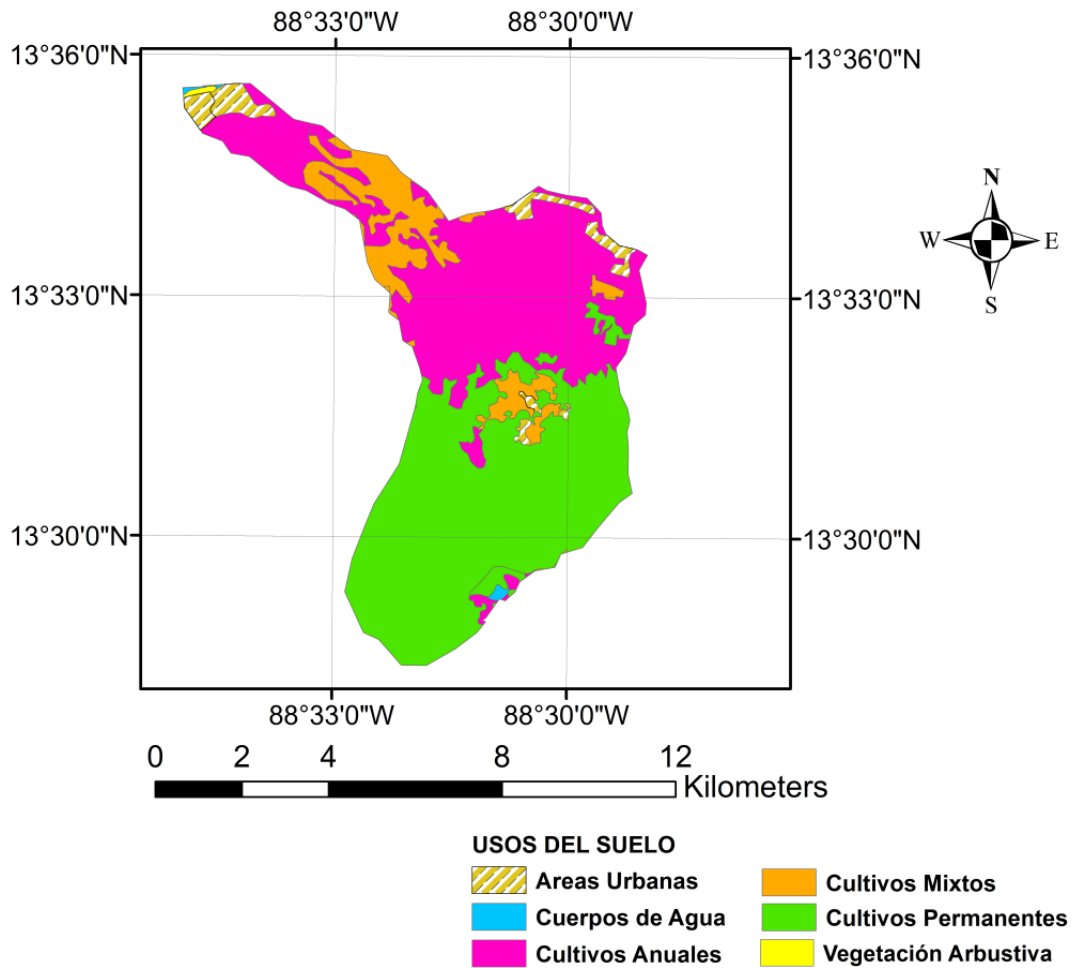


**Figura 4.** Tipos de suelos de la subcuenca del río San Simón.

Algunas de las principales propiedades de los suelos de la subcuenca del río San Simón son las siguientes:

**Alfisoles:** son suelos húmedos la mayor parte del tiempo con saturación alta y buen contenido de cationes intercambiables, presentes en zonas de pendientes superiores al 10% con vegetación de bosque. Son suelos jóvenes de fertilidad variable en función de sus usos.

**Molisoles:** estos suelos de color oscuro poseen un alto contenido en materia orgánica. Son suelos fértiles al encontrarse sobre zonas cálidas con altos contenidos de arcillas y buena cantidad de cationes que forman bases y sales nutritivas esenciales para las plantas.



**Figura 5.** Usos del suelo de la subcuenca del río San Simón.

**Entisoles:** son suelos derivados de fragmentos de roca suelta, formados por el arrastre y depósito de materiales sedimentarios transportados por la acción del agua. Son suelos jóvenes y pobres en materia orgánica.

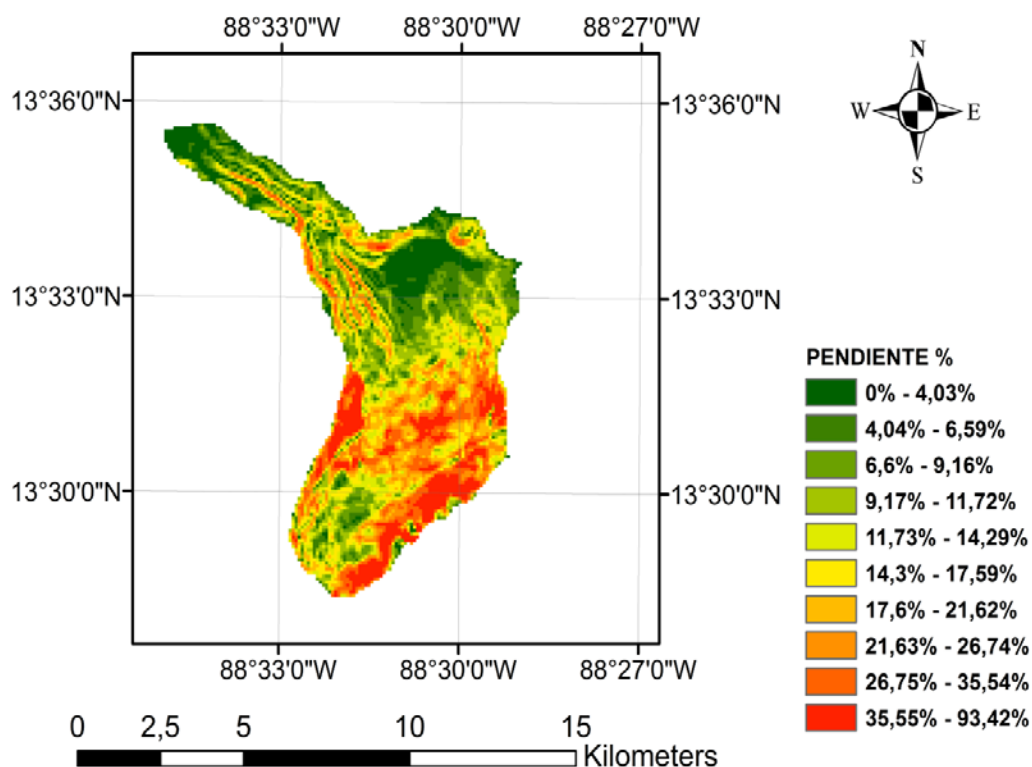
**Inceptisoles:** estos suelos presentan unas características poco definidas. Se desarrollan en cualquier tipo de clima, excepto en zonas con condiciones áridas. Presentan un alto contenido en materia orgánica y un pH ácido. Se caracterizan por una capacidad de drenaje baja debido a la acumulación de arcillas amorfas. Son suelos de origen volcánico reciente y ofrecen fertilidad prolongada en zonas de clima frío.

Teniendo en consideración las principales características edáficas de los suelos, junto con el rango de pendientes del territorio (Figura 6), se observa que las zonas de mayor pendiente (superiores a 25%), situadas en la parte media-alta y cercanas al complejo volcánico, son más propicias para los

cultivos permanentes. El relieve característico de esta zona dificulta los usos agrícolas, en consecuencia, estas tierras son destinadas al cultivo de cafetales y ciertas áreas de bosque. Las plantas de café ocupan aproximadamente el 64% de la superficie total de la subcuenca. Los tipos de suelos predominantes en esta zona son los Inceptisoles, Alfisoles y Molisoles (Figura 4), indicando que las plantas de café precisan de suelos ligeramente ácidos, además de un clima más húmedo y altitudes elevadas para su crecimiento.

Por el contrario, los principales usos de las zonas más bajas de la cuenca, en donde los tipos de suelo predominantes son los Molisoles y Alfisoles, son principalmente los cultivos anuales de grano básico (28%), principalmente maíz, frijol y maicillo, junto con otras mezclas de cultivos y pastos (4%).

El resto del territorio está ocupado por áreas urbanas, cuerpos de agua, pastos naturales y bosques mixtos.



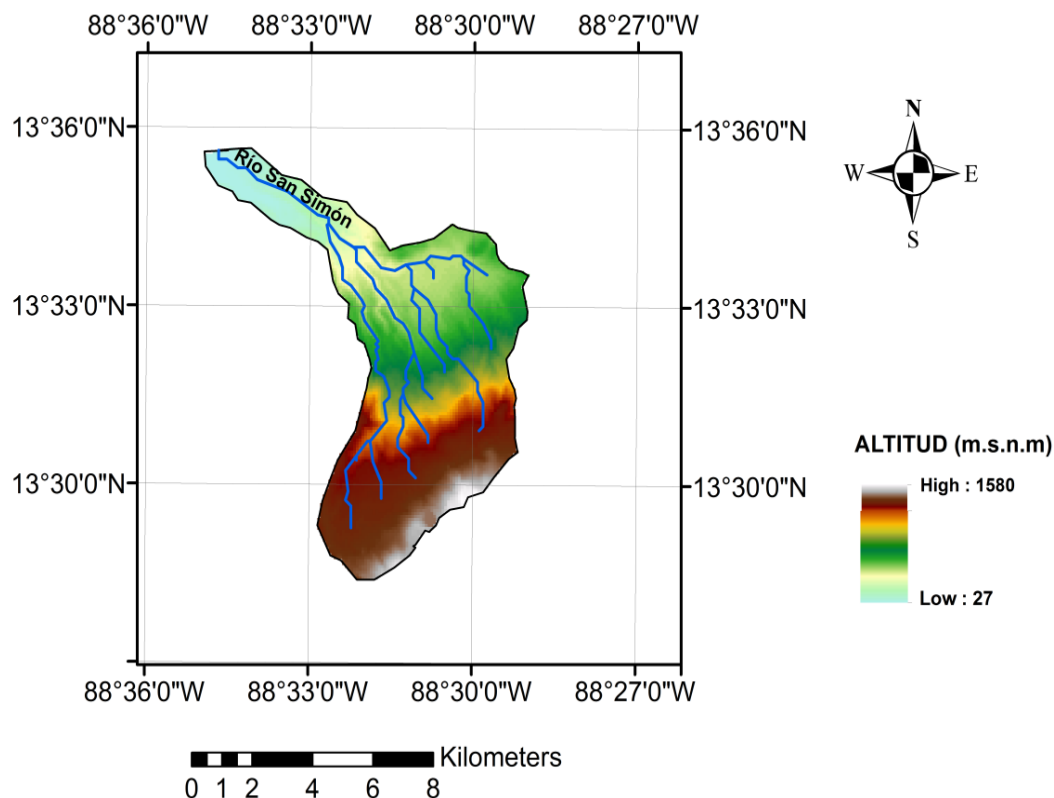
**Figura 6.** Pendientes de los suelos de la subcuenca del río San Simón.



### ***Recursos Hídricos***

El río principal de la subcuenca en estudio, el río San Simón, o también denominado Santa Anita, se extiende de este a oeste a lo largo del municipio de Mercedes Umaña, ocupando una extensión aproximada de 10 km. Este río, junto con el resto de arroyos de la subcuenta, originados en las elevaciones de los municipios de Berlín y Alegría, vierte sus aguas a la zona baja del río Lempa (Figura 7).

La presencia del volcán Tecapa en el municipio de Alegría, propicia el carácter volcánico que muestran algunos tipos de suelos presentes en la zona, especialmente aquellos que se sitúan en la parte más alta de la subcuenca. Las características volcánicas, confieren a los suelos propiedades físicas óptimas para la infiltración de agua en cantidades abundantes, dando lugar a los cuerpos de agua subterráneos, es decir, los acuíferos, los cuales pueden ser utilizados para el abastecimiento de agua potable. Es por ello, que la etapa de reinyección de los fluidos geotérmicos procedentes de las centrales geotérmicas, ha de ser controlada a fin de evitar la contaminación de estos mantos acuíferos. Según López (2005), la mayor abundancia de agua freática se sitúa a la altura del caserío Santa Anita, en Mercedes Umaña. Las aguas subterráneas, unidas a las fuentes de aguas superficiales en las inmediaciones del río San Simón, constituyen la mayor riqueza hídrica de la subcuenca.



**Figura 7.** Red Hídrica de la subcuenca del río San Simón.

#### **4. DESCRIPCIÓN DE LAS METODOLOGÍAS SELECCIONADAS PARA DESARROLLAR EL DIAGNÓSTICO**

La metodología seleccionada debe ayudarnos a detectar e identificar las variables que están presionando sobre el medio ambiente, y, en este caso, sobre los recursos hídricos. Para desarrollar el Diagnóstico de la subcuenca del río San Simón se han aplicado y utilizado distintas metodologías:

##### **4.1. Taller de Diagnóstico Rural Participativo (DRP)**

La finalidad del Taller de DRP era la detección de problemas y necesidades a los que se enfrentan las administraciones públicas a la hora de gestionar y planificar los recursos hídricos y, por otra parte, los miembros de las Comunidades locales. Estos últimos como usuarios directos de este recurso.

Como parte de este taller, se repartieron dos tipos de Cuestionarios (y Fichas técnicas) para la recogida de información, uno dirigido a los gestores y otro a los integrantes de las Comunidades. Los resultados más relevantes,

obtenidos a partir del tratamiento de estos datos, se expondrán más adelante.

#### **4.2. Evaluación de la calidad química y biológica de las aguas superficiales y subterráneas**

Mediante el establecimiento de una red de control o monitoreo. Para realizar el Diagnóstico de la calidad de las aguas, se recogieron y analizaron hasta un total de 10 muestras de agua correspondientes a distintos puntos de control (aguas superficiales, subterráneas, vertidos y muestras recogidas en sistemas de abastecimiento). El objetivo era establecer el grado de calidad de las aguas de la subcuenca del río San Simón, así como detectar posibles fuentes de contaminación.

### **5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN RECOGIDA EN EL TALLER**

#### **5.1. Gestión de los recursos hídricos: problemáticas y expectativas**

Entre los participantes del taller de DRP, seis personas conformaban el grupo de expertos en gestión de recursos hídricos, de los cuales cinco (el 83%) pertenecían a diferentes administraciones públicas (ANDA, Alcaldías Municipales de Alegría y Berlín y Medio Ambiente) y el sexto representaba a una ADESCO (Asociación de Desarrollo Comunitaria).

El Cuestionario se dividía en dos grandes bloques. El primero de ellos hacía referencia a las principales **problemáticas** a afrontar durante la gestión hídrica. El segundo bloque, por su parte, agrupaba las **expectativas** puestas en el plan de manejo de los recursos hídricos de la subcuenca del río San Simón. En definitiva, el objetivo de este Cuestionario era identificar los problemas y necesidades presentes en la gestión y planificación de los recursos hídricos, así como detectar los futuros usos y utilidades que pueda presentar un plan de manejo hídrico en la mejora de la gestión de este recurso.

Entre los principales problemas, al menos el **50%** de los entrevistados destaca tener problemas para gestionar de manera eficiente los recursos hídricos. Las principales razones serían:

1- La falta de medios o instrumentos necesarios para llevar a cabo una correcta gestión y planificación de los recursos hídricos.

2- La capacidad institucional para la investigación y formación científica en el área de conocimiento de la hidrología es insuficiente. La falta de conocimiento y formación impiden gestionar los recursos hídricos de una manera eficiente.

Además, la escasez de agua (cantidad) y el deterioro de la calidad de ésta son dos de los problemas más acuciantes a los que tienen que enfrentarse dichos gestores:

3- Existe una alteración de la producción agrícola y riesgo para la seguridad alimentaria, pérdida de cultivos, por escasez de agua.

4- Existe un deterioro y agotamiento de fuentes de agua seguras en calidad y cantidad.

Por su parte, el **33%** de los entrevistados destacan otros problemas a los que tiene que enfrentarse:

1- Problemas administrativos y legislativos:

1.1. Existen obstáculos frecuentes para una coordinación eficaz entre las administraciones a cargo del agua y el gobierno central.

1.2. La evaluación de la gobernanza del agua en mi territorio resulta insuficiente.

1.3. Los programas gubernamentales de protección y rehabilitación de los ecosistemas hídricos son insuficientes.

1.4. El cambio climático ha generado una evolución de la gobernanza del agua en su país (nuevos actores, adopción de indicadores de desempeño, nueva distribución de responsabilidades) y, por tanto, incapacidad para asumir dichas responsabilidades.

2- Falta de capacitación o formación:

2.1. Brechas en la capacidad de planificación y gestión de recursos, aun disponiendo de instrumentos útiles.

Entre las **expectativas** que genera la realización e instauración de un plan de manejo de recursos hídricos, más del **50%** de los entrevistados espera obtener de él:

- 1- Resultados que le permitan evaluar las políticas de agua existentes y que le ayuden a predecir mejor la gestión de los recursos hídricos considerando los efectos del cambio climático.
- 2- Una mejora del conocimiento del estado y evolución de los recursos hídricos, lo cual les permitiría generar información oportuna y accesible para la toma de decisiones.
- 3- Una mejora del conocimiento de la calidad de los recursos hídricos para la protección de la salud de la población y de los ecosistemas naturales.
- 4- La obtención de una herramienta que les permita manejar los recursos hídricos de manera fácil e integradora.

Esta información debe ser utilizada como base para el desarrollo del plan de manejo o la instauración de medidas de intervención en la subcuenca del río San Simón.

## **5.2. Caracterización de la problemática de las Comunidades locales en el uso de los recursos hídricos**

Los miembros de la Comunidades locales que tomaron parte en el taller de DRP fueron agrupados en ocho grupos. Cada grupo estaba formado por un número variable de personas (de 2 a 4), todas ellas integrantes de un mismo cantón. Por tanto, cada grupo representaba a un cantón: Los Talpetates, Potrerillos, El Zapotillo, San Lorenzo, El Zapote, El Corozal, La Montañita y San Felipe.

A cada grupo se le distribuyeron dos fichas técnicas o matrices de evaluación del recurso agua, las cuales tenían que ser rellenas de manera conjunta entre todos los miembros del grupo, siempre con el asesoramiento y la supervisión del equipo facilitador (miembros de la UPV/EHU, REDES y SI). La primera ficha técnica hace referencia a la cantidad y calidad del agua que se extrae para consumo doméstico, con fines ganaderos y con fines agrícolas;

mientras que la segunda ficha recoge información sobre la cantidad y calidad de los vertidos generados en las anteriores actividades.

Los resultados obtenidos muestran que el 42% de los encuestados (cantones Potrerillos, El Zapotillo, San Lorenzo, El Corozal y La Montañita) extraen agua de río para el consumo doméstico, un 25% emplea agua de lluvia (San Lorenzo, El Zapote y San Felipe), un 17% (Los Talpetates y El Corozal) agua de pozos, un 8% agua de chorro (Los Talpetates) y otro 8% compra garrafas de agua (San Lorenzo). Aunque la mayoría de los cantones combinen diversas fuentes de abastecimiento, es preocupante observar que el 38% de los cantones encuestados (Potrerillo, El Zapotillo y La Montañita) se abastece exclusivamente de agua de río. El consumo medio diario para una familia de cuatro personas es de unas 30 cantaradas, el equivalente a 90 litros diarios por persona.

En cuanto a la cantidad y calidad del agua de consumo, todos los entrevistados coinciden en que la cantidad disponible es insuficiente para cubrir sus necesidades anuales, habiendo escasez especialmente en el verano (de noviembre a abril). Por su parte, todos afirman que la calidad del agua de consumo es mala. En relación con esto, la mayoría de los encuestados han remarcado que existe un deterioro de las aguas de pozos y ríos por contaminación con productos agroquímicos (glifosato), metales pesados y/o patógenos (contaminación fecal), lo que ha llevado en los últimos años a un incremento del número de pacientes con problemas de insuficiencia renal y gastrointestinal.

En cuanto al origen del agua de riego, un 37% (cantones Potrerillos, El Zapotillo y La Montañita) emplea agua de ríos y arroyos para este fin; sin embargo, la cantidad de agua para este fin es insuficiente. El restante 63% no riega sus cultivos por falta de agua.

Por último, el 71% de los encuestados (Los Talpetates, Potrerillos, El Zapotillo, El Corozal y La Montañita) alega no disponer de suficiente cantidad de agua para el abastecimiento de su ganado frente a un 29% que sí. De acuerdo con la información aportada, el consumo de agua diaria por cabeza de ganado vacuno (res) sería de 2 a 3 cantaradas, lo que equivale a 24 a 36 litros diarios.

En cuanto a los vertidos generados, los domésticos suelen ser vertidos de carácter puntual y son almacenados en fosas sépticas o se vierten directamente al cauce del río. Este hecho genera problemas de olores y contaminación fecal de las aguas superficiales y subterráneas. Los vertidos de origen ganadero suelen ser difusos y afectan especialmente a los manantiales o cursos de agua, especialmente cuando el ganado abreva en estos puntos.

## **6. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD QUÍMICA Y BIOLÓGICA DE LAS AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS**

Para la evaluación de la calidad de las aguas de la subcuenca del río San Simón se estableció una red de control de aguas superficiales y subterráneas, donde se recogieron una serie de muestras que posteriormente fueron trasladadas a los distintos laboratorios para su análisis. El objetivo era detectar posibles fuentes de contaminación química y biológica de las aguas.

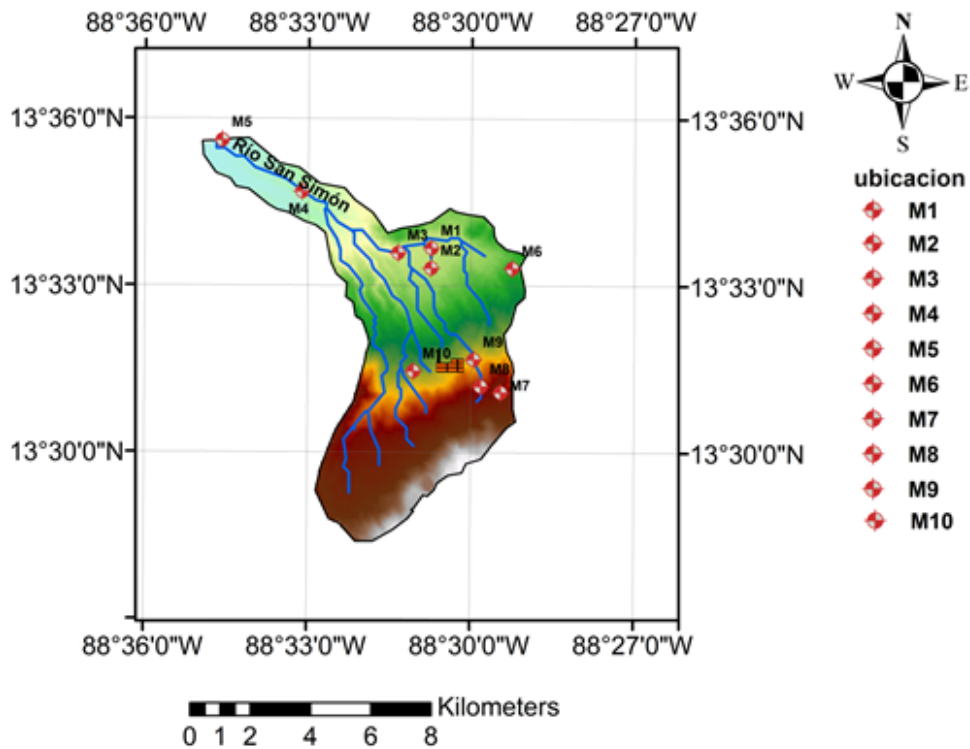
### **6.1. Red de control de aguas superficiales y subterráneas**

La red de control comprende un total de 10 puntos de control (Tabla 1 y Figura 8), de los cuales tres puntos de control se encuentran en el río San Simón, uno en la quebrada La Montañita, dos puntos pertenecen a pozos (Santa Anita 1 y Pozo El Saltillo-ANDA), otros dos son manantiales (Nacimientos de El Lenguar y río Guallinac), un punto en el Sistema Múltiple de Berlín y el último corresponde a un vertido superficial de origen desconocido en el municipio de Alegría. El muestreo se realizó entre los días 30 y 31 de agosto de 2017. El tipo de punto de control y sus coordenadas geográficas están recogidos en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Identificación (ID), tipo y localización (municipio y coordenadas geográficas) de los diez puntos de control muestreados. Más información sobre los puntos de muestreo en:

<https://kc.kobotoolbox.org/diegodiaz/forms/ayaqmgG6BETatuVg6rzhbq/map>

ID	Tipo	Municipio	Longitud (m)	Latitud (m)	Altitud (m)
M1	Río San Simón (cabecera)	M. Umaña	-88.51215	13.56116	289
M2	Pozo Santa Anita 1 (Anda)	M. Umaña	-88.51225	13.5552	300
M3	Sistema Múltiple de Berlín	M. Umaña	-88.52238	13.55976	278
M4	Río San Simón (Los Horcones)	M. Umaña	-88.55189	13.57813	112
M5	Río San Simón (desembocadura)	M. Umaña	-88.57644	13.59349	113
M6	Pozo El Saltillo (Anda)	M. Umaña	-88.48739	13.55508	410
M7	Manantial (Nacimiento El Lenguar)	Alegría	-88.49081	13.51789	947
M8	Manantial (Nacimiento río Guallinac)	Alegría	-88.49696	13.5197	852
M9	Vertido superficial	Alegría	-88.49912	13.52774	629
M10	Quebrada La Montañita	Alegría	-88.51761	13.52433	569



**Figura 8.** Puntos de control de la red de monitoreo establecida en la subcuenca del río San Simón.



## **6.2. Metodología de campo y laboratorio**

En campo se midieron una serie de parámetros físico-químicos (temperatura, pH, potencial redox (ORP), conductividad eléctrica (CE) y concentración de O<sub>2</sub>). Para la medición de la CE se utilizó un Crison EC-Meter Basic 30+, para el pH y temperatura un Crison Micro pH 2000 y para el potencial redox un Hach ORP/Redox sonda MTC101 con electrodo de Ag/AgCl.

Las muestras recogidas se trasladaron al Laboratorio de Fusades (San Salvador), donde se analizaron determinados parámetros biológicos (Coliformes fecales y Demanda Bioquímica de Oxígeno o DBO) y químicos (Demanda Química de Oxígeno (DQO) y aniones (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)), mientras que en el Laboratorio de Ingeniería Química y del Medio Ambiente y en los Servicios Generales de Investigación (SGIker), ambos pertenecientes a la UPV/EHU, se analizaron los cationes (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> y Si<sup>4+</sup>) y metales pesados (As, Hg, Li, B, Zn, Cr, Ni, Cu y Pb), respectivamente.

Siguiendo la normativa establecida por el "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2012)" se realizaron los análisis anteriormente descritos en el Laboratorio de Fusades. En cuanto a la analítica realizada en la UPV/EHU, los cationes se midieron utilizando un espectrómetro óptico o ICP-OES (Perkin Elmer Optima 2000), mientras que para los metales pesados se utilizó un espectrómetro de masas o ICP-MS (AGILENT 7700x), lo cual ha permitido bajar los niveles de detección de metales a µg L<sup>-1</sup>.

## **6.3. Características físico-químicas de las aguas de la subcuenca del río San Simón**

Primeramente, las características físico-químicas de las muestras de aguas recogidas se basan únicamente en los resultados obtenidos en una única campaña de muestreo (30-31 de agosto de 2017), lo cual obliga a interpretar los datos con cierta precaución. Debido a que dicha campaña se realizó en época de lluvias (verano), donde los procesos de dilución por lo general suelen ser dominantes, se recomienda encarecidamente la realización de al menos otra campaña de muestreo en época de estiaje (invierno).

El rango de pH oscila entre 6.7 (M2) y 9.0 (M5), de aguas ligeramente ácidas a aguas alcalinas. La mínima concentración de O<sub>2</sub>, 3.52 mg L<sup>-1</sup>, se registró en la quebrada La Montañita (M10), mientras que los valores máximos corresponden a las aguas del río San Simón (M4 y M5), con 7.7 mg L<sup>-1</sup>. El rango de CE es relativamente amplio, desde valores por debajo de 300 μS cm<sup>-1</sup> (M6, M7 y M8) hasta máximos de 1009 μS cm<sup>-1</sup> en el vertido superficial (M9). La Tabla 2 recoge todos los parámetros medidos en campo.

**Tabla 2.** Parámetros físico-químicos medidos en campo: pH, temperatura (T, °C), conductividad eléctrica (CE, μS.cm<sup>-1</sup>), oxígeno (O<sub>2</sub>, mg L<sup>-1</sup>) y potencial redox (ORP, mV).

Fecha y hora	ID	pH	T	CE	O <sub>2</sub>	ORP
30-8-17 9:18	<b>M1</b>	7.01	26.1	342	5.32	450
30-8-17 10:01	<b>M2</b>	6.70	28.8	517	4.56	528
30-8-17 10:40	<b>M3</b>	6.74	33.0	651	5.82	505
30-8-17 12:03	<b>M4</b>	8.91	29.0	445	7.77	457
30-8-17 12:40	<b>M5</b>	9.01	30.7	447	7.72	443
30-8-17 13:35	<b>M6</b>	7.38	27.1	270	6.46	220
31-8-17 8:25	<b>M7</b>	7.06	23.1	200	5.75	413
31-8-17 9:40	<b>M8</b>	6.85	25.5	293	6.61	427
31-8-17 10:48	<b>M9</b>	7.99	26.4	1009	7.57	395
31-8-17 12:05	<b>M10</b>	7.62	27.3	549	3.52	387

En cuanto a los resultados analíticos obtenidos en el laboratorio, las Tablas 3 y 4 recogen los parámetros analizados en cada punto, así como los valores máximos permitidos por la Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO 13.07.01:08) y los valores de referencia establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para el consumo humano.

En relación con la **calidad biológica** del agua, el número de coliformes fecales supera el valor máximo permitido (>1.1 NMP 100 mL<sup>-1</sup>) en todas las muestras donde se ha analizado este parámetro, excepto en M2 y M3 (< 1.8 NMP 100 mL<sup>-1</sup>). En el pozo El Saltillo (M6) no se realizó el análisis bacteriológico por tratarse de un agua clorada. Es extremadamente elevado el número de coliformes fecales (2200 NMP 100 mL<sup>-1</sup>) en la quebrada La Montañita (M10), lo que indicaría una importante afección por aguas residuales. El ratio entre DBO<sub>5</sub> y DQO en este punto es de 0.64, valor superior a 0.4, lo que indicaría presencia de materia orgánica muy biodegradable; por

otro lado, el ratio estaría dentro de los valores habituales correspondientes a un vertido de agua residual urbana, indicativo de una importante contaminación fecal (Metcalf y Eddy, 2003). El río San Simón, en su totalidad (M1, M4 y M5), también presenta una importante carga bacteriológica (Tabla 3). Entre los puntos de control con contaminación fecal, las menores concentraciones estarían en los manantiales de El Lenguar (M7) y río Guallinac (M8). Estos puntos son los más alejados de los núcleos urbanos, por lo que la contaminación bacteriológica se debe principalmente a la presencia de ganado en la zona.

Por consiguiente, a modo de conclusión, decir que la falta de gestión de las aguas residuales en los núcleos urbanos y el acceso del ganado a los manantiales en las zonas rurales, estarían entre los principales problemas de contaminación bacteriológica de las aguas en esta subcuenca.

En cuanto a la **calidad química**, las aguas con mayor concentración de cloruro y calcio, con valores de  $251.67 \text{ mg L}^{-1}$  ( $7.09 \text{ meq L}^{-1}$ ) para  $\text{Cl}^-$  y de  $144.6 \text{ mg L}^{-1}$  de Ca ( $3.6 \text{ meq L}^{-1}$ ) corresponden al vertido superficial M9, indicativo de que ambos elementos poseen un mismo origen. En geotermia para la perforación de los pozos (cementación) es habitual inyectar lechada, para lo cual se usan equipos o unidades especiales de alta presión y con recirculadores. En estas mismas unidades se controlan los parámetros de densidad, presión de inyección, volumen inyectado y otros (García y Vásquez, 2013). La lechada es inyectada al interior del pozo a través de tubería de perforación y/o desplazamiento de tapones. Esta lechada suele contener altos contenidos en calcio, de manera que si se vierte al medio puede provocar el incremento de este elemento en los cursos de agua. Esto explicaría los altos contenidos de este elemento encontrados en la muestra M9 (vertido).

Los cloruros aparecen en los fluidos geotérmicos en concentraciones elevadas, del orden de  $6.6 \text{ g L}^{-1}$  (ver Tabla 7). Por lo que su elevada presencia en la muestra M9 (rebasándose el límite máximo de la NSO y de la OMS, Tabla 3), vendría justificada por contaminación de origen geotérmico.

Aunque la concentración de nitratos no exceda del límite máximo permitido ( $50 \text{ mg L}^{-1}$ ) en ningún punto de control, este elemento generalmente suele estar asociado a actividades de origen agrícola o a contaminación por aguas

**Tabla 3.** Parámetros químicos y biológicos analizados: cationes (mg L<sup>-1</sup>), aniones (mg L<sup>-1</sup>), DQO (mg L<sup>-1</sup>), DBO<sub>5</sub> (mg L<sup>-1</sup>) y coliformes fecales (NMP 100 mL<sup>-1</sup>). Los valores en rojo superan los límites permitidos (mg L<sup>-1</sup> o NMP 100 mL<sup>-1</sup>) por la Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO 13.07.01:08) para consumo de agua. OMS: Organización Mundial de la Salud.

ID	Parámetros Químicos										Biológicos	
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SiO <sub>2</sub>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	DQO	DBO <sub>5</sub>	Coliformes fecales
M1	27.23	17.42	12.79	6.22	98.32	10.49	10.49	6.07	0.65	---	<16.84	790
M2	35.79	29.52	24.43	8.54	107.27	13.98	5.79	5.65	0.58	---	<16.84	<1.8
M3	43.28	36.16	36.12	13.41	125.38	14.85	25.74	11.34	0.65	---	<16.84	<1.8
M4	33.23	23.85	23.03	8.48	107.40	12.23	11.35	6.14	0.71	---	<16.84	1400
M5	33.62	23.58	21.33	9.23	104.11	13.11	12.37	5.33	0.73	---	---	790
M6	26.08	11.80	12.58	3.84	105.17	8.74	1.01	23.85	0.19	---	---	---
M7	34.28	11.23	12.66	2.65	83.77	13.98	29.2	26.39	---	---	<16.84	280
M8	31.48	10.20	8.99	4.55	74.19	10.49	18.42	18.98	0.27	---	<16.84	39
M9	144.60	12.23	16.38	9.01	46.97	251.67	8.64	23.73	---	40.37	---	---
M10	55.08	14.95	32.63	14.13	83.06	27.95	33.83	10.95	---	37.54	24.16	2200
<b>Límite máximo (NSO 13.07.01:08)</b>						<b>250</b>	<b>250</b>	<b>50</b>				<b>&lt;1.1</b>
<b>Valor de referencia OMS</b>						<b>250</b>	<b>500</b>	<b>50</b>				<b>0</b>

residuales. En este caso, las mayores concentraciones de nitratos se hallan en aquellos puntos con menor afección fecal y con mayor influencia agrícola (zona de cafetal), nacimientos El Lenguar (M7) y río Guallinac (M8), seguidos por M6 y M9. Por tanto, la presencia de nitratos en estos puntos de control permite identificar dentro de la subcuenca del río San Simón una zona donde el impacto agrícola es mayor.

En relación con esto, las mayores concentraciones de plomo (Pb), níquel (Ni) y zinc (Zn) también se encuentran en M9. En el caso del Pb, éste supera el límite máximo permitido por la NSO, mientras que el Ni se encuentra cercano a dicho límite. Este hecho hace pensar que el origen de estos metales pueda ser los productos agroquímicos. Sin embargo, no se dispone de suficiente información para poder corroborarlo.

Entre los efectos adversos del Pb en el ser humano, según la OMS se puede producir transferencia de plomo a través de la placenta ya desde la duodécima semana de gestación y continuar durante todo el desarrollo. El plomo es una sustancia tóxica general que se acumula en el esqueleto. Los lactantes, los niños de hasta 6 años y las mujeres embarazadas son las personas más vulnerables a sus efectos adversos para la salud (OMS, 2006).

El arsénico (As) y el boro (B) son otros dos metales que aparecen en concentraciones cercanas a los límites máximos establecidos por la NSO (Tabla 4). En ambos casos, las mayores concentraciones han sido medidas en la quebrada La Montañita (M10), seguidas por el Sistema Múltiple de Berlín (M3), el río San Simón (M4 y M5) y el Pozo Santa Anita-1 (M2); mientras que el resto de puntos de control muestran unas concentraciones de As y B inferiores a 2 y 85  $\mu\text{g L}^{-1}$ , respectivamente.

Es destacable la presencia de As en las aguas de la quebrada La Montañita ( $8.79 \mu\text{g L}^{-1}$ ), pero especialmente en el Sistema Múltiple de Berlín ( $6.66 \mu\text{g L}^{-1}$ ), no tanto por la concentración medida, sino porque este sistema abastece agua potable a diez comunidades del municipio de Berlín, a dos de Mercedes Umaña y a una comunidad de Estanzuelas. El principal problema del As es que es bioacumulable en los tejidos, por lo que el consumo reiterado de agua contaminada con As provoca daños en los organismos que se encuentran

expuestos a este elemento, especialmente en el caso del As (III) (Rahman et al., 2012; Herrera et al., 2013). Por consiguiente, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el arsénico se considera una sustancia a la que debe darse una prioridad alta en el análisis sistemático de fuentes de agua de consumo (OMS, 2006). Además, según este organismo, hay pruebas abrumadoras, de estudios epidemiológicos, de que el consumo de cantidades altas de arsénico en el agua potable está relacionado causalmente con el desarrollo de cáncer en varios órganos, en particular la piel, la vejiga y los pulmones.

En el caso del B, vuelve a ser el agua de la quebrada La Montañita la que mayor concentración de este elemento presenta (842.43  $\mu\text{g L}^{-1}$ ), seguida también por el Sistema Múltiple de Berlín (356.54  $\mu\text{g L}^{-1}$ ). De acuerdo con la OMS, las exposiciones tanto breves como prolongadas de animales de laboratorio al ácido bórico o bórax por vía oral han demostrado, invariablemente, su toxicidad para el aparato reproductor masculino.

**Tabla 4.** Concentración de metales pesados ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ). Los valores en rojo superan los límites permitidos ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) por la Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO 13.07.01:08) para consumo de agua, los amarillos se aproximan a ese límite.

ID	As	Hg	Li	B	Zn	Cr	Ni	Cu	Pb
M1	1.73	0.081	2.62	33.62	2.39	0.08	0.29	0.84	1.21
M2	3.73	0.078	16.54	84.02	5.00	0.07	0.22	0.63	1.30
M3	6.66	0.084	22.29	356.54	6.26	0.07	0.15	1.87	0.07
M4	3.99	0.077	11.04	142.77	2.07	0.06	0.18	0.76	0.14
M5	4.50	0.074	9.67	161.56	6.51	0.07	1.22	2.62	0.53
M6	1.22	0.074	2.48	22.34	76.18	0.13	1.05	1.19	1.02
M7	1.39	0.072	4.49	23.11	9.41	0.05	0.37	0.57	0.74
M8	0.69	0.090	5.42	26.11	40.0	0.03	0.11	1.78	0.62
M9	1.80	0.088	6.40	80.53	119.09	2.36	17.52	4.56	7.25
M10	8.79	0.087	14.3	842.43	81.96	0.28	0.73	9.78	4.83
<b>Límite máximo (NSO 13.07.01:08)</b>	<b>10</b>	<b>1</b>		<b>1000</b>	<b>5000</b>	<b>50</b>	<b>20</b>	<b>1000</b>	<b>5</b>
<b>Valor de referencia OMS</b>	<b>10</b>	<b>6</b>		<b>500</b>	<b>5000</b>	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>2000</b>	<b>10</b>

#### 6.4. Comportamiento y origen de los metales pesados, cationes y aniones en las aguas de la subcuenca del río San Simón

Con el objetivo de conocer la relación estadística (positiva o negativa) entre las variables o parámetros físico-químicos medidos en las muestras de agua (Tablas 2, 3 y 4), se ha obtenido la matriz de correlación de Spearman para variables no paramétricas (Tabla 5). Este tipo de estadísticos nos permite conocer que parámetros presentan un mismo origen y/o comportamiento en

**Tabla 5.** Matriz de correlaciones Spearman (test no paramétrico) entre los parámetros físico-químicos analizados. Según las pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk y Kolmogorov-Smirnov, el Cl<sup>-</sup>, B, Zn y Ni no se ajustan a una distribución normal ( $p < 0.05$ ). Los valores marcados en rojo presentan una correlación significativa al nivel 0.01, mientras que los valores en verde al nivel 0.05.

	pH	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SiO <sub>2</sub>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	As	Hg	Li	B	Zn	Cr	Ni	Cu	Pb
pH	1.00	0.11	0.08	-0.13	-0.01	0.17	-0.20	0.09	0.02	-0.06	0.36	0.23	-0.26	-0.16	0.19	0.23	0.32	0.66	0.36	0.06
CE	0.11	1.00	<b>0.83</b>	0.61	<b>0.76</b>	<b>0.88</b>	0.17	<b>0.83</b>	0.18	-0.43	0.34	<b>0.74</b>	0.49	<b>0.74</b>	<b>0.75</b>	0.13	0.56	0.25	0.39	0.41
Ca <sup>2+</sup>	0.08	<b>0.83</b>	1.00	0.33	0.66	0.72	-0.07	<b>0.99</b>	0.45	-0.12	0.25	0.65	0.37	0.66	0.65	0.36	0.43	0.29	0.28	0.50
Mg <sup>2+</sup>	-0.13	0.61	0.33	1.00	<b>0.87</b>	0.69	<b>0.83</b>	0.37	0.10	-0.71	0.35	<b>0.78</b>	-0.06	<b>0.81</b>	0.71	-0.61	0.10	-0.18	-0.13	-0.16
Na <sup>+</sup>	-0.01	<b>0.76</b>	0.66	<b>0.87</b>	1.00	<b>0.88</b>	0.61	0.68	0.43	-0.62	0.29	<b>0.96</b>	0.09	<b>0.92</b>	<b>0.91</b>	-0.26	0.28	-0.02	0.03	0.12
K <sup>+</sup>	0.17	<b>0.88</b>	0.72	0.69	<b>0.88</b>	1.00	0.32	0.71	0.45	-0.63	0.43	<b>0.93</b>	0.33	<b>0.82</b>	<b>0.95</b>	0.03	0.46	0.20	0.38	0.25
SiO <sub>2</sub>	-0.20	0.17	-0.07	<b>0.83</b>	0.61	0.32	1.00	-0.01	0.02	-0.46	0.14	0.50	-0.39	0.56	0.37	-0.65	-0.14	-0.33	-0.42	-0.45
Cl <sup>-</sup>	0.09	<b>0.83</b>	<b>0.99</b>	0.37	0.68	0.71	-0.01	1.00	0.46	-0.15	0.30	0.66	0.30	0.65	0.63	0.32	0.43	0.31	0.18	0.49
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.02	0.18	0.45	0.10	0.43	0.45	0.02	0.46	1.00	-0.12	0.14	0.53	0.13	0.44	0.57	0.15	-0.15	-0.15	0.03	-0.04
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.06	-0.43	-0.12	-0.71	-0.62	-0.63	-0.46	-0.15	-0.12	1.00	-0.46	-0.65	0.03	-0.54	-0.65	0.55	-0.06	0.03	0.11	-0.05
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.36	0.34	0.25	0.35	0.29	0.43	0.14	0.30	0.14	-0.46	1.00	0.48	-0.21	0.29	0.50	-0.72	-0.34	0.11	0.28	-0.49
As	0.23	<b>0.74</b>	0.65	<b>0.78</b>	<b>0.96</b>	<b>0.93</b>	0.50	0.66	0.53	-0.65	0.48	1.00	0.04	<b>0.84</b>	<b>0.96</b>	-0.17	0.33	0.15	0.16	0.11
Hg	-0.26	0.49	0.37	-0.06	0.09	0.33	-0.39	0.30	0.13	0.03	-0.21	0.04	1.00	0.23	0.24	0.31	0.23	-0.24	0.56	0.31
Li	-0.16	<b>0.74</b>	0.66	<b>0.81</b>	<b>0.92</b>	<b>0.82</b>	0.56	0.65	0.44	-0.54	0.29	<b>0.84</b>	0.23	1.00	<b>0.86</b>	-0.25	0.03	-0.25	0.05	-0.05
B	0.19	<b>0.75</b>	0.65	0.71	<b>0.91</b>	<b>0.95</b>	0.37	0.63	0.57	-0.65	0.50	<b>0.96</b>	0.24	<b>0.86</b>	1.00	-0.14	0.27	0.04	0.31	0.09
Zn	0.23	0.13	0.36	-0.61	-0.26	0.03	-0.65	0.32	0.15	0.55	-0.72	-0.17	0.31	-0.25	-0.14	1.00	0.49	0.55	0.48	0.54
Cr	0.32	0.56	0.43	0.10	0.28	0.46	-0.14	0.43	-0.15	-0.06	-0.34	0.33	0.23	0.03	0.27	0.49	1.00	0.73	0.46	0.73
Ni	0.66	0.25	0.29	-0.18	-0.02	0.20	-0.33	0.31	-0.15	0.03	0.11	0.15	-0.24	-0.25	0.04	0.55	0.73	1.00	0.35	0.55
Cu	0.36	0.39	0.28	-0.13	0.03	0.38	-0.42	0.18	0.03	0.11	0.28	0.16	0.56	0.05	0.31	0.48	0.46	0.35	1.00	0.12
Pb	0.06	0.41	0.50	-0.16	0.12	0.25	-0.45	0.49	-0.04	-0.05	-0.49	0.11	0.31	-0.05	0.09	0.54	0.73	0.55	0.12	1.00

las aguas muestreadas, ya que se considera que dos variables cuantitativas están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de la otra.

Existen altas correlaciones positivas (Tabla 5) entre algunos elementos de **origen litogénico**, como son el  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , con el  $\text{Cl}^-$ , As, Li y B; indicativo de que estos elementos tienen un comportamiento y origen común en las aguas de esta subcuenca. A su vez, aquellos puntos con mayor concentración de estos elementos presentan también valores más elevados de conductividad eléctrica (CE), especialmente en el caso de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , As, B y Li (Figura 9). La buena relación entre la CE y los cationes ( $R^2 > 0.82$ , Figura 1A), el  $\text{Cl}^-$  ( $R^2 = 0.76$ ) y algunos metales ( $R^2 = 0.78$ , Figura 1B) permitiría predecir las concentraciones de estos elementos, especialmente de aquellos con mayor riesgo toxicológico (As y B), a partir de la toma de medidas de conductividad eléctrica en los puntos considerados en esta red de control (Figura 8). Para ello se utilizarían las ecuaciones recogidas en la Tabla 6. Para el cálculo de estas ecuaciones, exceptuando las del  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , no se han incluido los valores del punto de control M9 (vertido superficial).

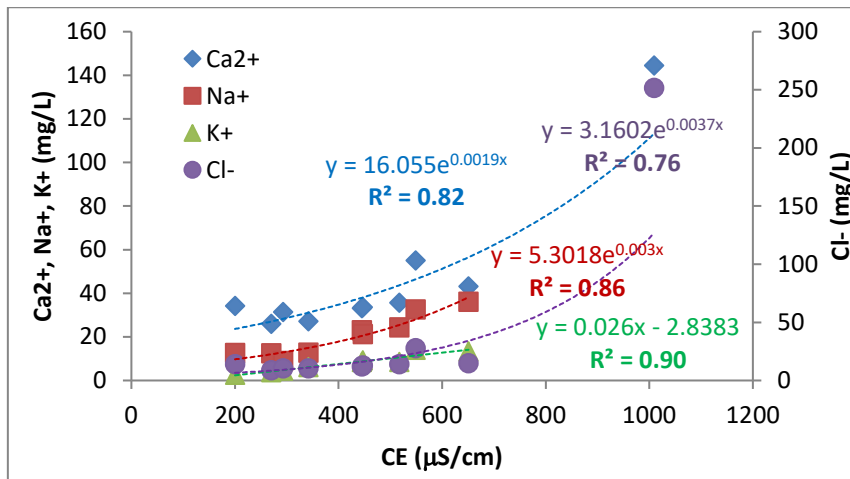
A partir de estas ecuaciones se ha elaborado una herramienta de manejo de la calidad de las aguas de esta subcuenca (ver hoja de cálculo adjuntada a este documento). Al introducir el valor de la CE medida en campo (únicamente de los puntos de control considerados en esta red de control) se podrá obtener una medida orientativa de la concentración de los elementos químicos recogidos en la Tabla 6. Se dice que es un valor orientativo porque únicamente se han considerado los datos químicos de una campaña de monitoreo para la elaboración de estas ecuaciones (Tabla 6). Es por ello por lo que se recomienda la realización de al menos otra campaña de muestreo en época de estiaje, lo que permitiría elaborar ecuaciones estadísticamente más robustas (mayor número de datos, N).



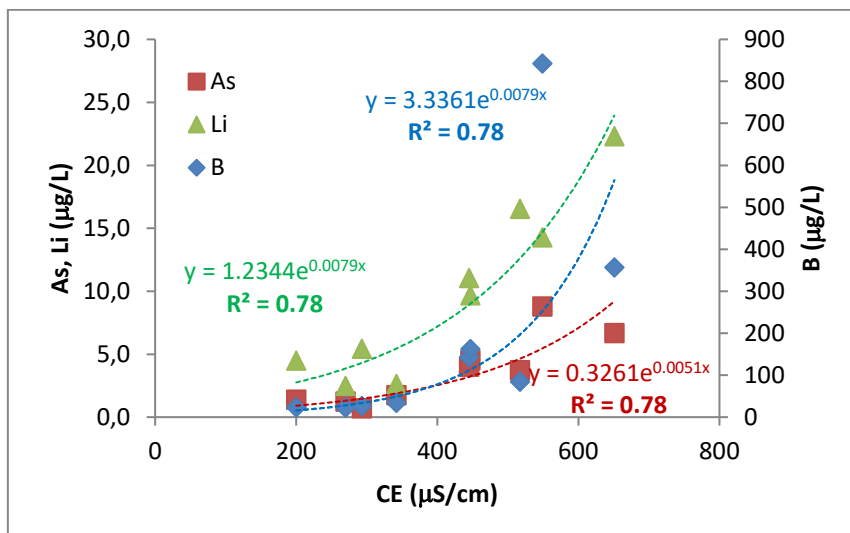
**Tabla 6.** Ecuaciones de regresión entre aquellos elementos químicos que presentan un buen coeficiente de regresión ( $R^2$ ) con la conductividad eléctrica (CE). N es el número de datos considerados.

Parámetro	Ecuación de regresión	$R^2$	N
$\text{Ca}^{2+}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	$\text{Ca}^{2+} = 16.055e^{0.0019\text{CE}}$	0.82	10
$\text{Na}^+$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	$\text{Na}^+ = 5.3018e^{0.003\text{CE}}$	0.86	9
$\text{K}^+$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	$\text{K}^+ = 0.026 \text{ CE} - 2.8383$	0.90	9
$\text{Cl}^-$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	$\text{Cl}^- = 3.1602e^{0.0037\text{CE}}$	0.76	10
As ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	$\text{As} = 0.3261e^{0.0051\text{CE}}$	0.78	9
Li ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	$\text{Li} = 1.2344e^{0.0079\text{CE}}$	0.78	9
B ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	$\text{B} = 3.3361e^{0.0079\text{CE}}$	0.78	9

A)



B)



**Figura 9.** Relación entre **A)** la conductividad eléctrica (CE,  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) y cationes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) y  $\text{Cl}^-$ ; **B)** la CE y metales (As, Li y B).

Existe un gradiente espacial de mayor a menor concentración de As, B, Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup> (Tablas 3 y 4) en los siguientes puntos de control:

M10 > M3 > M4-M5 > M2 > resto de puntos de control

Este hecho indicaría que la quebrada La Montañita (M10) es el punto con mayor concentración de estos elementos químicos, seguido por el Sistema Múltiple de Berlín (M3), el río San Simón (M4 y M5), el pozo Santa Anita 1 (M2) y, por último, el resto de puntos de control.

En el caso del Li este gradiente se modifica ligeramente:

M3 > M2 > M10 > M4-M5 > resto de puntos de control

En cualquier caso, tanto el Li como el As, B, Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup> son mayoritarios en los puntos de control localizados al Oeste de la central geotérmica de Berlín (LaGeo), donde el punto M10 es el más próximo a dicha central. La mayor presencia de estos elementos en dicho sector sugiere la existencia de un flujo de contaminantes de origen geotérmico desde la quebrada La Montañita (M10, mayor concentración) al río San Simón (M4 y M5), pasando por el Sistema Múltiple de Berlín (M3) y afectando también al pozo Santa Anita-1 (M2).

Las aguas de proceso de esta central geotérmica presentan importantes concentraciones de estos y otros elementos, tal y como se recoge en el informe realizado por LaGeo *“Actualización del Estudio Ambiental de Diagnóstico Ambiental. Central Geotérmica Berlín”*. A continuación, en la Tabla 7, se resume la información físico-química recogida en este informe para la campaña de muestreo realizada en marzo de 2010 y analizada por el laboratorio geoquímico de LaGeo.

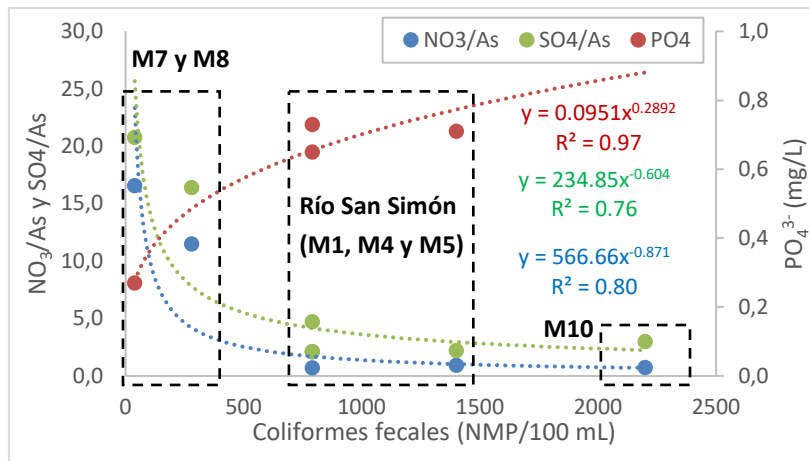
**Tabla 7.** Características químicas de las aguas de proceso de la Central Geotérmica Berlín (LaGeo). Información obtenida de: *“Actualización del Estudio Ambiental de Diagnóstico Ambiental”*. Central Geotérmica Berlín.

AGUAS DE PROCESO								
	CE ( $\mu$ S/cm)	B (mg/L)	As (mg/L)	Li (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)
TR-11 ST	22970	128.2	10.99	14.05	3666	723.1	101.7	6706
TR-1's	23390	128.7	10.38	14.41	3590	741.5	104.6	6689
TR-19's	22100	127.2	9.53	13.08	3118	623.9	142.5	6050

Los elevados valores de CE, junto con las altas concentraciones ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de B, As, Li,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  y, en menor medida, de  $\text{Ca}^{2+}$  en las aguas de proceso generadas por la central geotérmica, afianza la idea de que estos elementos, presentes en mayor concentración en los puntos de control situados en el sector occidental de la central, proceden de la actividad geotérmica.

Por otra parte, la correlación negativa ( $r > -0.62$ , Tabla 5) entre algunos de estos elementos (As, B,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) y el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) descarta el origen agrícola de estos. Las mayores concentraciones de nitratos, como se ha comentado en el apartado anterior, se localizan en los puntos de control situados al Este de LaGeo (M6, M7, M8 y M9).

Para discernir el posible origen de los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) y sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ): aguas residuales, origen agrícola o geotérmico; se ha representado en la Figura 10 los ratios  $\text{NO}_3^-/\text{As}$  y  $\text{SO}_4^{2-}/\text{As}$  y la concentración de fosfatos frente al contenido de coliformes fecales. Sabiendo que el As en las aguas de esta subcuenca es de origen geotérmico, aquellos puntos de control que presenten mayores ratios  $\text{NO}_3^-/\text{As}$  presentan una mayor influencia agrícola y una menor afección de origen geotérmico, como es el caso de M8 (Guallinac) y M7 (El Lenguar). En estos dos puntos (M7 y M8) también presentan los mayores ratios  $\text{SO}_4^{2-}/\text{As}$  y las menores concentraciones de fosfatos. El paralelismo entre los ratios  $\text{NO}_3^-/\text{As}$  y  $\text{SO}_4^{2-}/\text{As}$  (Figura 10) hace pensar que ambos elementos ( $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ) tienen un mismo origen, el agrícola. Por su parte, el aumento de la concentración de fosfatos junto al incremento de bacterias fecales es indicativo de que el fosfato procede de las aguas residuales. La quebrada La Montañita (M10), además de presentar un impacto de origen geotérmico está también afectada por vertidos residuales.



**Figura 10.** Relación entre la concentración de fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) y los ratios  $\text{NO}_3^-/\text{As}$  y  $\text{SO}_4^{2-}/\text{As}$  con el contenido de coliformes fecales en las aguas muestreadas.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El río San Simón, río principal de la subcuenca de estudio, ha sido objeto de interés en el presente trabajo con el fin de realizar un Diagnóstico del estado de los recursos hídricos. Mediante la realización de este Diagnóstico, se pretende identificar algunos de los principales problemas medioambientales a los que debe hacer frente la población de los municipios de Alegría, Berlín y Mercedes Umaña, determinando el estado de los recursos hídricos disponibles y la calidad de los mismos.

Para el desarrollo de este estudio, en primer lugar, se ha llevado a cabo una descripción de los principales componentes biofísicos del territorio; es decir, tipos de suelo, sus potenciales usos en base a su clasificación agrológica, uso actual de los mismos y principales características de la red hídrica. Entre las principales conclusiones obtenidas estarían:

- Los suelos que representan una mayor área de ocupación son los incluidos en las clases agrológicas VII (1,780 Ha), localizados en la parte media-alta, y IV (1,912 Ha), en la parte inferior de la subcuenca. Por el contrario, los agrupados en las clases II (235 Ha) y III (259 Ha), se extienden principalmente sobre la zona con menor relieve y ocupan la menor superficie.
- Entre los principales usos del suelo (tipos mayoritarios de suelo: Alfisoles, Molisoles, Entisoles e Inceptisoles) destacarían los cafetales

en las zonas más altas de la cuenca, donde se dan las condiciones bioclimáticas y físicas (pendientes) necesarias para el desarrollo óptimo de este cultivo. Además, los ambientes rocosos y susceptibles de erosión, característicos de la parte media-alta, requieren de prácticas intensivas de conservación y, en consecuencia, los suelos de esta zona están dedicados a fines forestales. Por el contrario, en la zona media-baja, son los cultivos anuales de grano básico (maíz y frijol) los predominantes.

En segundo lugar, del estudio y tratamiento de los datos de calidad química y biológica de las aguas superficiales y subterráneas de la subcuenca del río San Simón, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- La contaminación fecal (coliformes fecales) es un problema generalizado en toda la cuenca, ya que todas las muestras analizadas (exceptuando dos, M2 y M3) presentan valores por encima de lo permitido tanto por la legislación salvadoreña (NSO 13.07.01:08) como por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Por consiguiente, la falta de gestión de las aguas residuales en los núcleos urbanos y el acceso del ganado a los manantiales en las zonas rurales, estarían entre los principales problemas de contaminación bacteriológica de las aguas de esta subcuenca.
- Las mayores concentraciones de nitratos se encuentran en aquellos puntos con menor afección fecal y con mayor influencia agrícola (zona de cafetal). Por tanto, la presencia de nitratos en estos puntos de control permite identificar dentro de la subcuenca del río San Simón una zona donde el impacto agrícola es mayor (puntos de control más al Este de la cuenca: M6, M7, M8 y M9). En relación con esto, las mayores concentraciones de plomo (Pb), níquel (Ni) y zinc (Zn) también se encuentran en este sector, donde se llega a superar el límite máximo permitido por la NSO para el Pb o rozando este límite como en el caso del Ni. Este hecho hace pensar que el origen de estos metales pueda ser los productos agroquímicos. Sin embargo, no se dispone de suficiente información para poder corroborarlo.
- Los puntos de control localizados más al Oeste de la cuenca (M2, M3, M4, M5 y M10) presentan otro tipo de características químicas. Las

aguas de estos puntos de control presentan mayores concentraciones de arsénico (As), litio (Li), boro (B) y cloruros (Cl<sup>-</sup>) que, a su vez, se correlacionan estrechamente con otros elementos de origen litológico, como son el Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> y Mg<sup>2+</sup>. La existencia de un gradiente de concentración (de mayor a menor concentración): M10 > M3 > M4-M5 > M2 > resto de puntos de control, indica que la fuente de contaminación de As, Li y B, especialmente, se encuentra próxima a la quebrada La Montañita (M10). Por consiguiente, teniendo en cuenta las altas concentraciones de estos elementos presentes en las aguas de proceso durante la actividad geotérmica de LaGeo, la mayor presencia de estos elementos en dicho sector sugiere la existencia de un flujo de contaminantes de origen geotérmico desde la quebrada La Montañita (M10) hasta el río San Simón (M4 y M5), afectando también al Sistema Múltiple de Berlín (M3) y al pozo Santa Anita-1 (M2).

- La buena relación entre estos elementos (As, Li, B y Cl<sup>-</sup>) con la conductividad eléctrica (CE) ha permitido desarrollar una herramienta de manejo de la calidad de las aguas de esta subcuenca (ver hoja de cálculo adjuntada a este documento) a partir de las ecuaciones de regresión entre estos elementos y la CE. Esto permitirá conocer en campañas de muestreo sucesivas la concentración de As, Li, B, Cl<sup>-</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> y Ca<sup>2+</sup> a partir, únicamente, de la medición de la conductividad eléctrica en las aguas de los puntos considerados en esta red de control.
- Sin embargo, los valores de concentración de estos elementos, obtenidos a partir de esta herramienta de manejo, deben considerarse como orientativos. Las ecuaciones empleadas para la elaboración de esta herramienta están únicamente basadas en los datos químicos obtenidos a partir de una única campaña de muestreo.

### **Recomendaciones:**

Tras la **identificación** (localización de los focos de contaminación) y **evaluación** (cuantificación) de la contaminación. Se recomienda como siguiente paso el **control** (seguimiento) de las fuentes de contaminación a lo largo del tiempo. Para ello, el diseño de la red presenta dos aspectos a considerar:

- Por un lado, el propio sistema físico (¿**dónde** muestrear?), es decir, la situación espacial de los puntos de control que van a conformar la red, de manera que las observaciones sean representativas del problema objeto de estudio.

En el caso de la subcuenca del río San Simón, la red de control se divide en dos zonas (zona Este y zona Oeste) en función del tipo de contaminación que se quiera controlar. Los puntos de control de la zona Este (M6, M7, M8 y M9) estarían afectados por la actividad agrícola, mientras que los puntos de control de la zona Oeste (M2, M3, M4, M5 y M10) muestran una afección de origen geoquímico. Por su parte, si la contaminación fecal es el objeto de estudio, todos los puntos de control de esta red deberían ser muestreados, a excepción de aquellos cuyas aguas están tratadas (cloración) para consumo humano.

- Por otro lado, está el procedimiento (¿**cuándo?**, ¿**cómo?**, ¿**qué** muestrear?), es decir, lo relativo a la frecuencia de muestreo, al método con el que se va a muestrear, a las variables objeto de interés específico, y a los métodos de campo o laboratorio.

En el caso de cuándo muestrear, se recomienda encarecidamente la realización de al menos otra campaña de muestreo en época de estiaje (invierno), debido a que los datos físico-químicos incluidos en este informe corresponden a una única campaña de muestreo, realizada en época de lluvias (verano), donde los procesos de dilución por lo general suelen ser dominantes. En cualquier caso, es esencial ir evaluando los datos de calidad de aguas a medida que van siendo analizados, ya que esa evaluación puede aportar criterios que lleven a la modificación y optimización de la red de control existente (p. ej., a partir del análisis de los datos químicos obtenidos en las campañas de verano e invierno se podría considerar necesario incrementar o disminuir la frecuencia de muestreo, es decir, aumentar la frecuencia a tres campañas anuales o reducirla a una única campaña).

En cuanto a los aspectos relativos a los protocolos de preservación de muestras y a los protocolos analíticos (¿cómo muestrear?) debe ser un

laboratorio acreditado para tal fin el que realice los análisis pertinentes. Se recomienda la utilización de un espectrómetro de masas o ICP-MS para el análisis de metales pesados (As, Hg, Li, B, Zn, Cr, Ni, Cu y Pb), lo cual permitirá detectar concentraciones en  $\mu\text{g.L}^{-1}$ , acorde con los límites máximos establecidos por la Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO 13.07.01:08) y por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Por último, estaría la consideración de las variables a analizar (¿qué analizar?), las cuales dependerán del tipo de contaminación presente en la zona de estudio. En el caso de la subcuenca del río San Simón, tal y como se ha comentado anteriormente, existen principalmente tres focos de contaminación: contaminación fecal, de origen agrícola y de actividad geotérmica. Para detectar la **contaminación de origen fecal**, se debe detectar la presencia de coliformes fecales, si su presencia supera el límite establecido por la legislación salvadoreña (NSO 13.07.01:08) o por la Organización Mundial de la Salud (OMS) no se consideraría agua apta para consumo humano. En el caso de la **contaminación de origen agrícola**, los agroquímicos (pesticidas, herbicidas, etc.) junto con la presencia de algunos metales pesados (Pb, Ni, Zn, etc.) estarían entre los principales parámetros a analizar. Por último, la **contaminación de origen geotérmico** tiene una señal química muy específica, asociada a la presencia de metales pesados (As, Li y B) y a altas concentraciones de otros elementos como son: el calcio, potasio, sodio y cloruros. Valores relativamente elevados de conductividad eléctrica en los puntos de control situados más al Oeste de esta subcuenca reflejarían una afección de origen geotérmico. Es por ello, que se recomienda medir la conductividad eléctrica en campo como indicador de esta contaminación. Si la medida de conductividad eléctrica supera los  $400 \mu\text{S/cm}$  se recomienda coger una muestra de agua y analizar en ella, al menos, la concentración de arsénico (As) y boro (B).

- Como recomendación última para futuros estudios, se aconseja medir la concentración de As y B en aquellos puntos de control afectados por la actividad geotérmica no sólo en la matriz agua sino también en la matriz sedimento. Está ampliamente documentado (Martínez-Santos et al., 2015 y Unda-Calvo et al., 2017) que los sedimentos de río tienen la



capacidad de acumular metales con el tiempo ("reservorio" dinámico de contaminantes) pero también de liberarlos al medio acuático cuando las condiciones ambientales varían. Por lo general, las concentraciones de metales en sedimentos suelen ser superiores a las medidas en agua. Por lo tanto, un estudio de la distribución, enriquecimiento, acumulación y variación espacio-temporal de la concentración de metales pesados en las matrices agua y sedimento en la subcuenca del río San Simón sería importante para conocer el riesgo asociado a la presencia de estos metales y su posible afección sobre la salud humana y ambiental, información de especial interés para la gestión de los recursos hídricos.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Figuroa Cardoza, R.A. (2008). *Clasificación de Zonas Bioclimáticas de El Salvador, sus Herramientas y Estrategias para Diseño Urbano-Arquitectónico*. Trabajo de grado. El Salvador: Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador.

García Williams, M.A., Vásquez Mejía, D.B. (2013). *Análisis de tratamiento de pérdidas de circulación de fluidos de perforación durante la perforación de los pozos TR-18B, TR-4R y SV-5A*. Diplomado de especialización en geotermia. El Salvador: Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Unidad de Postgrados, Universidad de El Salvador.

Guevara Guevara, J.C., Martínez Morales, D.F., Vásquez Rodríguez, E.S (2011). *La falta de legislación que regule la energía geotérmica como medida de protección del medio ambiente en el Salvador*. Seminario de graduación en ciencias jurídicas. El Salvador: Facultad de jurisprudencia y ciencias sociales, Universidad de El Salvador.

López Hernández, K.F. (2005). *Determinación del grado de contaminación provocado por la geotermia de Berlín en las aguas del Río San Simón, Usulután*. Trabajo de grado. El Salvador: Facultad de química y farmacia, Universidad de El Salvador.

Martínez-Santos, M., Probst, A., García-García, J., Ruiz-Romera, E. (2015). Influence of anthropogenic inputs and a high-magnitude flood event on

metal contamination pattern in surface bottom sediments from the Deba river urban catchment. *Science of the Total Environment*, 514; 10–25.

Metcalf y Eddy (2003) *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4th Edition, McGraw-Hill, New York.

Ministerio de Medio Ambiente y de Recursos Naturales; MARN. (2002). Plan de Ordenamiento y Desarrollo Territorial del Municipio de Alegría

Ministerio de Medio Ambiente y de Recursos Naturales; MARN. (2002). Plan de Ordenamiento y Desarrollo Territorial del Municipio de Berlín.

Proyecto Agua: Acceso, Gestión y Uso Racional del Agua (1999). Diagnóstico rural participativo con enfoque de género en el Departamento de Usulután (El Salvador).

Unda-Calvo, J., Martínez-Santos, M., Ruiz-Romera, E. (2017). Chemical and physiological metal bioaccessibility assessment in surface bottom sediments from the Deba River urban catchment: Harmonization of PBET, TCLP and BCR sequential extraction methods. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 138; 260–270.

#### **Enlaces web de interés:**

Boletín Climatológico Mensual, Anual (Ministerio de Medio Ambiente y de Recursos Naturales; MARN): disponible en <http://www.snet.gob.sv/>

CEPRODE, Centro de Protección para Desastres: disponible en <http://ceprode.org.sv/>

LWR, Lutheran World Relief: disponible en <https://lwr.org/>

MARN, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales: disponible en <http://www.marn.gob.sv/>

NSO 13.07.01:08. Norma Salvadoreña Obligatoria de Agua Potable, El Salvador, 12 de Junio de 2009.

OMS, Organización Mundial de la Salud: <http://www.who.int/es/>

