



# DIAGNÓSTICO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS EN LA ZONA DEL BAJO LEMPA. EL SALVADOR

Proyecto WaterClima-LAC – Gestión de zonas costeras

EuropeAid/DCI/ENV/2014/350-470





# DIAGNÓSTICO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS EN LA ZONA DEL BAJO LEMPA

Proyecto WaterClima-LAC – Gestión de zonas costeras

2017

## **Autores principales**

Ester Vilanova

Ona Cornellà

Barcelona, 2017



El presente documento ha sido elaborado por Amphos 21 en el marco del proyecto WaterClima LAC y financiado por el programa EuropeAid de la Comisión Europea. El contenido del mismo es responsabilidad exclusiva de sus autores y en ningún caso debe considerarse que refleja los puntos de vista de la Comisión Europea.

Fotografías: Walter Chacón – CATIE El Salvador

Diseño portada: Squets Disseny (Catalunya)

Agradecimientos: Hugo Pascual, David Negro, Juliana Rossi, Walter Chacón y toda la población del bajo Lempa. La publicación ha contado con la colaboración de los socios del proyecto.



# ÍNDICE

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Proyecto WATERCLIMA-LAC .....               | 5  |
| 2     | LA ZONA DE ESTUDIO.....                     | 7  |
| 3     | USOS DEL SUELO .....                        | 9  |
| 4     | CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS.....             | 10 |
| 5     | LA PRECIPITACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO..... | 11 |
| 5.1   | DATOS DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS.....     | 12 |
| 5.2   | DATOS SATELITALES .....                     | 14 |
| 5.3   | DATOS CLIMÁTICOS FUTUROS .....              | 16 |
| 6     | EL AGUA SUBTERRÁNEA .....                   | 17 |
| 7     | LOS ACUÍFEROS .....                         | 18 |
| 8     | ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO.....                 | 20 |
| 8.1   | CARACTERIZACIÓN IN-SITU .....               | 21 |
| 8.2   | CARTOGRAFÍA PIEZOMÉTRICA .....              | 22 |
| 8.3   | INTRUSIÓN SALINA.....                       | 23 |
| 9     | MODELO CONCEPTUAL Y BALANCE HÍDRICO .....   | 25 |
| 9.1   | ENTRADAS DE AGUA .....                      | 25 |
| 9.1.1 | RECARGA POR INFILTRACIÓN DE LLUVIA .....    | 25 |
| 9.1.2 | ENTRADAS LATERALES DE AGUA.....             | 26 |
| 9.1.3 | ENTRADAS DE AGUA DEL MAR.....               | 26 |
| 9.1.4 | ENTRADAS DE AGUA DESDE EL RÍO.....          | 26 |
| 9.1.5 | OTROS.....                                  | 27 |
| 9.2   | SALIDAS DE AGUA .....                       | 27 |
| 9.2.1 | SALIDAS HACIA EL MAR .....                  | 27 |
| 9.2.2 | SALIDAS POR EXTRACCIONES .....              | 27 |

|       |                                 |    |
|-------|---------------------------------|----|
| 9.2.3 | SALIDAS HACÍA EL RÍO .....      | 28 |
| 9.3   | CÁLCULO DEL BALANCE.....        | 28 |
| 10    | PRESIONES Y CONTAMINACIÓN ..... | 31 |
| 10.1  | NITRATOS .....                  | 31 |
| 10.2  | METALES.....                    | 33 |
| 10.3  | PLAGUICIDAS.....                | 36 |
| 11    | RECOMENDACIONES .....           | 40 |
| 12    | BIBLIOGRAFÍA .....              | 42 |

## 1 PROYECTO WATERCLIMA-LAC

---

En América Latina y el Caribe, las zonas costeras han sido poco integradas al desarrollo socio-económico. Se trata de zonas normalmente con elevadas presiones demográficas y que sufren el impacto de un manejo no planificado de las cuencas hidrográficas resultando en problemas de contaminación y degradación de ecosistemas naturales. Asimismo, en las últimas décadas, los efectos del cambio climático han agravado el deterioro de los recursos hídricos. Las consecuencias de estos fenómenos se agudizan por la multitud de presiones antropogénicas que se superponen en estas zonas costeras al elevado valor ecológico natural.

El objetivo general del Proyecto WATERCLIMA –LAC (Programa Regional de Gestión de Cuencas y Áreas Costeras, en el contexto del Cambio Climático en América Latina y el Caribe) es contribuir a la lucha contra la pobreza y las desigualdades sociales en la región, mejorando las políticas medioambientales y la gestión integral de las áreas costeras. Se busca impulsar la colaboración conjunta, la visión compartida y

la coordinación para implementar modelos de co-gestión en estos territorios adaptados a los efectos del cambio climático, de tal manera que contribuyan a un crecimiento económico eficiente, inclusivo y sostenible.

Con estos fines, el Proyecto WATERCLIMA–LAC ha llevado a cabo actividades en áreas piloto en El Salvador, Haití, México y Argentina durante tres años, analizando los aspectos sociales, biofísicos y económicos que afectan al recurso hídrico en estas zonas. El proyecto ha aportado propuestas de mejora y herramientas para la gestión del agua.

La presente publicación incluye un diagnóstico de los recursos hídricos subterráneos de la zona piloto del Bajo Lempa, en El Salvador. Estos recursos son clave en el mantenimiento de las actividades actuales y para el crecimiento futuro de la región.





## 2 LA ZONA DE ESTUDIO

---

El presente estudio evalúa los recursos hídricos de la zona costera del Bajo Lempa del Salvador incluyendo los territorios del Estero de Jaltepeque y Bahía de Jiquilisco. El río Lempa, el cual discurre también por Honduras y Guatemala, separa ambos territorios.

La bahía de Jiquilisco constituye la mayor extensión de agua salobre y bosque salado de El Salvador constituyendo un complejo lagunar de agua dulce y bosques estacionalmente saturados conectados con el mar. Sirve como refugio de varias especies amenazadas y fue declarada Humedal de Importancia Internacional por la Convención Ramsar el 31 de octubre de 2005. Configura un ecosistema que puede considerarse como una laguna costera dado que la desembocadura de los ríos en la Bahía generan una mezcla de aguas

dulces y saladas (salobres) que determinan la biodiversidad de la zona.

El estero de Jaltepeque se encuentra en el margen derecho del río Lempa y fue declarado sitio Ramsar el 2 de febrero de 2011. Constituye el segundo bosque salobre más importante del país y ha adquirido una enorme importancia debido a los servicios ecosistémicos que ofrece como la pesca, la agricultura, y el turismo. Sirve de hábitat a una gran cantidad de aves costeras y variedad de moluscos. Este estero posee dos bocanas: Cordoncillo y Tasajera.

Los municipios incluidos en este estudio son Tecoluca, Zacatecoluca, San Luis la Herradura, San Agustín, Jiquilisco, San Francisco Javier y Puerto el Triunfo de los departamentos de San Vicente, La Paz y Usulután (Figura 1).

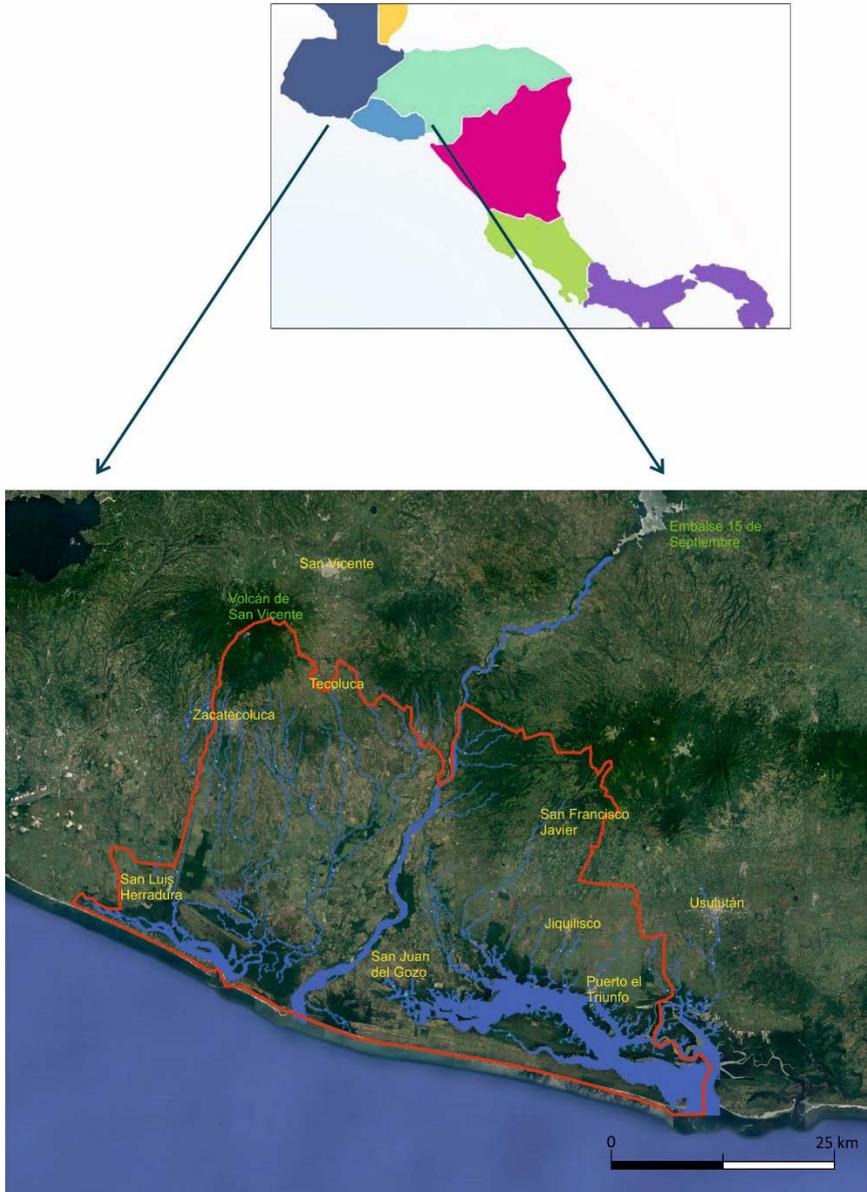


Figura 1: Ubicación de la zona de estudio

### 3 USOS DEL SUELO

El tipo de cultivo predominante, antiguamente, en esta zona eran los granos básicos (maíz y maicillo), cítricos, cocos, mangle y pasto. A partir del 1950 el cultivo del algodón ocupó gran parte de la parte costera, especialmente en la bahía de Jiquilisco (Chavez *et al.*, 2012) donde en la década de los 70 se registraron cerca de 30.000 hectáreas de algodón en el departamento de Usulután (UCA-FIAES, 2008). Actualmente la actividad agrícola viene dominada por la caña de azúcar junto con cultivo de maíz, arroz, frijoles, maicillo, ajonjolí, musáceas y algodón. Los bosques naturales quedan limitados a parches dispersos o a las lindes entre las haciendas y al bosque salado presente junto los esteros. Con el aumento de las zonas agrícolas y los problemas de contaminación ha habido una pérdida de bosque a lo largo del tiempo (Chávez *et al.*, 2012)

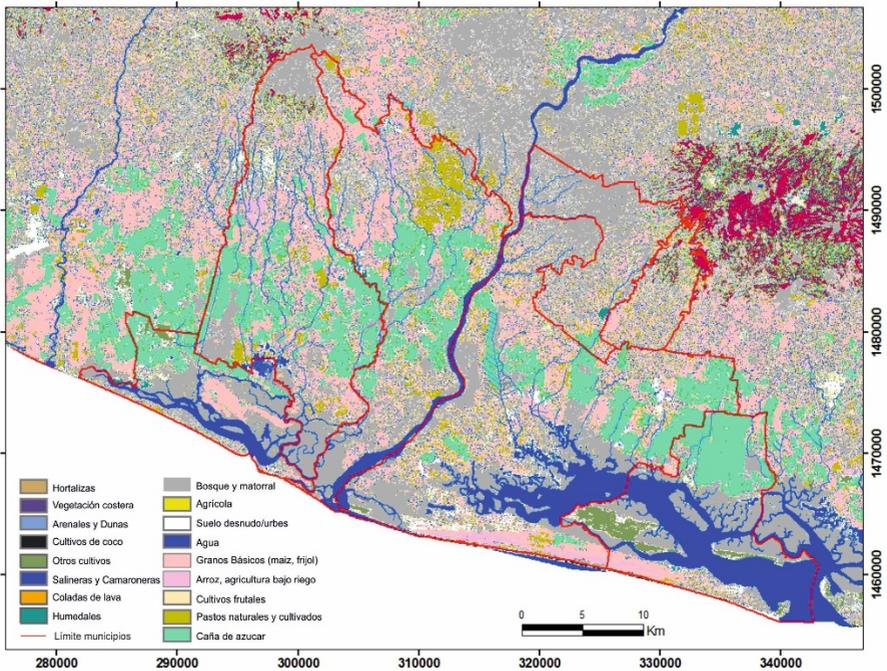


Figura 2 . Usos del suelo en la zona de estudio

## 4 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

El Salvador se sitúa en la parte exterior del cinturón climático de los trópicos presentando, como es habitual en esta zona, dos estaciones, una lluviosa y una seca, así como dos épocas transicionales entre estas estaciones que son seca-lluviosa y lluviosa-seca. A lo largo del año las temperaturas se mantienen estables mientras que en las precipitaciones se observan grandes oscilaciones.

En El Salvador se identifican diferentes regiones climáticas tropicales y la zona de estudio, más concretamente, se encuentra predominantemente en la sabana tropical caliente correspondiente a las planicies internas inferiores a 200 msnm hasta los 800 msnm. Las precipitaciones totales medias anuales son al entorno de los 1750 mm/año en los últimos 20 años y la temperatura media alrededor de los 24 °C. Las precipitaciones son más elevadas en la parte alta de la cuenca. La existencia de dos estaciones condiciona, en cierta medida, los procesos naturales de recarga y los usos potenciales del agua requiriendo la aplicación de sistemas de almacenamiento y regulación que permitan un óptimo aprovechamiento del recurso.

En época de lluvias y especialmente de julio a septiembre pueden ocurrir serias inundaciones por desbordamiento de los ríos provocando pérdidas de cosechas y recursos ya que además de trata de suelos llanos arcillosos que dificultan la infiltración. Esto se ve agravado por desembalses forzados de presas aguas arriba. Algunas viviendas se han adaptado a esta particularidad alzándose ciertos metros sobre el suelo y se dispone, actualmente, de un sistema de alerta a la población. Aún queda, no obstante, mucho por hacer.

El MARN ha impulsado distintas iniciativas de mitigación y adaptación, aún en desarrollo.

## 5 LA PRECIPITACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO

Para el estudio de los recursos hídricos, los datos de precipitación se han obtenido a partir de dos fuentes distintas, por una parte se han obtenido a partir de datos de 3 estaciones meteorológicas que son cercanas a la zona de estudio (Figura 3), y por otra a partir de datos satelitales para toda la extensión.

Los datos de estaciones meteorológicas corresponden a valores puntuales fiables de series temporales incompletas, y los datos satelitales corresponden a series temporales completas donde hay que analizar su representatividad.

### RECARGA

La precipitación es la principal entrada de agua a los acuíferos y a las masas de agua superficiales.

Como consecuencia, es importante caracterizar bien las dinámicas habituales de precipitación así como las previsiones futuras teniendo en cuenta los efectos del cambio climático.



*Figura 3 . Ubicación de las estaciones meteorológicas (fuente de datos: MARN)*

## 5.1 DATOS DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS

El Ministerio de medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador (MARN) dispone de diversas estaciones que recogen datos diarios de precipitación y temperatura (Figura 3) pero ninguna de estas estaciones se localiza dentro de la zona de estudio. Las tres estaciones más próximas son el Aeropuerto de El Salvador, Beneficio Acahuapa, y Puente Cuscatlán. La estación con mayor número de datos abarcando desde 1970 hasta 2015 es Puente Cuscatlán y es ésta la que se utiliza para el presente análisis (Tabla 1).

### LA PRECIPITACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO

El valor medio de precipitación de todos los datos registrados por la estación de Puente Cuscatlán (considerando sólo los años con series completas de datos) es de 1603 mm. Si se observa la Figura 4 se intuye un cierto aumento a la precipitación total en los últimos años. Este aumento se debe a un crecimiento en los últimos años de los eventos más extremos y, por lo tanto, de los valores diarios máximos (Tabla 2).

*Tabla 1. Resumen de las características de las estaciones meteorológicas del MARN.*

|                                  | <b>Beneficio Acahuapa</b> | <b>Puente Cuscatlán</b> | <b>Aeropuerto El Salvador</b> |
|----------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| <b>Serie de datos</b>            | 1982-2015                 | 1970-2015               | 1977-2015                     |
| <b>% años incompletos</b>        | 57%                       | 11%                     | 53%                           |
| <b>Altitud</b>                   | 531                       | 42                      | 24                            |
| <b>Precipitación media anual</b> | 1613                      | 1603                    | 1665                          |

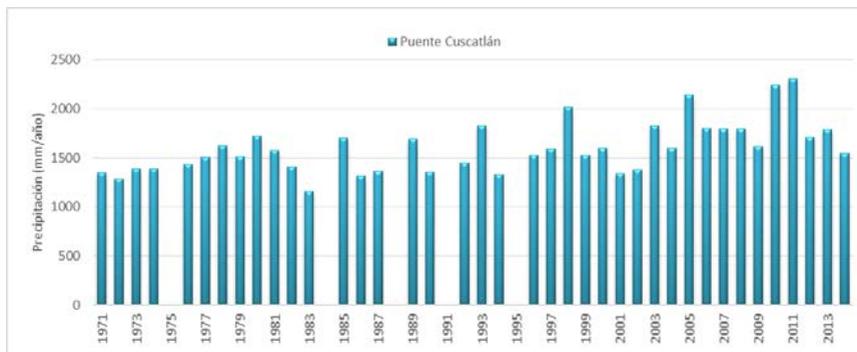


Figura 4. Precipitación total anual (en mm) en la estación de Puente Cuscatlán.

El análisis anual y diario indica una tendencia al aumento de las precipitaciones máximas a partir del aumento de los máximos diarios resultando mayor riesgo de inundaciones. En relación a la recarga de los mantos acuíferos, este aumento de precipitación no implica un aumento de recursos subterráneos ya que las tasas de infiltración en eventos intensos y torrenciales suele ser inferior al de precipitaciones medias.

Tabla 2. Análisis de datos por periodos

| Estación de Puente Cuscatlán                  | Periodo 1970-1994 | Periodo 1995-2015 |
|---|-------------------|-------------------|
| Número de años completos                      | 20                | 19                |
| Precipitación media (mm)                      | 1470              | 1744              |
| Número de días con precipitación $\geq 70$ mm | 17                | 34                |



## 5.2 DATOS SATELITALES

Para este análisis se ha utilizado una aplicación desarrollada por Amphos 21 para recoger y recopilar datos de precipitación a partir de sensores remotos satelitales, en este caso del satélite TRMM, *Tropical Rainfall Measuring Mission*.

A borde del TRMM se identifican distintos instrumentos, entre ellos destacar: el Radar meteorológico de Lluvia (PR en sus siglas en inglés, el cual provee mapas 3D de la precipitación), el generador de imágenes por microondas (da información cuantitativa de lluvias) y el escáner de radiación visible e infrarrojo.

El producto del algoritmo TRMM 3B42 (nivel 3 versión 7) utilizado en este estudio, incluye datos diarios de precipitación y la información es calibrada con datos pluviométricos mensuales del *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC).

### El Satélite TRMM

Este satélite pertenece a un programa desarrollado en conjunto entre EE.UU. y Japón (NASA y JAXA, respectivamente) y es la primera misión espacial aerotransportada dedicada a la medición de precipitación tropical y subtropical, utilizando sensores de microondas y del espectro visible e infrarrojo.

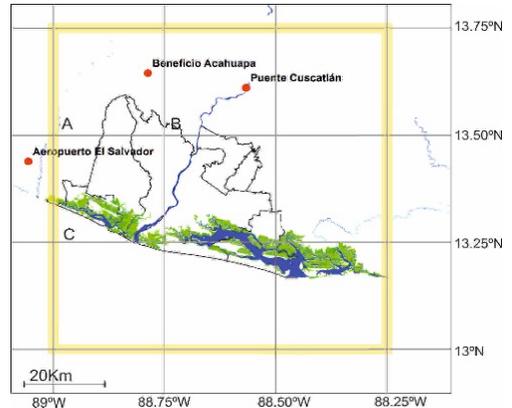


Figura 5. Celdas en que se divide la zona de estudio

Los datos diarios descargados corresponden a las 9 celdas que recaen sobre la zona de estudio, entre 89.25°W y 88.25°W de longitud, y 13°N y 13.75°N de latitud entre los años 1998 y 2015 (Figura 5) (resolución espacial de 0.25°).

Se han calculado los acumulados mensuales y acumulados anuales para cada una de las celdas. La precipitación media que se obtiene es de 1650 mm/año con mínimos anuales en los años más secos de 1300 mm/a y máximos en los años húmedos de 2000 mm/año. Se trata de valores muy similares a les series de datos disponibles.

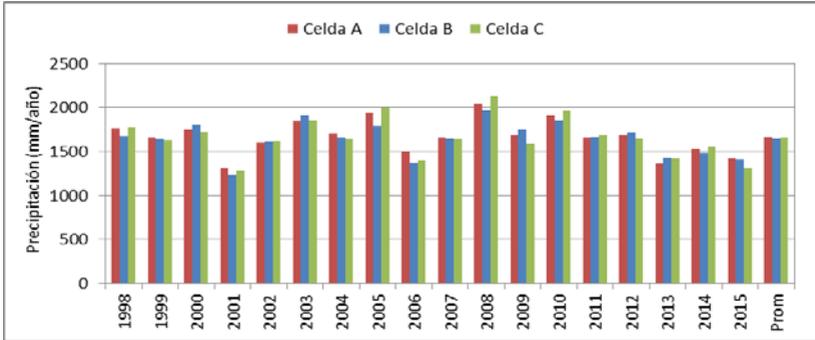


Figura 6. Precipitación anual y promedio calculada para cada celda.

Se ha comprado la representatividad de los datos satelitales comparándolos con los de las estaciones ubicadas en las mismas celdas. Teniendo en cuenta que se trata de valores promedio para la celda, se obtiene diferencias anuales inferiores al 10% excepto aquellos años en los que la precipitación anual es superior a 2000 mm. El satélite tiende a infravalorar los valores reales especialmente en los eventos extremos (Figura 7)

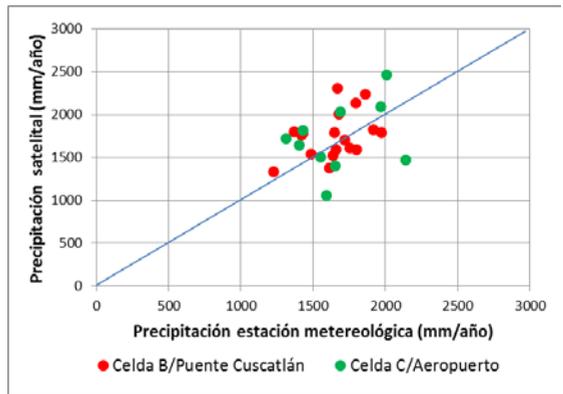


Figura 7. Representatividad de los valores satelitales para estimar la precipitación.

### 5.3 DATOS CLIMÁTICOS FUTUROS

Los escenarios climáticos para un futuro se determinan a partir de las previsiones publicadas por el IPCC y las previsiones de la NASA. Para el estudio del Bajo Lempa se han considerado los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 (hasta el año 2100).

Las previsiones de precipitación según el escenario más pesimista (RCP 8.5), indican que no hay una modificación significativa a futuro de los patrones de lluvia pero sí que pueden aumentar los episodios de lluvias torrenciales (Viladés *et al.*, 2017). Los correspondientes informes del IPCC también apuntan esta característica así como el análisis, presentado en el capítulo precedente de los 20 últimos años de datos.

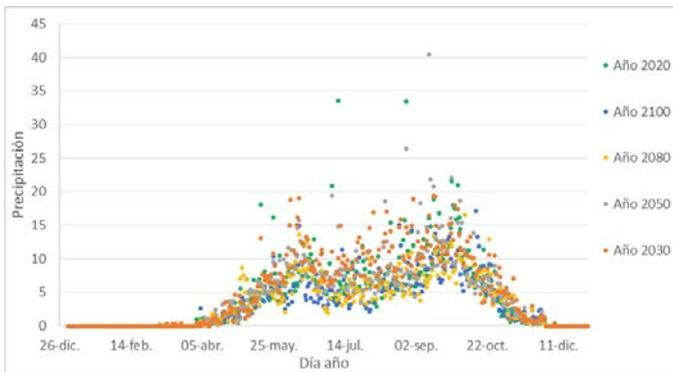


Figura 8. Previsiones de precipitación según escenario RCP8.5 (Viladés *et al.*, 2017).

#### EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

El análisis de los datos y las previsiones respecto el cambio climático apuntan un aumento de las precipitaciones extremas y por lo tanto del riesgo de inundaciones. Este efecto no se traduce directamente en un aumento de recursos y además hay que sumarle que a estos periodos de lluvias más intensas podrán alternarse épocas de sequías.

## 6 EL AGUA SUBTERRÁNEA

---

Los recursos hídricos subterráneos no responden a las mismas delimitaciones que el agua superficial. De esta manera una zona hidrográfica puede albergar distintos acuíferos o un mismo acuífero pertenecer a distintas unidades hidrológicas de gestión.

Un acuífero es una formación geológica capaz de contener y transmitir un volumen explotable de agua.

Las aguas superficiales y subterráneas están muy relacionadas. Los ríos pueden recargar los acuíferos o drenar los acuíferos. También, las aguas subterráneas afloran en fuentes o manantiales donde pueden iniciar un recorrido superficial y posteriormente volver a recargarse al acuífero.

La velocidad a la que discurre el agua subterránea es unos 5 órdenes de magnitud inferior al del agua superficial. Esto permite disponer de grandes volúmenes de agua almacenada con una vulnerabilidad a la contaminación inferior al del agua superficial. El terreno

protege a las aguas subterráneas e la contaminación. No obstante, si esta llega al acuífero, el proceso de descontaminación es mucho más lento y costoso. Detectar la contaminación en el agua subterránea es más complicado ya que requiere de diferentes puntos de observación, correctamente distribuidos y construidos (rede monitoreo) y aún así puede haber problemas puntuales de difícil diagnosis.

En las zonas costeras hay que destacar dos particularidades respecto la contaminación. Por un lado se encuentran en la parte baja de una cuenca donde se acumula el resultado de diferentes actividades que pueden desarrollarse aguas arriba. Además, existe un equilibrio natural con el mar pero si éste se rompe porque disminuye el flujo de agua dulce (superficial y/o subterránea) se produce una entrada de agua salada en el acuífero resultando en la salinización de pozos y del mismo acuífero. Revertir un problema de salinización es lento y costoso.

## 7 LOS ACUÍFEROS

La mayor parte de los materiales geológicos identificados en la zona del bajo Lempa corresponden a depósitos sedimentarios cuaternarios, constituidos principalmente por depósitos aluviales (arenas, gravas e intercalaciones limosas), de estuarios y con ciertas intercalaciones de rocas bioclásticas. Estos materiales configuran un acuífero aluvial costero de dimensiones considerables (Figura 9). Según el Plan Maestro de Desarrollo y Aprovechamiento de los Recursos Hídricos (PLAMDARH, 1981) el acuífero ubicado en esta zona se denomina Acuífero Lempa-Jiquilisco y cubre toda la planicie costera (Acua, 2016). Este acuífero de tipo aluvial y no confinado en su mayor parte se recarga en las

cadenas volcánicas. La profundidad del nivel freático varía entre 5 y 80 m. El principal uso de este acuífero es para riego y para el abastecimiento de poblaciones localizadas en su área de influencia (MARN, 2006). Según el Cuerpo de Ingenieros de los EEUU (1998) este acuífero contiene agua dulce generalmente abundante con disponibilidad moderada a alta. Localmente puede presentar influencia geotermal, intrusión salina y contaminación de origen agrícola.

El acuífero costero aluvial está en contacto con el acuífero de materiales piroclásticos ubicado aguas arriba.





Figura 9. Extensión del acuífero costero aluvial.

Una de las características de los acuíferos aluviales costeros es la gran variabilidad resultando en una notable heterogeneidad de materiales en vertical y en horizontal. Se relacionan con la dinámica fluvial antigua, divagación lateral del río, y generan zonas de elevada conductividad hidráulica limitadas por materiales más arcillosos.



## 8 ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO

Con la finalidad de caracterizar los recursos hídricos de la zona y su estado se ha realizado un estudio hidrogeológico. Éste ha incluido distintas campañas de campo, análisis de gabinete y cartografía de los resultados.

CATIE – El Salvador realizó un extenso inventario de puntos de agua (unos 200 puntos) y posterior selección para caracterización y toma de parámetros in-situ en 60

puntos (Figura 10). A partir de la información de esta primera campaña de campo se diseñó una red de monitoreo en la que se recogieron muestras de agua para su análisis en laboratorio (Figura 11). Posteriormente, se realizó una tercera campaña de campo para analizar otros contaminantes de origen agrícola en puntos seleccionados en distintos laboratorios.

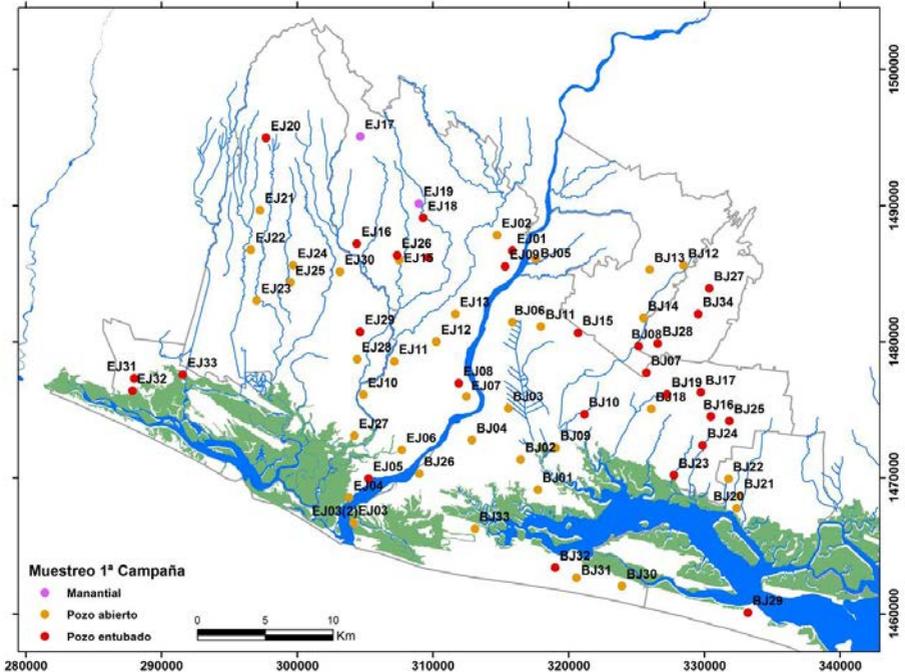


Figura 10. Puntos seleccionados para la caracterización in-situ.

Este estudio ha concluido con el cálculo de un balance de agua del acuífero para evaluar el estado cuantitativo del acuífero. Esto permite identificar el volumen de agua explotable desde un punto de vista ambiental y las principales entradas de agua al acuífero. La elaboración de la cartografía piezométrica muestra la dirección de las principales líneas de flujo y las zonas con bombeos importantes.

La información hidroquímica ha permitido evaluar el estado cualitativo de las aguas subterráneas e identificar potenciales problemas y procesos que están teniendo lugar en el medio.

## 8.1 CARACTERIZACIÓN IN-SITU

En enero del 2016 se visitaron 60 puntos de agua de los que se recopiló toda la información disponible y se realizaron medidas in-situ de los parámetros físico-químicos del agua: pH, Conductividad Eléctrica, temperatura y salinidad. También se midió la concentración de nitratos mediante tiras reactivas y el nivel piezométrico (Figura 11).



*Figura 11. Toma de datos in-situ.*

La recogida de muestras para la medida de los parámetros se realizó siguiendo los protocolos recogidos en el Standard Methods (APHA *et al.*, 2017).

## 8.2 CARTOGRAFÍA PIEZOMÉTRICA

La representación de los niveles freáticos permite la elaboración del mapa piezométrico. Hay que tener en cuenta que es una representación del funcionamiento hidrogeológico de la época de toma de datos, enero 2016, corresponde a la época seca de un año seco.

*Los mapas piezométricos facilitan la comprensión del funcionamiento del sistema de una manera intuitiva ya que permiten identificar la dirección del movimiento del agua subterránea (perpendicular a las isopiezas) y el gradiente hidráulico (proporcional al espaciado entre las isopiezas).*

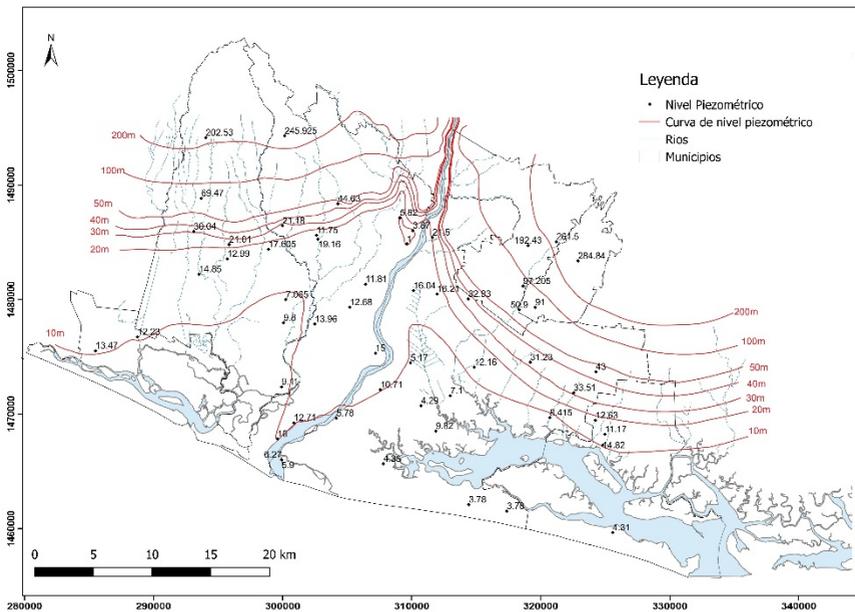


Figura 12. Mapa piezométrico de la zona de estudio.

La piezometría indica que la dirección principal de flujo es de norte a sur y el río, principalmente, drena el acuífero. De esta manera, el agua del río procede, durante esta época del año, principalmente del acuífero. En época de aguas altas podría suceder que el río fuera una fuente de recarga del acuífero. En la parte más baja del acuífero se observa una disminución del gradiente piezométrico y una inflexión en la piezometría. Hay que tener en cuenta que es la zona más llana y donde hay entradas de agua del mar a través del estuario junto con criaderos de camarones. Todo esto condiciona la piezometría local resultando en un proceso de intrusión salina que se ve agravado por la explotación de pozos costeros.

### 8.3 INTRUSIÓN SALINA

Con los datos de la campaña de enero del 2016 se ha analizado el estado de la intrusión salina en el acuífero aluvial costero del bajo Lempa. El mapa de la Figura 13 evidencia el aumento de la salinidad aguas abajo. En las zonas altas del acuífero la salinidad del

agua subterránea es prácticamente como el agua de lluvia. A medida que el agua circula por el acuífero va aumentando su mineralización y por lo tanto su salinidad, por interacción con las rocas por las que circula. No obstante, la salinidad en el tramo bajo no puede atribuirse a este proceso y se considera que se produce por mezcla con agua del mar.

Como resultado, en esta época del año, se identifica una zona de 12 km de ancho y un máximo de 7,5 de altura, básicamente en el sector del Estero de Jaltepeque, con valores de salinidad por encima de los recomendados por la Organización Mundial de la Salud (conductividad eléctrica superior a 2500 mS/cm).

La salinización se produce por entrada de agua del mar al acuífero desde el mismo mar o desde cursos de agua superficial salinos. Esta entrada se ve favorecida básicamente por dos causas: la reducción de aportes de agua dulce desde la cuenca y la explotación del agua dulce del acuífero mediante pozos. Esta cartografía se elaboró en la época seca que es cuando hay menos flujo de agua dulce y por lo tanto probablemente refleje el peor estado que el acuífero

presenta a lo largo de un año. Se esperaría que en época de lluvias, con el consiguiente aumento de la recarga en la cuenca, hubiera un retroceso de la cuña salina. Asimismo, la explotación intensiva de pozos cerca de la costa es un factor muy importante que agrava este proceso. El cambio de la explotación del acuífero a puntos

ubicados más lejos de la costa podría ayudar a mejorar esta situación. En esta zona del estuario del Estero de Jaltepeque hay varios brazos angostos y canales que influyen enormemente en la salinidad de la zona. En el resto de la zona de estudio se evidencia un proceso de intrusión salina y mezcla de aguas aún incipiente.

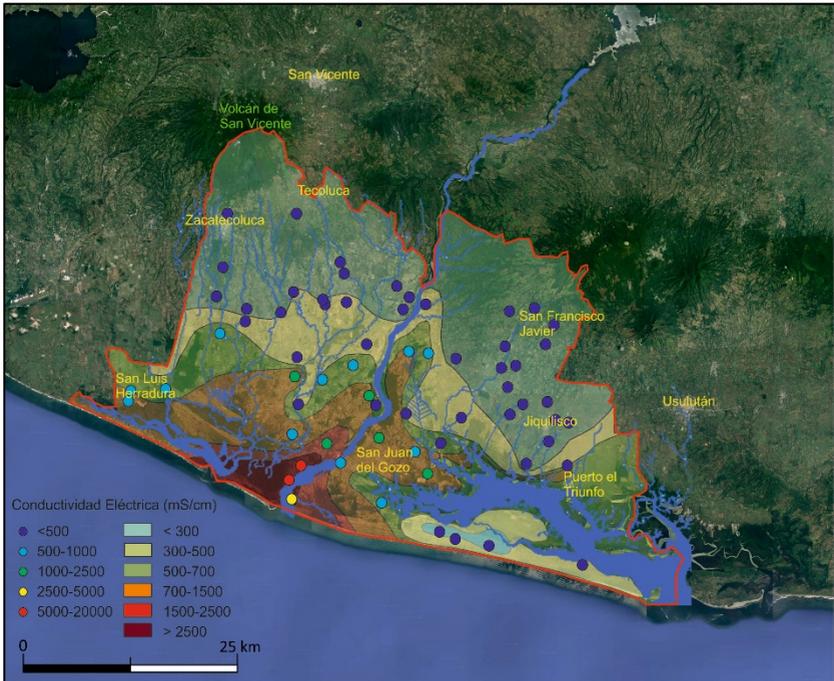


Figura 13. Mapa de isoconductividades.

## 9 MODELO CONCEPTUAL Y BALANCE HÍDRICO

La estimación del balance hídrico se basa en el modelo conceptual de funcionamiento del sistema hídrico: por donde entra el agua, por donde sale, como circula, cuales son los límites del acuífero, procesos y mezclas, ... El balance hídrico permite contrastar el funcionamiento del sistema con las evidencias del modelo conceptual como la intrusión salina.

El balance hídrico se basa en aplicar el principio de conservación de la masa (que se calcula en volumen ya que la densidad se considera constante). En un acuífero definido se establece que la diferencia entre las entradas y salidas de agua en el mismo es igual a la variación en el almacenamiento. Si hay, por

ejemplo, más salidas que entradas, bajará el nivel piezométrico o entrará agua del mar si es un acuífero costero.

El modelo conceptual de la zona indica que la principal recarga es por precipitación sobre el acuífero aflorante y a través del acuífero aguas arriba.

La descarga del río se produce hacia el mar y temporalmente hacia el río. En las salidas hay que sumar las extracciones de agua para abastecimiento y riego agrícola.

Para acotar los distintos términos del balance hídrico se han realizado una serie de suposiciones.

### 9.1 ENTRADAS DE AGUA

#### 9.1.1 RECARGA POR INFILTRACIÓN DE LLUVIA

La recarga depende del terreno, de su pendiente, de la vegetación, de la sequedad o humedad.... Puesto que no se

dispone esta información, se ha aproximado este parámetro mediante métodos empíricos. Se ha calculado mediante la modificación de la ecuación de Chaturdevi (1973) realizada por el UP U.P. Irrigation Research Institute (IRI) y que ha sido aplicada satisfactoriamente en

otras zonas tropicales (Empirik, 2013)

$$R = 1.35.(P - 14)^{0.5}$$

La recarga promedio calculada corresponde al 15% de la precipitación anual, que oscila al 17% los años más secos y al 12 % en los años más húmedos.

En este mismo sentido, el Plan Nacional de Ordenamiento y Desarrollo Territorial elaborado por el MARN (2004) presenta un balance anual elaborado por el Servicio Meteorológico donde la recarga representa el 10% de la precipitación a nivel de todo el país.

Para el cálculo se considera una precipitación media anual de 1650 mm sobre una superficie acuífera de 1089 km<sup>2</sup>.

### 9.1.2 ENTRADAS LATERALES DE AGUA

El acuífero aluvial está hidráulicamente conectado con el acuífero piroclástico, aguas arriba, suponiéndole una importante fuente de recarga. No obstante, en la zona noroeste del acuífero el límite del acuífero es con un medio de baja

permeabilidad y por lo tanto el mayor aporte es por el sector de la bahía de Jiquilisco. Se ha estimado a partir de la recarga y las propiedades hidráulicas de la zona de entrada. El gradiente hidráulico estimado es de  $6,6 \cdot 10^{-3}$  y la permeabilidad hidráulica es de  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s (PRISMA; 2001).

### 9.1.3 ENTRADAS DE AGUA DEL MAR

La salinización del acuífero indica conexión con el mar y una fuerte extracción de la costa puede provocar aporte de agua salada hacia el interior. No obstante, la salinidad no siempre indica un flujo neto hacia el interior.

### 9.1.4 ENTRADAS DE AGUA DESDE EL RÍO

La piezometría indica que durante la época seca el río supone una fuente de descarga del acuífero. Asimismo se espera que durante la época húmeda el papel de río sea de recarga del acuífero, si bien la presa 15 de septiembre ubicada aguas arriba de esta región controla los caudales circulantes del río. Se aplica tasa de infiltración de 0,005 cm/s en época de lluvias y



aluvial se estima alrededor de 176.000 habitantes.

El principal uso del agua subterránea es para riego. Según la FAO, el 56% del riego se realiza con agua superficial y el resto mediante pozos. Se trata de cultivos que requieren un elevado uso de agua y en esta zona requieren riego complementario (ITZANI, 2012) La caña de azúcar, por ejemplo, que ocupa casi 80.000 hectáreas de suelo actualmente, consume 73 m<sup>3</sup> de agua por cada tonelada de caña producida (Renderos, 2016). La producción actual es de 765

toneladas por manzana (ITZANI, 2012)

### 9.2.3 SALIDAS HACÍA EL RÍO

Tal y como se ha detallado, en época seca el río es una fuente de salida de agua subterránea. Este periodo abarca de noviembre a abril, 6 meses durante los cuales se produce salida a los ríos para cubrir el caudal de base. Datos analíticos sugieren aporte neto al acuífero. Puesto que no se dispone de datos de aforo del río, se considera el caudal de base referido en Losilla *et al* (2001) que da un valor total de salidas aproximado de 0,47 m<sup>3</sup>/s

## 9.3 CÁLCULO DEL BALANCE

Los resultados del cálculo se resumen en las tablas siguientes

*Tabla 3. Cálculo de las entradas de agua al acuífero aluvial*

| ENTRADAS DE AGUA                    |   | 234,16 Hm <sup>3</sup>                 |
|-------------------------------------|---|--|
| Recarga directa sobre la superficie | 12-17% de la precipitación según año  | Valor promedio: 224,72 Hm <sup>3</sup> |
| Entradas laterales                  | Acuífero piroclástico (NE)  | 1,64 Hm <sup>3</sup>                   |
| Entradas desde el río               | Variable durante el año y controladas por la presa. Se estiman en 7,8 Hm <sup>3</sup> . |  |

Tabla 4. Cálculo de las salidas de agua del acuífero aluvial

| SALIDAS DE AGUA             |  | 241,52 Hm <sup>3</sup> |
|-----------------------------|--|------------------------|
| Salidas para abastecimiento | Población de 176.610 habS                  | 5,22 Hm <sup>3</sup>   |
| Salidas para riego          | Riego caña de azúcar                       | 229 Hm <sup>3</sup>    |
| Salidas a río               | Caudal base                                | 7,30 Hm <sup>3</sup>   |
| Salidas a mar               | Equilibrio (o valor de cierre del balance) |                        |

El total de salidas del sistema (241,52 Hm<sup>3</sup>/a) resulta ligeramente superior a las entradas (234,16 Hm<sup>3</sup>/a). Hay que tener en cuenta que se trata de valores aproximados y que reflejan una tendencia más que un valor absoluto. También, se ha trabajado con valores medios, dada la inercia del funcionamiento de los acuíferos. Pero hay que señalar que se alternan periodos de sequías, ligado al fenómeno de La Niña en los que se producen una serie años consecutivos con valores de precipitación inferiores a la media y que pueden repercutir

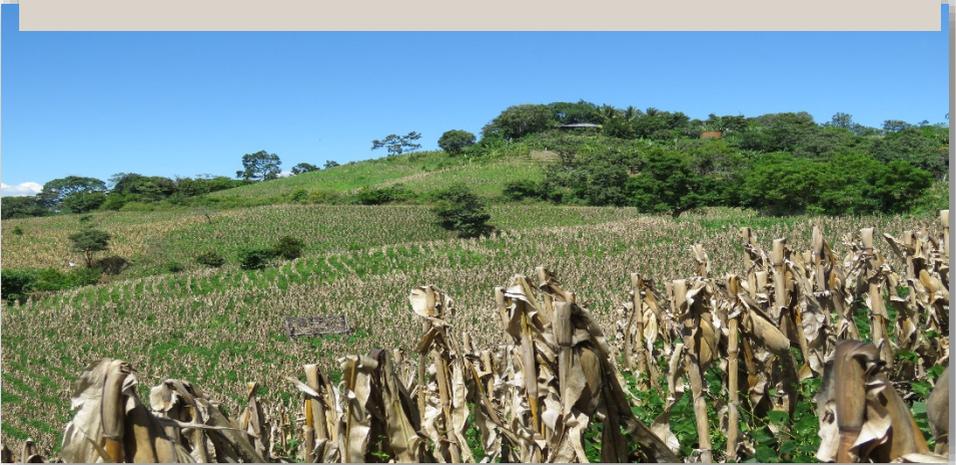
muy negativamente. Por el contrario, se ha observado que la precipitación media en los últimos 20 años ha aumentado resultando en un aumento, no proporcional, de recursos.

Como conclusión, el hecho que las salidas sean superiores a las entradas afecta al equilibrio natural del mar-acuífero favoreciendo la incipiente entrada de agua salina al acuífero. Esta entrada de agua se observa en la parte de la desembocadura del sector estero de Jaltepeque.

## Estado cuantitativo del acuífero

El mapa piezométrico y el estudio de la salinidad ponen de manifiesto inflexiones en la piezometría natural que resultan en un proceso inicial de intrusión salina en la zona costera del estero de Jaltepeque, favorecido también por la presencia de los canales. Como resultado, una franja de la zona costera presenta valores de salinidad por encima de los recomendados por la OMS para el consumo humano. El balance hídrico apunta también que las extracciones de agua son superiores a las entradas y este proceso se podría agravar si continua disminuyendo el caudal del río y aumentando las extracciones.

Se recomienda el establecimiento de una red de monitoreo de agua subterránea para evaluar cambios en los niveles piezométricos, monitorear el avance de esta intrusión salina, disminuir las extracciones de agua así como reubicar los pozos



## 10 PRESIONES Y CONTAMINACIÓN

En el presente estudio se ha evaluado el estado cualitativo del acuífero respecto distintas presiones sobre el medio. No se han analizado las concentraciones de coliformes relacionadas con el saneamiento. Los parámetros analizados en este estudio no se solucionan con la cloración del agua.

### 10.1 NITRATOS

El nitrato es un compuesto derivado del Nitrógeno que se encuentra tanto disuelto en las aguas subterráneas como en el suelo. En concentraciones naturales los nitratos no suponen ningún riesgo para la salud ni de ningún problema medioambiental. Pero cuando los niveles de nitrato exceden el máximo de 50 mg/L en el agua, puede suponer un riesgo para los seres humanos y animales. En los adultos sanos normalmente los nitratos no causan ninguna enfermedad. Pero en niños recién nacidos y en ancianos hay que tener una precaución especial. En el caso de personas ancianas también hay que tener

cuidado especial ya que el elevado y continuado consumo de nitratos puede dificultar el transporte de oxígeno en la sangre. En algunas zonas, debido a diferentes actividades humanas, los niveles de nitrato en el agua pueden superar estos niveles. Estas actividades pueden ser tanto industriales como agrícolas o domésticas. En este sentido, los nitratos pueden proceder de la aplicación de fertilizantes (tanto los orgánicos como purines como los inorgánicos), de los corrales de engorde de animales, de sistemas sépticos de las viviendas, de aguas residuales, residuos animales, residuos industriales y residuos de procesamiento de alimentos.



Durante la primera campaña de campo (diciembre 2015-enero 2016) se midieron los nitratos en todos los puntos visitados mediante tiras reactivas que dan un rango de valores. Se seleccionaron los puntos más representativos y, en la segunda campaña (enero 2017), los nitratos se analizaron en el laboratorio.

En la representación de los nitratos sobre los usos del suelo (Figuras 14 y 15) no se observa ninguna relación directa. La mayoría de puntos se encuentran por debajo del valor límite de 50 mg/l y sólo se supera en algunos puntos de la bahía de Jiquilisco. Los datos estimados con las tiras reactivas sobrestiman ligeramente los valores.

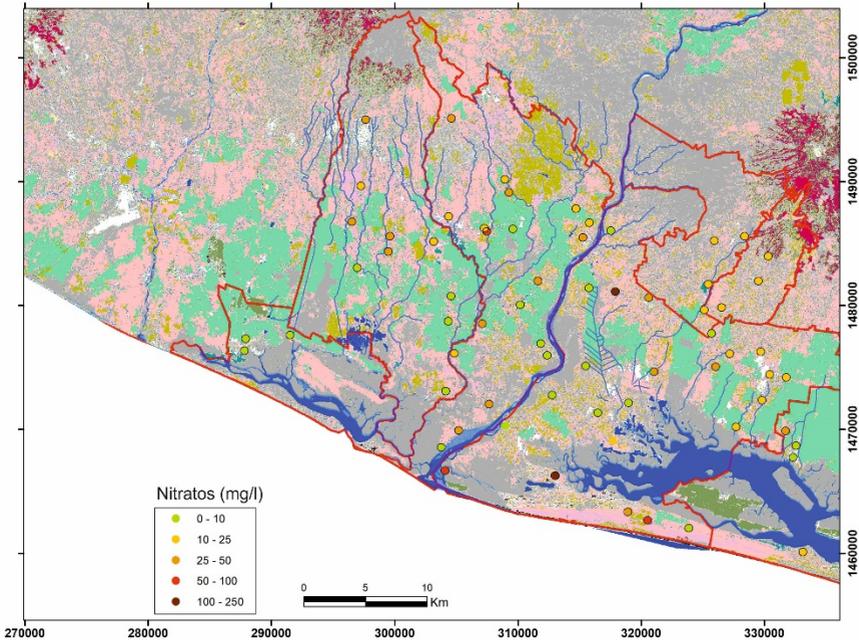


Figura 14. Distribución de nitratos en diciembre 2015- enero 2016.  
Leyenda usos del suelo en Figura 2.

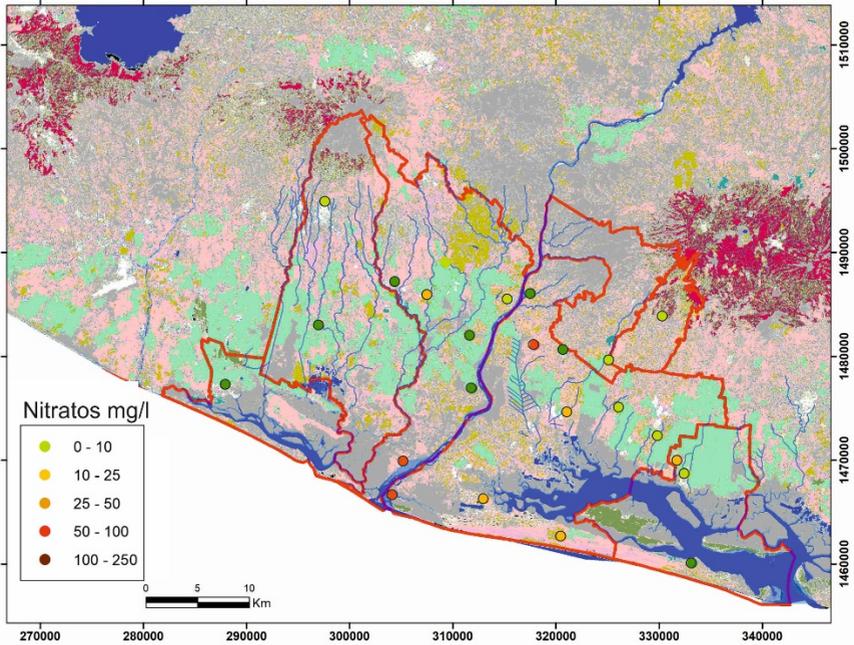


Figura 15. Distribución de nitratos en enero 2017. Leyenda usos del suelo en Figura 2.

## 10.2 METALES

En la segunda campaña de campo se analizaron las concentraciones de Hierro (Fe), Zinc (Zn), Cromo (Cr), Manganeseo (Mn), Cobre (Cu), Plomo (Pb) y Arsénico (As). Los resultados

se han comprado con la Norma Salvadoreña 13.07.01:08 y sólo hay dos metales que superan los límites establecidos que son el hierro y el manganeseo (Figura 16).

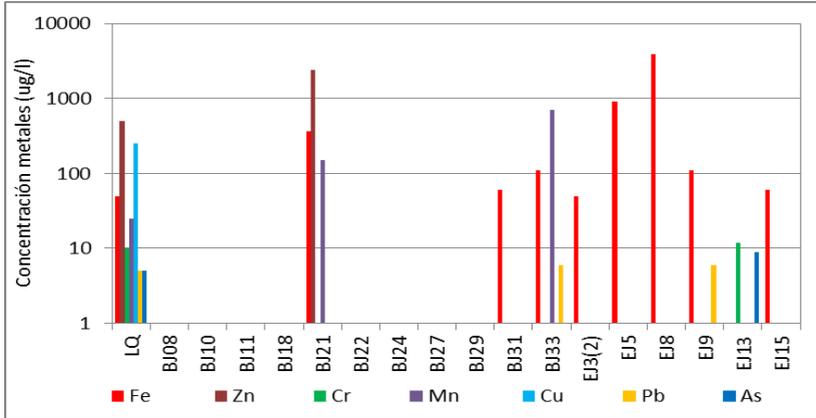


Figura 16. Concentración de los metales analizados (enero 2017)

La distribución espacial no presenta relación con los usos del suelo. El límite que la norma salvadoreña establece para el hierro es de 0,3 mg/l. Este valor es superado por 4 de los puntos muestreados. No se observa correlación con otros parámetros y se atribuye a actividades locales o a mezcla con agua del río que puede llevar vertidos de actividades aguas arriba.

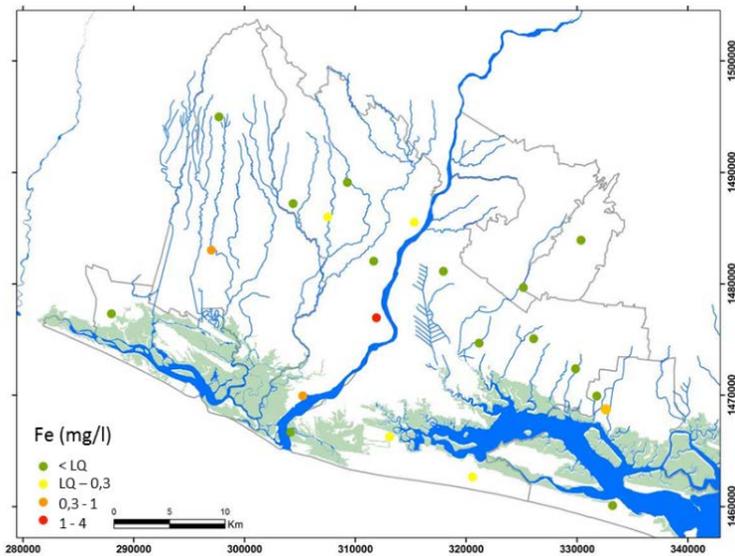


Figura 17. Distribución espacial de Hierro (enero 2017)

Sólo hay dos puntos, en el sector de la Bahía de Jiquilisco que presentan concentraciones de Mn superiores al límite de detección, con valores de 0,15 y 0,7 mg/l, ambos por encima de la norma salvadoreña de 0,1 mg/l.

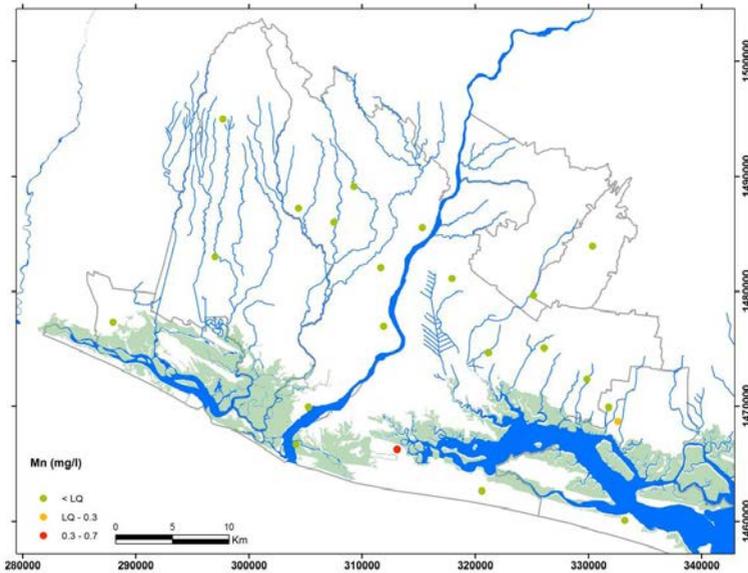


Figura 18. Distribución espacial de Manganeseo (enero 2017)

Puntualmente se observan valores de metales, Hierro y Manganeseo, por encima de los valores de la Norma del Salvador. Por lo tanto, no se recomienda el uso de estos puntos de agua para el consumo humano, especialmente en los más elevados: BJ21, BJ33, EJ5, EJ8 y EJ23 (Figura 10).

Los puntos con mayores concentraciones de nitratos son BJ11, EJ5, EJ3(2). En éstos se recomienda tomar el agua con precaución.

### 10.3 PLAGUICIDAS

La principal actividad económica de esta región es la agrícola junto con la actividad pesquera y este hecho hace plantear la posibilidad que malas prácticas agrícolas pasadas y actuales puedan aportar contaminantes a las aguas subterráneas.

La actividad agrícola está enfocada al cultivo del maíz, arroz, frijoles ajonjolí, musáceas, algodón y caña de azúcar (UCA-FIAES, 2008). Esta última es la que puede generar mayor impacto tanto por el consumo de agua como por el uso de agroquímicos. Hay que tener en cuenta que en la década de los 70 el principal cultivo era el algodón el cual también se caracterizó por el uso intensivo de agroquímicos (Pacheco, 1995).

Diferentes estudios han puesto de manifiesto que los principales plaguicidas utilizados en el pasado para el cultivo del algodón y para combatir la malaria en esta zona son los organoclorados (Aldrin, Endrin, Dieldrin, Lindano, DDE, Paratión, Heptacloro y DDT) (UCA-FIAES, 2008; Pacheco, 1995; Rodriguez, 2001). Éstos son altamente tóxicos y tiene alta persistencia en el ambiente y sus

#### Los pesticidas o plaguicidas

Estos compuestos se utilizan para prevenir, destruir, repeler y eliminar plagas. Se denominan compuestos orgánicos persistentes y algunos de ellos pueden ser muy tóxicos y peligrosos para la salud humana y los animales. Los principales riesgos son para las personas que los fabrican y aplican, que deben seguir protocolos de protección. Durante los años 70 y 80 fueron aplicados masivamente en la agricultura. Estos compuestos tienen comportamientos diversos en el medio y sus propiedades determinan su destino final en el suelo, agua o sedimento. Su persistencia depende de la eficiencia de los procesos de degradación natural y en algunos casos pueden inducir a la formación de metabolitos con mayor toxicidad. Estos procesos tienen lugar a partir de reacciones de oxidación, reducción, hidrólisis, ruptura y reorganización de moléculas las cuales requieren la actividad enzimática de microorganismos. En cambio, su transporte en el medio está relacionado con las propiedades físico-químicas de las sustancias.

productos de transformación aumentan la complejidad de los efectos tóxicos (Darko *et al.*, 2008). En la fase ambiental, estas sustancias alcanzan entre el 75% y el 100% de su degradación en un tiempo de 4 a 30 años (Sankararamkrishnan *et al.*, 2005).

También se describe la aplicación de organofosforados. Éstos son menos persistentes que los organoclorados pero si se quedan en la degradación parcial generan subproductos de mayor toxicidad que los compuestos parentales. No se dispone de información de aplicación de otros plaguicidas en el pasado.

En el marco de este proyecto, CATIE ha realizado una consulta sobre los plaguicidas actualmente en uso. Se observa que mayoritariamente son organofosforados y piretoides y, en menor grado los clorados (Lambda Cialotrina, Malation, Clorpirifos, Tiacloprid, Betaciflutrina, Metaldehido, Metamidafós, Triazofos, Deltametrina). Destacar, por su elevada toxicidad el Metamidafós.

Previamente a este trabajo, en el 2008, un estudio analizó pesticidas organoclorados en la bahía de Jiquilisco (UCA-FIAES, 2008) y no

encontró restos de pesticidas en el agua. Sólo identificaron bajas concentraciones en los sedimentos de los estanques de agua (Heptacloro, DDE, Dieldrín, DDD y DDT).

En el presente trabajo, en la primera campaña de campo se seleccionaron 6 puntos para el análisis de pesticidas (BJ05, BJ10, BJ15, BJ22, BJ33 y EJ3(2)). Se analizaron plaguicidas fosforados y clorados. No se detectó ninguno pero se observó que los límites de detección de los laboratorios eran muy elevados y en algunos casos estaban por encima de los límites para el agua potable. Por ejemplo Aldrín y Dieldrín tienen límites en el agua potable de 0,03 µg/L (Norma del Salvador) y el límite de detección de los laboratorios era de 0,8 µg/L y 1,0 µg/L.

Por este motivo se realizó una tercera campaña de muestreo, en julio 2017, y se enviaron las muestras a Argentina (CONICET) y a Holanda (Alcontrol). Se amplió la lista de pesticidas con más fosforados, clorados y nitrogenados. En total se analizaron 69 plaguicidas diferentes. Además de aguas subterráneas se cogieron dos muestras de agua en el manglar y pozos en zona de cultivo de caña.

Los resultados indican que no hay concentraciones elevadas de pesticidas ni en el agua subterránea ni en el agua del manglar. De todos los analizados sólo se ha detectado en concentraciones superiores a 0,01 µg/l: Heptacloro, Endosulfan Alfa, Dieldrín y Endosulfán Beta.

De todos los pesticidas encontrados, la normativa del Salvador sólo regula la concentración máxima permitida de Dieldrín (0,03 µg/l). Este valor coincide con la normativa europea y con las recomendaciones de la OMS (WHO, 2011).

El Heptacloro, no está regulado en El Salvador y la Organización Mundial de la Salud (OMS) tampoco fija un valor límite máximo ya que normalmente se encuentra por debajo de los valores que se consideran tóxicos pero recomienda no superar 0,03 µg/l. La normativa europea utiliza

este valor como límite máximo admisible. La OMS considera que el Endosulfán no es genotóxico y no se han demostrado efectos cancerígenos y, como consecuencia, no fija un valor límite. No obstante, recomienda no superar los 20 µg/l. La normativa europea fija que el límite máximo para cualquier pesticida sea 0,1 µg/l y la suma de los distintos plaguicidas no debe superar los 0,5 µg/l.

Teniendo en cuenta los límites más estrictos, en la zona de estudio sólo hay dos plaguicidas que superan el límite máximo permitido por la legislación, el Endosulfán Alfa y el Heptacloro, y ambos se localizan en el mismo punto, **el BJ11**. En este mismo punto también se detecta Endosulfán beta pero por debajo del límite fijado para el consumo humano. En el punto BJ22 la concentración de Endosulfán Alfa es muy próxima al valor límite de 0,01 µg/l.



Tabla 5. Valores de pesticidas en el agua subterránea (en  $\mu\text{l}$ ) indicando el límite permitido según legislación nacional o internacional

| punto                            | unidades | Heptacloro | Endosulfan Alfa | Dieldrin | Endosulfan Beta |
|----------------------------------|----------|------------|-----------------|----------|-----------------|
| <b>Límite normas (ver texto)</b> |          | 0,03       | 0,1             | 0,03     | 0,1             |
| EJ3(2)                           | ug/l     | 0,00143    | 0,02326         | <LD      | 0,00074         |
| Salto 1                          | ug/l     | 0,00151    | 0,01257         | <LD      | <LD             |
| EJ15                             | ug/l     | <LD        | 0,01419         | <LD      | 0,00045         |
| Caña                             | ug/l     | 0,00232    | 0,00062         | 0,00029  | <LD             |
| BJ11                             | ug/l     | 0,06392    | 0,24694         | <LD      | 0,01528         |
| BJ33                             | ug/l     | 0,00192    | 0,00028         | <LD      | <LD             |
| BJ22                             | ug/l     | 0,00199    | 0,09158         | 0,01     | 0,00696         |
| Manglar Avalos                   | ug/l     | 0,00234    | 0,06958         | <LD      | 0,00534         |
| Manglar Marta                    | ug/l     | <LD        | 0,00075         | <LD      | <LD             |

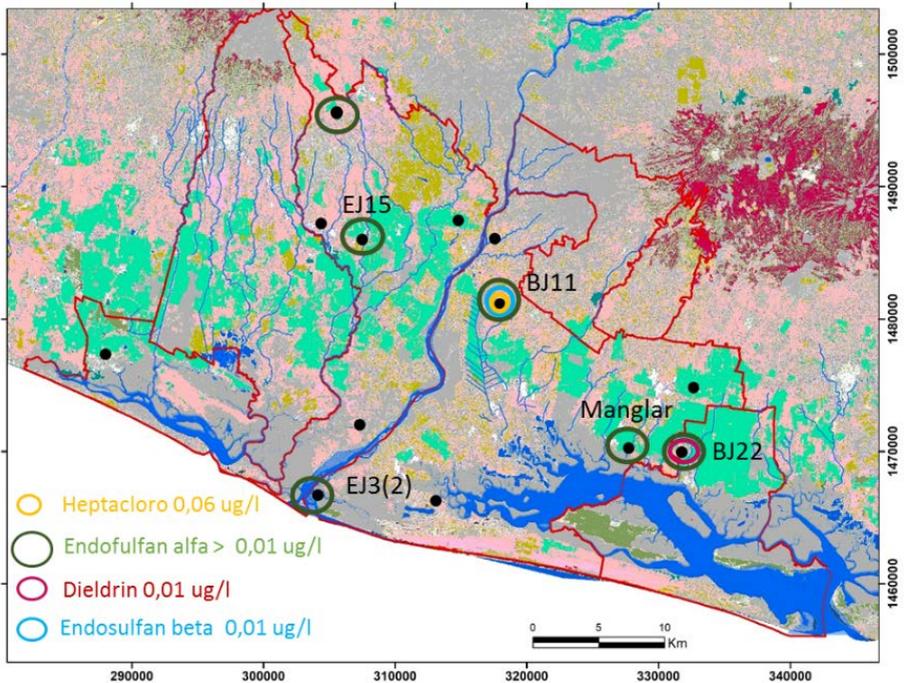


Figura 19. Distribución espacial puntos en los que se han detectado plaguicidas.

## 11 RECOMENDACIONES

---

En general, los datos recopilados indican que el estado tanto cuantitativo como cualitativo no es malo. No obstante esto, hay zonas en las que hay que prestar especial atención, implementar acciones de corrección y hacer un seguimiento del avance.

Por un lado, los resultados sugieren procesos de sobre-explotación que pueden repercutir en el estado del acuífero y limitar su uso futuro. De esta manera, en la zona costera del Estero de Jatelpeque se identifica una franja que entra un máximo de 7,5 km tierra dentro, donde la actual salinización supera los límites recomendados por la OMS. Se trata también de una zona con canales y brazos del estuario que favorecen este proceso. El agua subterránea de esta zona no puede utilizarse para uso de boca. Para frenar este proceso y revertir el estado se recomienda inventariar los principales usuarios de agua y desplazar, tierra adentro, las principales extracciones. También se recomienda crear un red de

monitoreo y control en la que se realicen un mínimo de dos medidas anuales (una en época de aguas altas y otra en época de aguas bajas). Estas medidas deberían incluir medidas piezométricas para poder evaluar el comportamiento río-acuífero.

Las concentraciones de nitratos no son elevadas y sólo hay tres puntos en los que no se recomienda utilizar para uso de boca. Estos puntos han mostrado valores elevados en diferentes campañas de campo. La distribución de nitratos no muestra una relación evidente con los usos del suelo. No obstante, uno de los tres puntos presenta también elevadas concentraciones de pesticidas por lo que su origen es probablemente agrícola. Los otros dos puntos están cerca del río en la desembocadura. En éstos su origen puede ser tanto agrícola como de influencia del propio río.

En 5 puntos se superan las concentraciones de Hierro y/o Manganeseo recomendadas. Se atribuye a procesos locales. En un

punto, ubicado al lado del río, se supera en un orden de magnitud. No se recomienda el consumo de agua de estos pozos.

Las concentraciones de pesticidas detectadas en las aguas subterráneas y en las aguas del manglar son bajas. Sólo se detecta Hepta-cloro, Endosulfan Alfa, Dieldrín y Endosulfán Beta y mayoritariamente en concentraciones por debajo de los límites que recomiendan diferentes legislaciones internacionales. Sólo dos plaguicidas están por encima de estos límites, el Endosulfán Alfa y el Heptacloro, y ambos se localizan en el mismo punto, el **BJ11**. Se desaconseja totalmente el uso de agua en este punto.

Los pesticidas pueden acumularse también en los sedimentos o en el suelo y estos vectores no se han analizado. Se recomendaría ampliar el muestreo a estos otros medios y focalizarlo en los plaguicidas detectados en este estudio. La aplicación de buenas prácticas agrícolas debería ser un pilar básico de trabajo ya que protegería los trabajadores y a la dispersión y acumulación en el medio.

También se recomienda ampliar el muestreo caracterizando las aguas del río ya que pueden tener repercusión en la calidad de los acuíferos.

## 12 BIBLIOGRAFÍA

---

- American Public Health Association (APHA), the American Water Works Association (AWWA), and the Water Environment Federation (WEF). (2017) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23rd edition
- Asociación Comunitaria Unida por el Agua y la Agricultura (ACUA) (2016). Diagnóstico preliminar de la salinización de las fuentes de agua en comunidades de la península de San Juan del Gozo, cuenca El Espino o el Borbollón, departamento de Usulután y sus implicaciones en el incumplimiento del Derecho Humano al Agua. [www.acua.org.sv](http://www.acua.org.sv)
- Batres, I., Gómez, L.C. (2014). Balance Hídrico y análisis de calidad del agua en la cuenca del río San Antonio. Municipio de Nejapa. Departamento de San Salvador. Trabajo de Graduación. Universidad de El Salvador.
- Chaturvedi, R.S. (1973). A note on the investigation of ground water resources in western districts of Uttar pradesh. in Annual Report. U.p. irrigation Research institute. pp. 86-122
- Chávez Molina, L.M., Mejía Castellanes, M.E., Reyes Romero, O.A. (2012) Evaluación del índice de calidad de agua en la bahía de Jiquilisco, definición de metodologías de muestreo, validación y cuantificaciones analíticas para agua salada. Universidad de El Salvador. Memoria de fin de ingeniería química.
- COTO, E., et al. "Evaluación de la Explotación y Disponibilidad de Agua Subterránea y Análisis de Pruebas de Bombeo en el Acuífero del Área Metropolitana de San Salvador." *Trabajo de Graduación, para optar al grado de Ingeniero Civil. Engineering faculty, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA), El Salvador (1994).*
- Cuéllar, N, y de Larios S.(2001). Acceso al agua potable en El Salvador: Tendencias, perspectivas y desafíos. PRISMA 42. Programa salvadoreño de investigación sobre desarrollo y medio ambiente.
- Darko, G., Akoto, O and Oppong, C., (2008). Persistent organochlorine pesticide residues in fish, sediments and water from Lake Bosomtwi, Ghana. *Chemosphere*. 72(1): p. 21-4
- Empirik, K., & di Zon Tropika, K. K. (2013). Estimating groundwater recharge using empirical method: a case study in the tropical zone. *Sains Malaysiana*, 42(5), 553-560.

- Instituto de Investigaciones ITZTANI (2012). Análisis de la producción azucarera en El Salvador y sus vínculos con procesos de cambio del uso del suelo, la deforestación y degradación de ecosistemas forestales. Proyecto REDD/CCAD-GIZ- MARN-GIZ
- Losilla, M., Rodríguez, H., Schosinsky, G., Stimson, J. y Bethune, D. (2001). Los acuíferos volcánicos y el desarrollo sostenible en América Central. Editorial de la Universidad de Costa Rica. 205 pp.
- MARN (2004) Plan Nacional de Ordenamiento y Desarrollo Territorial. Diagnóstico. Sistema Biofísico. Volumen 2. Hidrología y recursos hídricos. 48 pp
- MARN (2016). Plan nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico de El Salvador, con énfasis en las Zonas Prioritarias. El Salvador. San Salvador, pag. 32-39, 78-79.
- PLAMDARH (1981) Plan Maestro de desarrollo y aprovechamiento de los recursos hídricos. Documento básico N° 11. Pag. 37
- PRISMA (2001). Estudio de la Intrusión de Aguas Salinas en la Zona Costera de la Bahía de Jiquilisco. San Salvador. Nelson Cuéllar.
- Pacheco R. (1995). Residuos de Plaguicidas en agua, sedimento y organismos acuáticos en la Bahía de Jiquilisco. Universidad de El Salvador.
- Renders, R. (2016) Huella hídrica del cultivo de la caña de Azúcar. Universidad “José Simeón Cañas”, El Salvador.
- Rodríguez, M. (2001). Diagnóstico situacional del uso de DDT en los Programas de Control de Vectores en El Salvador. Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social. Programa de Acción Integral (PAI).
- Sankaramakrishnan, N., et al., 2005. Organochlorine and organophosphorous pesticide residues in ground water and surface waters of Kanpur, Uttar Pradesh, India. *Environ Int*, 31(1): p. 113-20
- UCA-FIAES (2008) Determinación de la contaminación por plaguicidas en agua, suelo, sedimentos y camarones en los Cantones Salinas del Potrero y Sisiguayo de la Bahía de Jiquilisco. 76 pp
- Viladés M., Clarens, F., Chacón, W y Benegas, L. (2017) POLICY BRIEF: Percepción de la vulnerabilidad al cambio climático en la zona del Bajo Lempa. Proyecto Water Clima LAC. [www.waterLAC.eu](http://www.waterLAC.eu)
- WHO (2011). Guidelines for drinking-water quality. Fourth edition. WHO Library Cataloguing-in-Publication Data. ISBN 978 92 4 154815 1







**AMPHOS** 21

**CATIE**  
Solutions for environment and development  
Soluciones para el ambiente y desarrollo

**intec**  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

**WE & B**  
WORLDWIDE ENVIRONMENTAL  
BUSINESS FOR DEVELOPMENT  
W&B

**CONICET**

**EUROPE**  
for business

**CAD** CENTRO  
DE ALIANZAS  
PARA EL  
DESARROLLO

**UNI Q**  
Universitè Quisqueya  
Nuestra América, nuestro futuro

**Centro del Agua**  
para América Latina y el Caribe  
FEMSA Banco Interamericano de Comercio Exterior BID

**FCH**  
FUNDACIÓN CHILE

**ctm**  
CONSEJO TÉCNICO  
MILITARE