



DIAGNÓSTICO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS DE LA REGIÓN DE AQUIN Y SAINT-LOUIS DU SUD, HAITÍ



Proyecto WaterClima-LAC — Gestión de zonas costeras
EuropeAid/DCI/ENV/2014/350-470

DIAGNÓSTICO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS DE LA REGIÓN DE AQUIN Y SAINT-LOUIS DU SUD, HAITÍ

Proyecto WaterClima-LAC – Gestión de zonas costeras
2018

Autores principales

Roger Mas

Ester Vilanova

Barcelona, 2018



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: Edes Charles Philippe – CATIE Haití y Amphos 21

Agradecimientos: Ona Cornellà, Julia Tudela, Hugo Pascual, David Negro, Universidad de Quisqueya, Dra. Ketty Balthazard, el equipo de trabajo de campo y la población de la región de estudio en Haití. La publicación ha contado con la colaboración de los socios del proyecto.

Traducción al francés: Edes Charles Philippe

ÍNDICE

1	Proyecto WATERCLIMA-LAC.....	5
2	LA ZONA DE ESTUDIO.....	7
3	USOS DEL SUELO.....	9
4	CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS.....	11
5	LA PRECIPITACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	13
5.1	DATOS DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS.....	14
5.2	DATOS SATELITALES.....	16
5.3	DATOS CLIMÁTICOS FUTUROS.....	19
6	EL AGUA SUBTERRÁNEA.....	22
7	LOS ACUÍFEROS.....	23
8	ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO.....	25
8.1	CARACTERIZACIÓN IN-SITU.....	28
8.2	CARTOGRAFÍA PIEZOMÉTRICA.....	29
8.3	INTRUSIÓN SALINA.....	30
9	MODELO CONCEPTUAL.....	32
9.1	RECARGA.....	32
9.2	DESCARGA.....	32
10	PRESIONES Y CONTAMINACIÓN.....	34
10.1	NITRATOS.....	34
10.2	METALES.....	36
10.3	ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO.....	38
11	PROTECCIÓN Y TRATAMIENTOS.....	41
11.1	INTRODUCCIÓN.....	41

11.2	PROTECCIÓN	42
11.3	TRATAMIENTOS.....	44
12	RECOMENDACIONES	45
13	BIBLIOGRAFÍA.....	47

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 sobreponen 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 cogestión 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 de Aquin y Saint-Louis Du Sud, en Haití. Estos recursos son clave para la población, tanto para su desarrollo actual como futuro.



2 LA ZONA DE ESTUDIO

El presente estudio evalúa los recursos hídricos de la región costera de Aquin y Saint-Louis Du Sud en Haití (Figura 1). Además de estas dos comunas, la zona de estudio también incluye una parte de la comuna de Cavaillon. Los principales ríos dentro de esta región son el Mombin, el Millionnaire, el Brodequin, el Vieux d'Arquin, el Citron y el Bois d'Orme, quedando fuera el río Cavaillon (límite occidental) y el Côtes de Fer (límite oriental).

La zona de estudio está ubicada en el Departamento Sur de Haití, una región montañosa que actualmente ostenta una deforestación aproximada del 84.3%. El 42% del departamento tiene pendientes mayores al 60%, implicando que, con el aumento de la frecuencia de los ciclones y las tormentas, se genere una elevada escorrentía y como consecuencia provoque inundaciones y un aumento considerable de la erosión laminar de suelos (PNUD, 2012).

Estas inundaciones afectan a las principales poblaciones de la zona, ya que se encuentran asentadas en

la desembocadura de ríos principales o bien en zonas de llanuras costeras, como es el caso de Aquin, Saint-Louis Du Sud, Morrisseau y Malbranche. Aunque las inundaciones son frecuentes en la mayoría de partes bajas de las cuencas hidrográficas de América Latina, esta zona es más vulnerable debido a su localización dentro de la ruta de ciclones y tormentas del Caribe.

Estos sucesos causan un deterioro considerable de infraestructura y pérdidas de las cosechas, acrecentando la inseguridad de alimentos. La agricultura de subsistencia, dominante en la zona, se ve agravada por la inseguridad de la tenencia de la tierra, debilidad que favorece la explotación del recurso bosque y como consecuencia la degradación del suelo.

El manglar, ubicado en la parte baja de la cuenca, es un ecosistema de enorme importancia para la pesca por la gran cantidad de especies que alberga. Se ve afectado por la fuerte presión demográfica que coloniza estas zonas costeras y, especialmente, por las talas descontroladas

para la fabricación de carbón y madera para la construcción. También hay que tener en cuenta, como en toda zona costera, que las actividades contaminantes y procesos en las partes altas de la

cuenca repercuten en llanura costera donde aumenta la sedimentación y la contaminación. Se le suma aquí el efecto de basura no biodegradable y la no existencia de sistemas de saneamiento.

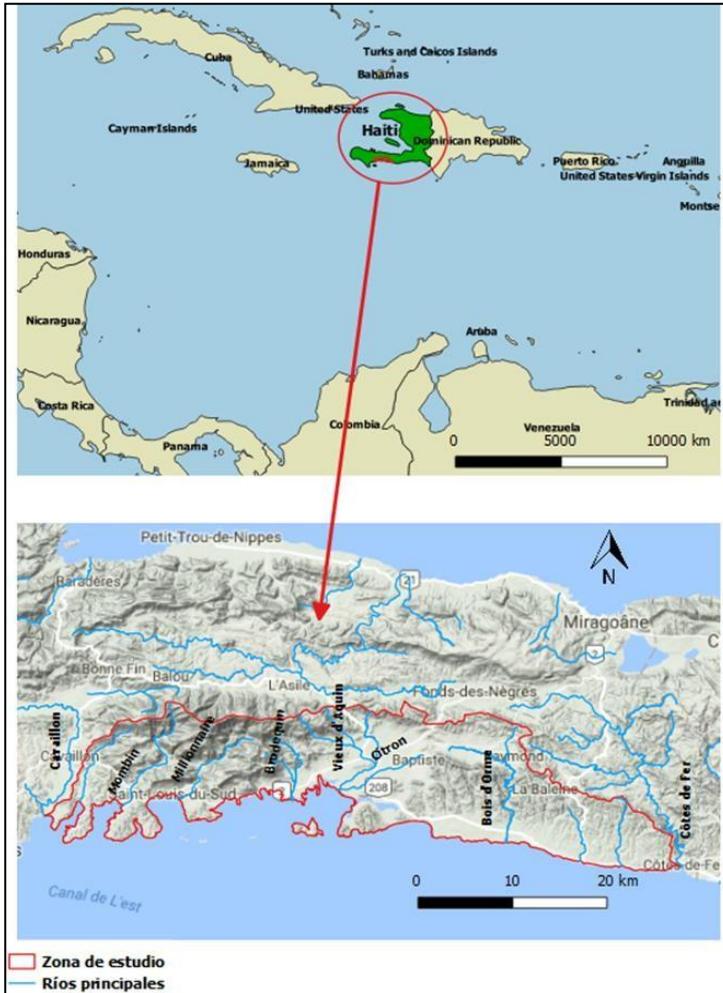


Figura 1. Ubicación zona de estudio.

3 USOS DEL SUELO

La principal actividad económica de Haití es la agricultura la cual emplea al 66% de su población. Esto se traduce en un uso del suelo prioritario para la agricultura de diferentes tipos. En la Figura 2 se observa que en Aquin dominan los sistemas agroforestales mientras que St. Louis du Sud los cultivos agrícolas. En total, en el Departamento del Sur, las áreas destinadas a la agricultura ocupan un 51% del suelo. Más en detalle se observa que la mayoría de las áreas cultivadas son de monocultivo (65.8%) y de éstas, una gran parte son para la autosuficiencia (32.7%), con cultivos de maíz, arroz, sorgo, habas, patata, plátano y mandioca principalmente (MARNDR, 2012).

Destacar que los cereales constituyen los principales cultivos con el 48.8%, seguido de las leguminosas (23.6%), las hortalizas (15.7%), las frutas y frutos secos (4.2%), cultivos oleaginosos (2%) y por último cultivos para bebidas y especias (1.1%). Los cereales más cultivados son el maíz (64.8%), sorgo (29.3%) y arroz (5.7%). En el caso de las legumbres son el frijol (62.4%) y el guandú (28.2%). En los cultivos de hortalizas predomina la

patata, y en los frutos destacan bananos y plátanos (96.2%). En el caso de los oleaginosos destaca el cacahuete (92.6%), mientras que en los cultivos para bebidas y especias son el café (76.4%) y el ají con el 22.1% (MARNDR, 2012).

La producción de estos cultivos en general ha disminuido en las últimas décadas debido a una menor productividad y rendimiento vinculado a la degradación de la tierra. La inseguridad de los derechos de la tierra es también una fuerte restricción para el sector (PNUMA, 2013).

De los 2,346,715 árboles y arbustos del Departamento Sur, un 78% son productivos, representados principalmente por bananos, plátanos, cocoteros, mango, cítricos, aguacates o cafetos. La superficie cubierta por bosques en el departamento es inferior al 3%. En el caso de la ganadería, el área ocupada es del 20% del departamento. El número de cabezas registradas es de 425,287, de las cuales el 32.7% son cabras, seguidas de cerdos y vacas con un 25.8% y 24.6% respectivamente (MARNDR, 2013a).

Se considera relevante tener en cuenta los usos del suelo por el potencial impacto que pueden tener sobre la calidad y cantidad de las aguas subterráneas. Los cultivos intensivos de cereal requieren elevados volúmenes de agua en una zona con problemas estacionales de escasez y afectada

por impactos del cambio climático. Malas prácticas agrícolas en la aplicación de fertilizantes y fitosanitarios pueden también aportar contaminantes (agroquímicos, nitratos, ...) a las aguas de consumo humano. Las zonas urbanas pueden ser fuentes de contaminantes de origen humano

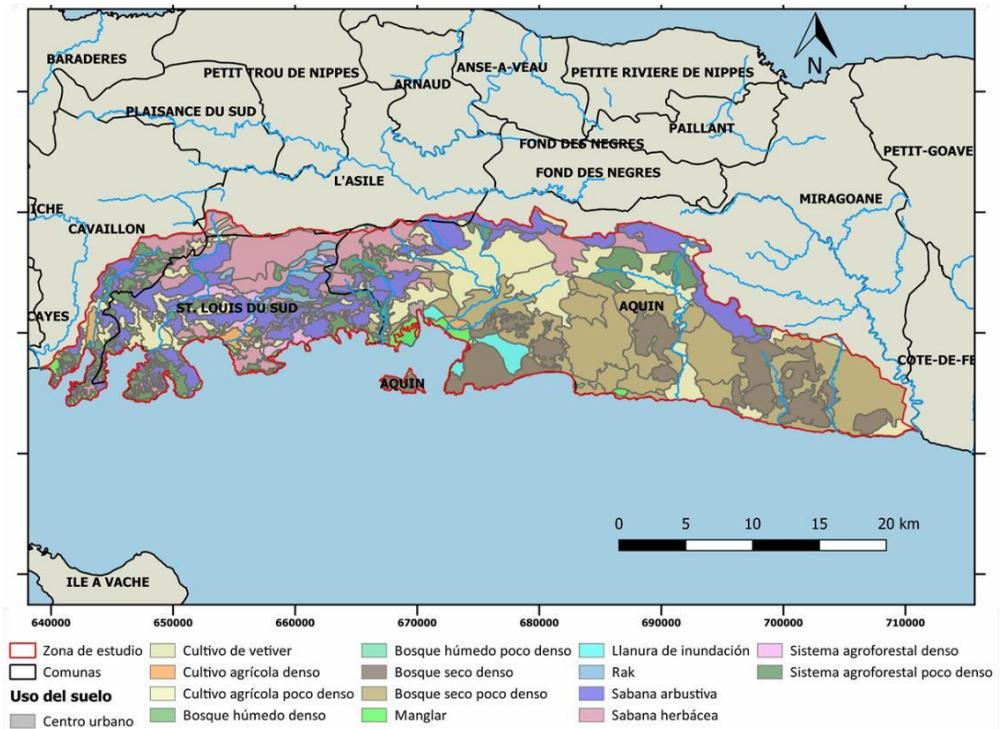


Figura 2. Usos del suelo en la zona de estudio.

4 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

Haití 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 secalluviosa y lluviosa-seca. A lo largo del año las temperaturas se mantienen estables mientras que en las precipitaciones se observan grandes oscilaciones.

En Haití se identifican diferentes regiones climáticas tropicales y la zona de estudio, más concretamente, se encuentra predominantemente entre clima desabana tropical (Aquin) y clima tropical de monzón (Saint-Louis Du Sud). Las precipitaciones totales medias anuales son al entorno de los 1225 mm/año para Aquin y de 2108 mm/año para Saint-Louis Du Sud. La temperatura media se sitúa alrededor de los 26.3 °C. Las precipitaciones son más elevadas en la parte alta de la cuenca y en la parte occidental (Figura 3). La existencia de dos estaciones (seca y húmeda) 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 agosto a octubre pueden ocurrir serias inundaciones por desbordamiento de los ríos, favorecidas por la deforestación y la poca infiltración, provocando pérdidas de cosechas y recursos.

Aunque algunas viviendas se han adaptado a estos fenómenos, la mayoría de la población es muy vulnerable, debido en gran parte a la falta de sistemas de alerta.

Es por estos motivos que en esta zona tan vulnerable queda mucho por hacer, como impulsar distintas iniciativas de mitigación y adaptación para que la población tenga una mayor resiliencia a estos fenómenos que, según las proyecciones climáticas, serán cada vez más frecuentes.

Diagnóstico de los recursos hídricos subterráneos de Aquin y Saint-Louis Du Sud

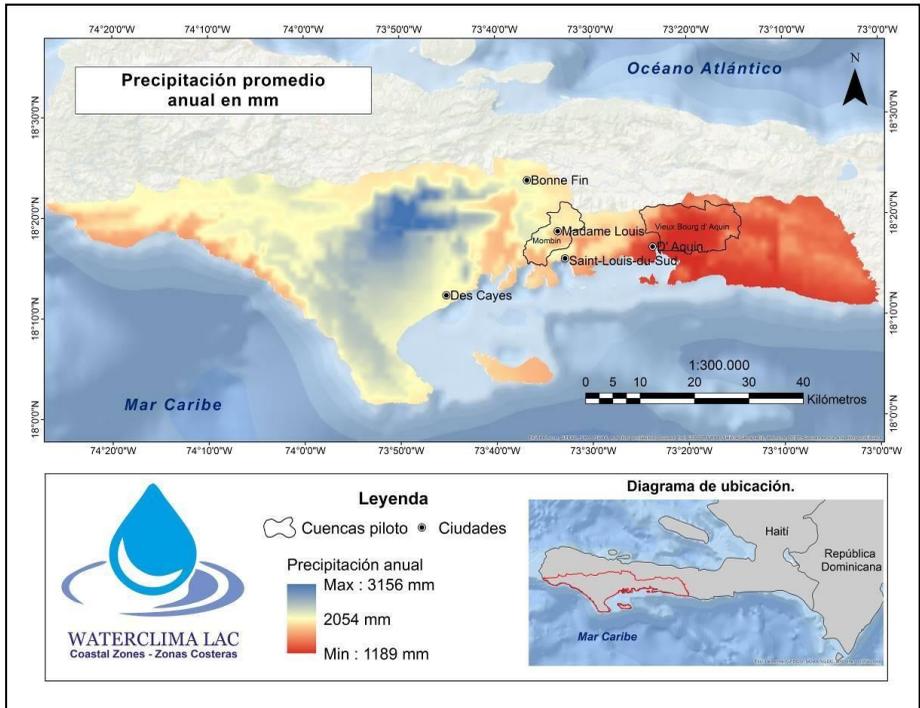


Figura 3. Precipitación promedio anual en el Departamento Sur (Birkel, 2016).



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 4 estaciones meteorológicas, dos de ellas dentro de la zona de estudio (Figura 4), y por otra a partir de datos satelitales para toda la extensión.

Los datos de estaciones meteorológicas son valores puntuales fiables de series temporales incompletas (acaban en 1990) mientras que los datos satelitales ofrecen series temporales completas pero hay que analizar su representatividad.

LA 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 4
Ubicación de las estaciones meteorológicas (fuente de datos: SNRE).

5.1 DATOS DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS

El Servicio Nacional de Recursos Hídricos de Haití (*Service National des Ressources en Eau* o *SNRE*) dispone de datos de estaciones que recogen valores diarios de precipitación y temperatura (Figura 4), dos de ellas se encuentran dentro de la zona de estudio (Aquin y Saint-Louis Du Sud) y otras dos se localizan muy cerca de la zona (Asile y Fonds-des-Nègres), no obstante, estas cuatro estaciones no funcionan regularmente desde los años 90. La estación con mayor número de datos es la de Fonds-des-Nègres con valores de 42 años, 25 de ellos completos (Tabla 1). Estos registros se tomaron desde el 1926 hasta 1990 con periodos sin datos. La estación de Saint-Louis Du Sud tiene un registro continuo de 40 años (1921-1960), 21 de ellos completos. Respecto las estaciones de Aquin y Asile, tienen registro de datos de 12 y 10 años respectivamente, sólo 2 años completos para Aquin y 3 para Asile. Estas dos estaciones cuentan un registro de datos muy

intermitente a lo largo del tiempo y con largos periodos sin registros.

Los datos de estas estaciones se utilizan para conocer un valor estimativo pero se considera que el cambio climático podría haber hecho variar estos valores tal y como se ha observado en otras zonas del caribe. .

LA PRECIPITACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO

El valor medio de precipitación de todos los datos registrados por la estación de Saint-Louis Du Sud (considerando sólo los años con series completas de datos) es de 2108 mm/año, mientras que en Aquin es de 1225 mm/año. En las Figuras 5 y 6 se observa que las precipitaciones se dividen en un periodo seco (noviembre-marzo) y periodo húmedo o lluvioso (abril-octubre). El mes con las precipitaciones más elevadas y más susceptible a problemas de inundaciones es octubre.

Tabla 1. Resumen de las características de las estaciones meteorológicas.
(Fuente de datos: SNRE)

	Aquin	Saint-Louis Du Sud	Asile	Fonds des Nègres
Serie de datos	1912 1915-1919 1942-1946 1987	1921-1960	1923-1928 1946 1978-1981	1926-1949 1964-1967 1977-1990
% años incompletos	83.30%	42.50%	70%	40.48%
Altitud (m)	20	14	125	396
Precipitación media anual (mm)	1225	2108	1429	1470

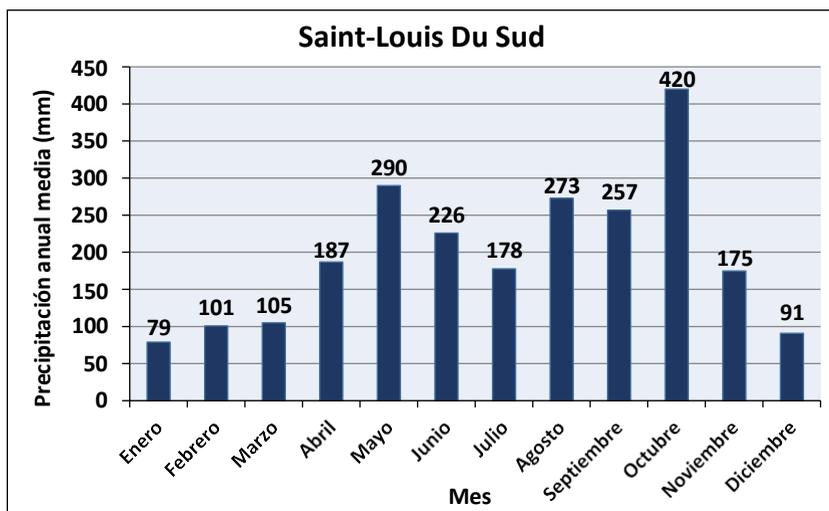


Figura 5. Precipitación promedio mensual para la estación de Saint-Louis Du Sud. (Fuente de datos: SNRE) (21 años de datos entre 1921-1960)

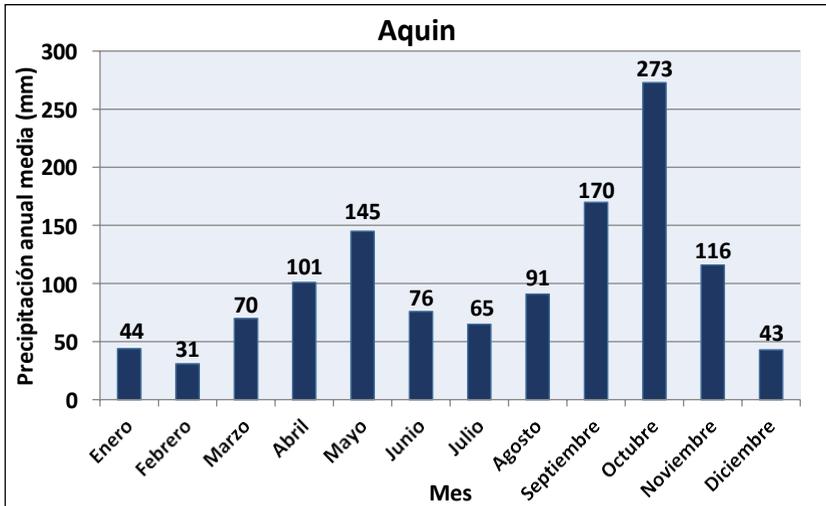


Figura 6. Precipitación promedio mensual para la estación meteorológica de Aquin. (Fuente de datos: SNRE) (10 años de datos entre 1912-1987)

5.2 DATOS SATELITALES

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

El interés en este tipo de datos se basa que permiten obtener estimaciones de datos en zonas donde no se dispone de registros.

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.

Amphos 21 ha validado esta información en zonas con datos disponibles obteniéndose aproximaciones aceptables.

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 automáticamente con datos pluviométricos mensuales del *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC).

Los datos diarios descargados para el presente estudio corresponden a las 6 celdas que recaen sobre la zona de estudio (Figura 7), entre 73.75°W y 73°W

de longitud, y 18°N y 18.5°N de latitud entre los años 1998 y 2015 (resolución espacial de 0.25°). La información satelital disponible incluye un dato diario para cada una de estas celdas. Hay que tener en cuenta que estos valores son el promedio estimado para toda la celda. En zonas llanas con precipitación homogéneo el valor será más representativo que en las zonas con relieve y variaciones espaciales notables en la precipitación. Los datos de estaciones meteorológicas, por el contrario, registran valores que son representativos sólo de ese punto de medida.

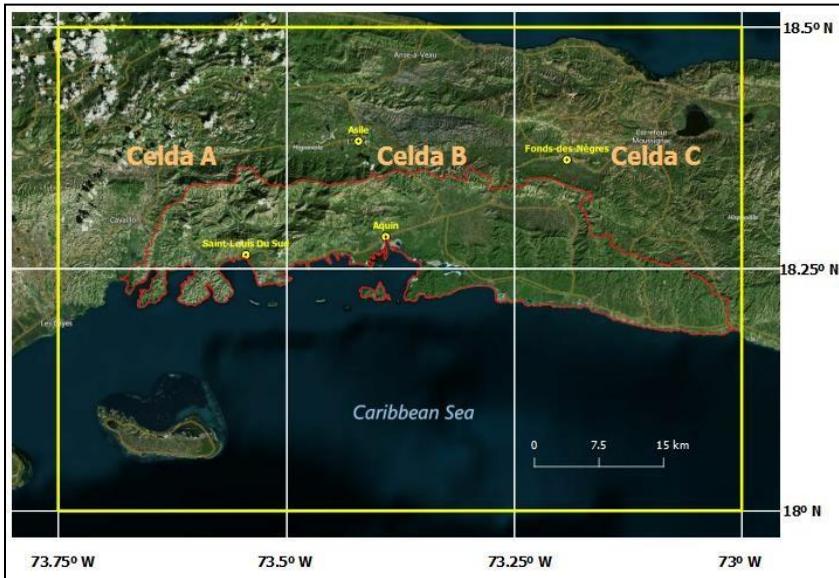


Figura 7. Celdas en que se divide la zona de estudio.

Se han calculado los acumulados anuales para cada una de las tres celdas (A, B y C) que están dentro de la zona de estudio y contienen alguna de las estaciones meteorológicas. La precipitación media que se obtiene con los datos satelitales es de 1974 mm/año para la celda A, 1585 mm/año para la B y 1540 mm/año para la celda C. Los mínimos anuales, correspondientes a los años más secos, son de 1180 mm/año y corresponden a la celda C, mientras que los máximos anuales, en los años más húmedos, llegan a 2291 mm/año, correspondientes a la celda A (Figura 9). Se trata de valores muy similares a los datos obtenidos de esas estaciones meteorológicas disponibles. Además, estos valores ayudan a completar la falta de datos registrados en esas estaciones a partir del año 1990.

En la Figura 8 Se han comparado los datos satelitales con los de las estaciones ubicadas en las mismas celdas, teniendo en cuenta que se trata de valores promedio para la celda y que corresponden a años distintos (algunos tienen más de 30 años). Se obtiene que las diferencias de los valores anuales promedio son inferiores al 20%.

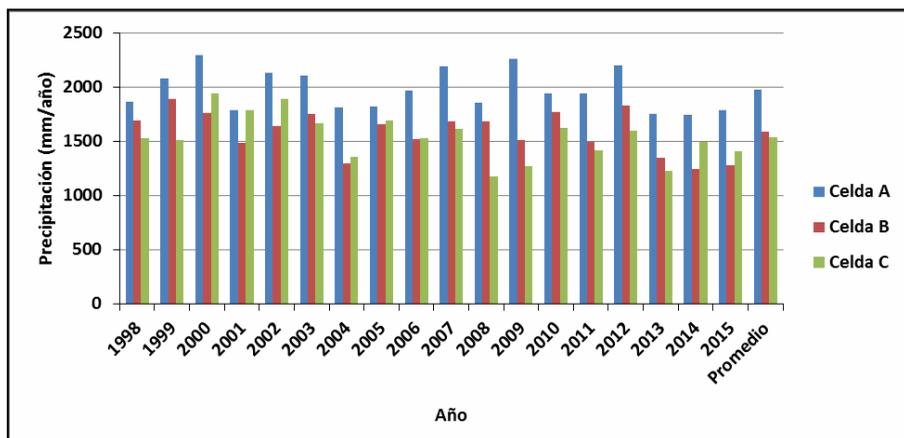


Figura 8. Precipitación anual y promedio calculada para cada celda.

5.3 DATOS CLIMÁTICOS FUTUROS

Los escenarios climáticos de futuro se determinan a partir de las previsiones publicadas por el IPCC y las previsiones de la NASA. Para el estudio de la región de Aquin y Saint-Louis Du Sud se ha considerado el escenario RCP 8.5 hasta el año 2100 (Figura 9).

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. No obstante, pueden aumentar los episodios de lluvias torrenciales, causantes de

inundaciones. Aunque haya un aumento de estas lluvias torrenciales, la precipitación anual acumulada tenderá a ser inferior cada año (se esperan 100mm/año menos en 2100). Esta tendencia de disminución de precipitaciones anuales, ya ha sido detectada por la población local, hasta el punto que un 67% de los encuestados en este proyecto han observado un cambio en el clima representado por una disminución de las precipitaciones y más sequía (Viladés *et al.*, 2017). Los correspondientes informes del IPCC también apuntan esta característica.

En las proyecciones también se observa que algunos años la precipitación acumulada podrá ser muy elevada y otros serán años de sequía, por lo que no habrá una tendencia uniforme respecto todos los años. Con todo ello, se puede concluir que es muy difícil realizar una previsión climática anual para los próximos años, pero se espera que los fenómenos meteorológicos extremos aumenten. Para todo ello es importante seguir estudiando el clima detenidamente en la región y tener en cuenta las previsiones de fenómenos extremos que se realizan para otras regiones de Centroamérica (Viladés *et al.*, 2017).

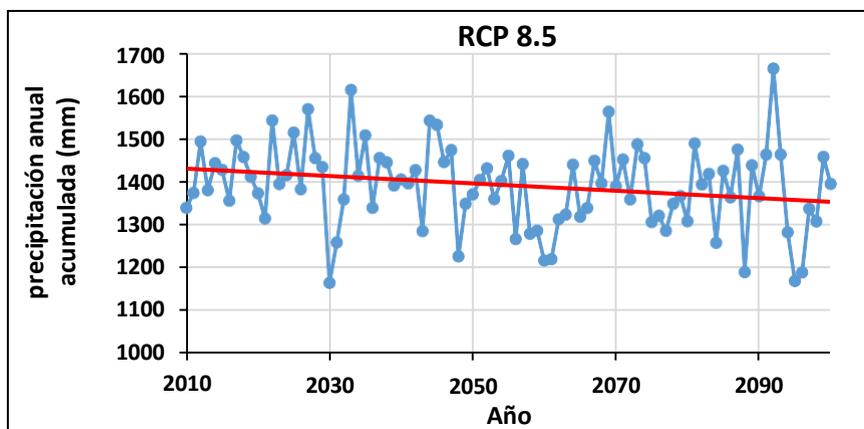


Figura 9. Previsiones de precipitación según escenario RCP8.5 (Viladés *et al.*, 2017).

El análisis anual y diario de los datos disponibles indica una tendencia al aumento de las precipitaciones máximas a partir del aumento de los máximos diarios resultando en un mayor riesgo de inundaciones (Tabla 2) aunque no una mayor precipitación anual. En la Tabla 3 se observa como los días con valores elevados de precipitación aumentan en el segundo periodo. En relación a la recarga de los 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. Además, la disminución del total anual reduce el total de agua disponible para la recarga.

Tabla 2. Análisis de datos satelitales

Celdas A, B y C	Periodo 1999- 2004	Periodo 2008- 2013
Número de años	6	6
Precipitación media (mm)	1788	1661
Número de días con precipitación ≥ 70 mm	92	139

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 AGUASUBTERRÁNEA

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 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 de 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 (red de monitoreo) y aun 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 de estudio corresponden a sedimentarios cuaternarios, constituidos principalmente por depósitos aluviales (arenas, gravas e intercalaciones limosas). No obstante, también hay una parte importante de la zona constituida por la Fm. Neiba (calizas, lutitas y materiales volcánicos) y la Fm. Dumisseau, (constituida por rocas basálticas) (Figura 11).

Los materiales del principal acuífero identificado en la zona son aluviales y se encuentran en la zona costera, por lo cual se clasifica como un acuífero costero aluvial. Este acuífero costero puede llegar a tener unas dimensiones considerables en la zona de Vieux- Bourg d'Aquin, donde se encuentran los ríos Brodequin, Citron y Vieux d'Arquin (Figura 12).

Según Adamson et al. (2016), el acuífero ubicado en esta zona se denomina Acuífero de la Llanura de

Aquin y cubre gran parte de la llanura costera. Este acuífero no está confinado en su mayor parte. La profundidad del nivel freático varía entre 0 y 60 m. El principal uso de este acuífero es para riego y para el abastecimiento de poblaciones localizadas en su área de influencia (MARN, 2012).

El acuífero costero aluvial (Figura 13A) está en contacto con un acuífero de materiales volcánicos (poco productivo) ubicado entre Aquin y Saint-Louis Du Sud, y otro de cárstico en la parte alta, en la zona de Asile (Figura 13B).

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

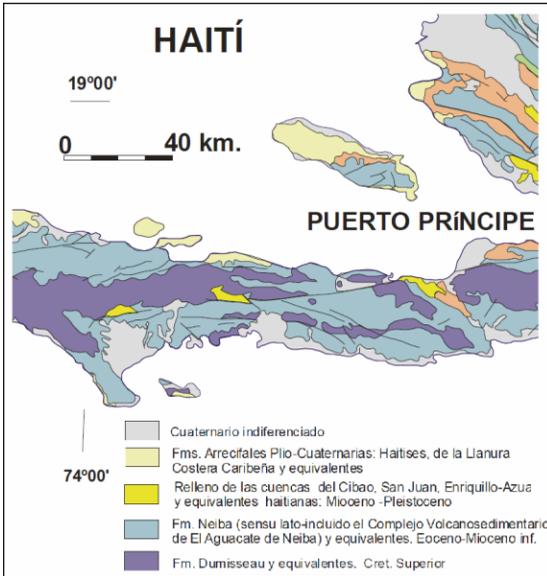


Figura 11. Mapa geológico de la zona de estudio. (Bernárdez, 2004).

Figura 12. Mapa de los recursos hídricos de la zona de estudio (Adamson et al., 2016).





Figura 13. Acuífero costero aluvial (A) y acuífero cársico en la parte alta de la cuenca (B). (Adamson et al., 2016).

8 ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO

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

El PNUD en 2012 realizó un extenso inventario de pozos (más 200 puntos) que se ha utilizado como base de este estudio (Figura 14). Asimismo, la Universidad de Quisqueya en 2016 y dentro de este proyecto, realizó un inventario y muestreo de manantiales, con un total de 76 puntos. Para el presente estudio se tuvieron en cuenta ambos inventarios (características de los puntos, distribución, representa-

tividad, uso...) y se seleccionaron 60 puntos de agua para caracterización y toma de nivel y parámetros in-situ. Por distintas incidencias de campo, estos puntos seleccionados pasaron a ser 47 muestrados en 2016 (Figura 15).

A partir de la información de esta primera campaña de campo se diseñó una red de monitoreo que constaba de 20 puntos y es donde se recomienda tomar valores en potenciales sucesivas campañas de muestreo. En estos puntos se llevó a cabo una segunda campaña de campo en 2017 en la que se recogieron muestras de agua de estos 20 puntos para su análisis en laboratorio (Figura 15). En esta

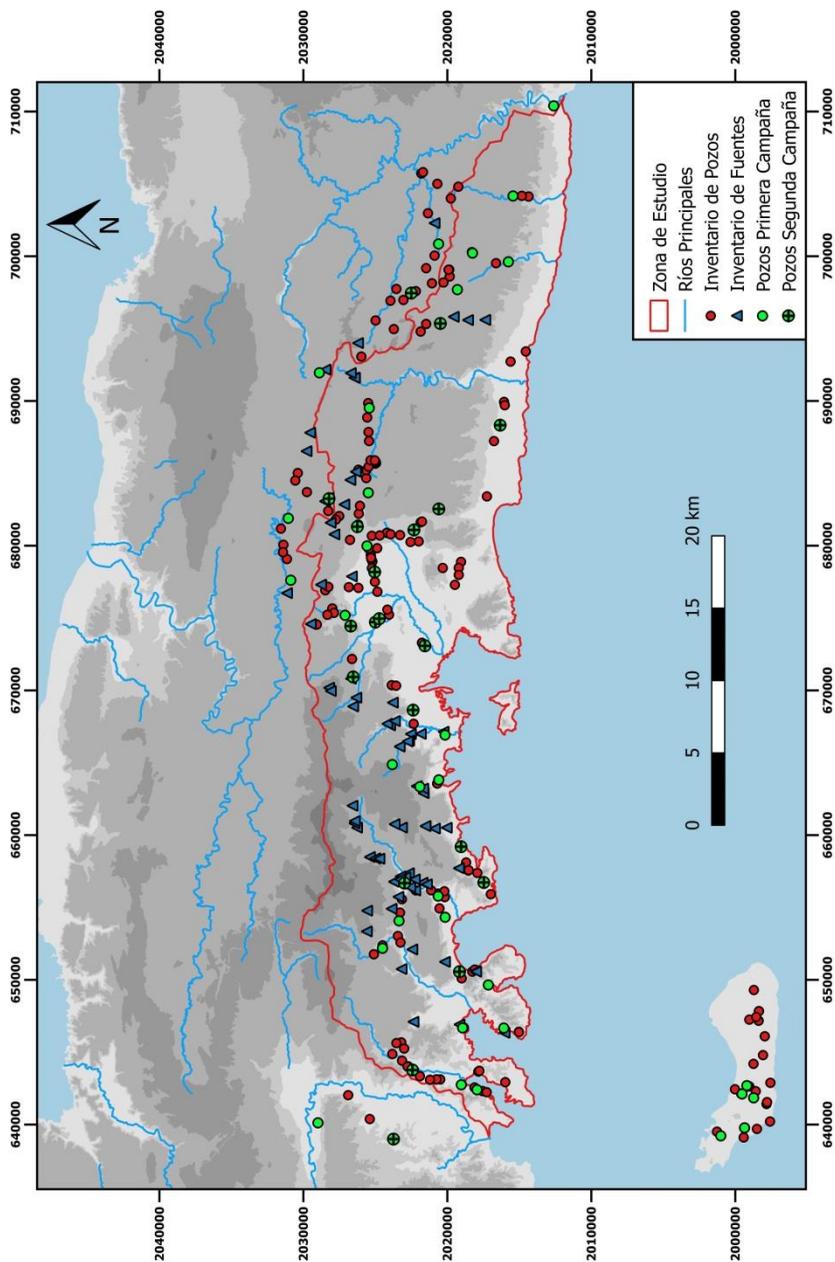


Figura 14. Ubicación de todos los pozos y fuentes que se han tenido en cuenta para este estudio.

segunda campaña de campo, se analizaron parámetros mayoritarios para caracterizar el tipo de agua, contaminantes de origen agrícola, metales más habituales y bacterias de origen fecal. Los parámetros a analizar se escogieron en función de los disponibles en el laboratorio de la DINEPA pero cabe destacar que por problemas analíticos, no pudieron finalmente analizar el Na. Este estudio ha concluido con un modelo conceptual de funcionamiento del sistema hídrico de la

región y del acuífero aluvial. Esto permite conceptualizar el movimiento del flujo de agua del acuífero y los potenciales impactos derivados de actividades humanas. La elaboración de la cartografía piezométrica muestra la dirección de las principales líneas de flujo y en algunos casos las zonas con bombeos importantes. La información hidroquímica permite evaluar el estado cualitativo de las aguas subterráneas y emitir recomendaciones para su uso y consumo.

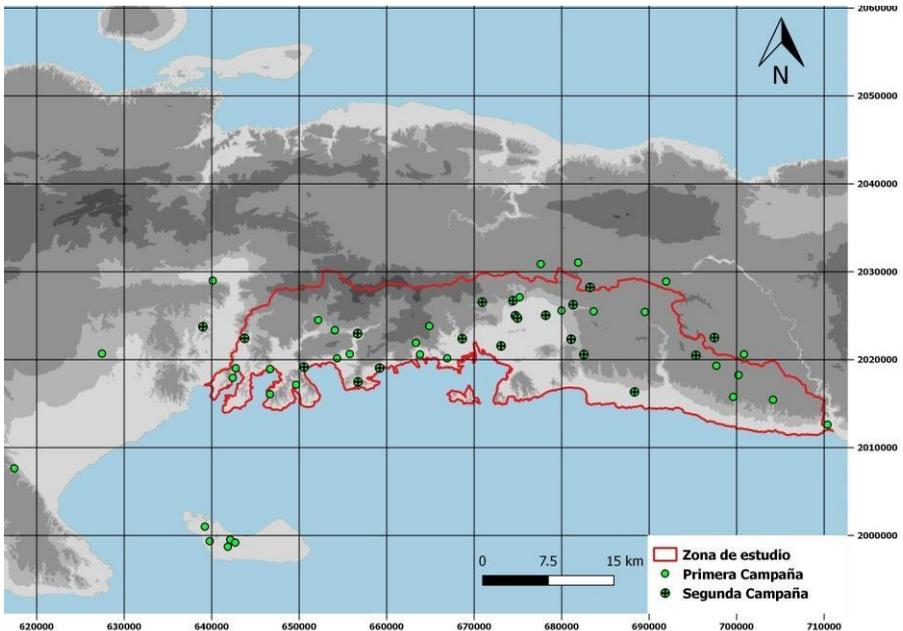


Figura 15. Puntos seleccionados para su caracterización y muestreo.

8.1 CARACTERIZACIÓN IN-SITU

De abril a diciembre de 2016 se visitaron 47 puntos de agua en 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 (Figura 16). También se analizó el contenido en



Figura 16. Toma de datos in-situ.

nitratos y nitritos mediante tiras reactivas y se midió el nivel piezométrico

para la elaboración de la cartografía. Se dispone de una ficha de caracterización para cada uno de los puntos visitados (Figura 17).

En la segunda campaña de campo, en 2017, se recogieron muestras de agua y se transportaron al laboratorio de la DINEPA.

La recogida y transporte de muestras se realizó siguiendo los protocolos recogidos en el Standard Methods (APHA et al., 2017).

1	AMPHOS²¹				
2	INVENTAIRE DES POINTS D'EAU SOUTERRAINE			CODE	A7FRK015
4	Technicien/Institution		Germain Yvon	X_LTM	700845
5	DATE/HEURE	07/06/2016 4h15PM	COMMUNE	Aquin	Y_LTM 2020612
6	TOPONYME	Zone Rurale	SECTION CC	Frangipane Te	Z (GPS) 282m
7	LOCALITE	Ka Dena	SECTION CC	Frangipane Te	AUTRE CODE GCP03
8	PROPRIETAIRE DU POINT RESPONSABLE DU POINT	Andre XXXX XXXX	Tel	3826-XXXX	HORAIRE
9	TYPE DE POINT D'EAU		Puits profond/tube/Puits manuel/Piezometre/Source...		Autre type de point:
10	ACCES-1-on /echantillonnage?	SI / No		Point de reference donnee de niveau	
11	DIAMETRE (mm)	15cm	PROFONDEUR (m)	Niveau d'eau (m) -lecture sonde-	Soie en maconnerie (cm)
12	POMPE (type)	manuel	Q (l/s)	Usage de l'eau:	Public / prive
13	MOTEUR (type)		MARQUE	Approvisionnement	Habitant.
14	Puissance (KW/CV)		Cap. Nom (l/s)	irrigation	Superficie
15	Frequence pompage (heures/journee):		Industriel		
16	Etat du point d'eau: Puit séché		Autres usages:		
17	Description entourage du puits (agricole, urbanise, ... activites...)				
18	Observe-t-on des indices de contamination?				
19	QUALITE DES POINTS D'EAU				
20	CE (µS/cm)	pH		T (°C)	
21	Nitrites (mg/L)	Nitrites		Pot redox	
22	Autres		pris l'échantillonnage		La couleur et l'odeur sont-elles normales?
23	Observation		Plan/schéma situation		
	Puit communautaire séché et abandonné				

Figura 17. Ficha de recogida de datos.

8.2 CARTOGRAFÍA PIEZOMÉTRICA

La representación de los niveles freáticos permite la elaboración del mapa piezométrico (Figura 18). Hay que tener en cuenta que es una representación del funcionamiento hidrogeológico de la época de toma de datos, abril-diciembre 2016, corresponde a la época lluviosa de un año seco.

La piezometría indica que la dirección principal de flujo es de norte a sur, es decir, de parte alta a parte baja de la cuenca, hacia el mar, con pequeñas inflexiones locales. La piezometría sigue en gran medida la topografía. Se ha elaborado el mapa piezométrico de la zona del acuífero aluvial que coincide con la llanura costera. Este acuífero limite al noreste con el acuífero carbonatado y al noroeste con el volcánico. Con los datos disponibles no es posible asegurar la conexión hidráulica entre estos acuíferos aunque los datos puntuales de los que se disponen apuntan en este sentido. Es importante recordar que los acuíferos cársticos pueden contar con una doble porosidad que puede ser controlada por vías kársticas de circulación preferenciales. Los datos de los que se disponen no permiten caracterizar el funcionamiento hidráulico del sistema cárstico.

Se observa que el río presenta un comportamiento efluente y drena al acuífero. De esta manera, el agua del río procede principalmente del acuífero, por lo menos durante esta época del año. En otro año o época o incluso en otro sector del río podría invertirse el sentido siendo el río una fuente de recarga del acuífero.

En la parte más baja del acuífero se observa una disminución del gradiente piezométrico, de manera paralela a la topografía. En el acuífero cárstico el gradiente aumenta notablemente y evidencia un comportamiento hidráulico distinto.

Tanto en la región de la llanura de Aquin como en el sur de Saint-Louis Du Sud, las zonas más llanas, se identifican entradas de agua del mar la cual cosa condiciona la piezometría local, y resulta en un proceso de intrusión salina. La explotación de pozos costeros en esta zona agravaría el problema.

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).

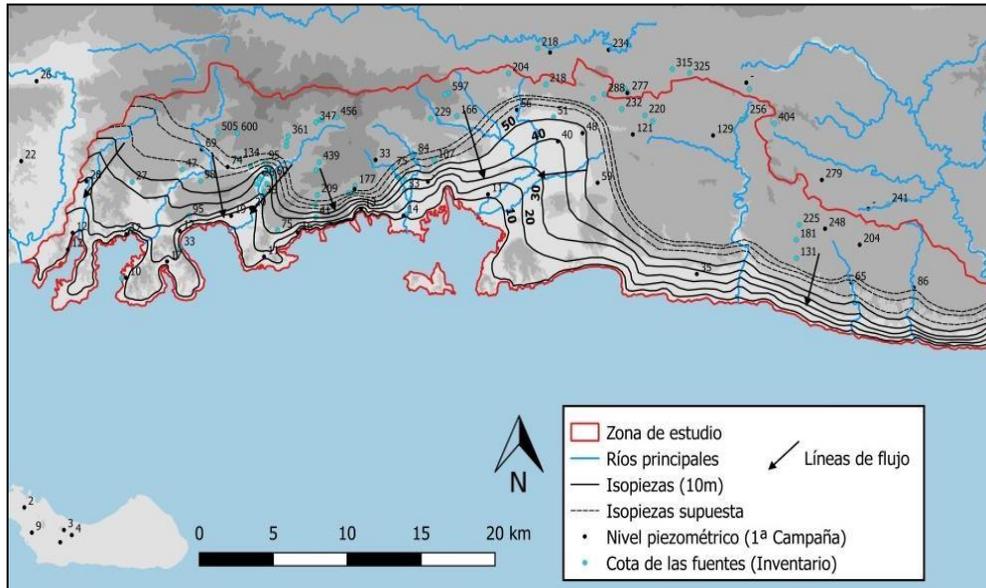


Figura 18. Mapa piezométrico de la zona de estudio.

8.3 INTRUSIÓN SALINA

Con los datos de la primera campaña de abril-diciembre del 2016 se ha analizado el estado de la salinización en el acuífero aluvial costero de la Llanura de Aquin. Se utiliza el valor de conductividad eléctrica por estar directamente relacionado con la salinidad. El mapa de la Figura 19 muestra la distribución de la salinidad evidenciando que las zonas con mayores concentraciones de sal se localizan cerca de la costa y, por lo tanto, se produce un proceso de intrusión salina. En las zonas alta de la cuenca se identifican valores elevados de conductividad eléctrica, de entre 1000-1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Esta salinidad es debida a la interacción del agua del acuífero con las rocas por las que circula, las cuales dan una mineralización al agua. No obstante, la salinidad en el tramo bajo, en la zona de la llanura costera, no puede atribuirse únicamente a un proceso de interacción con las rocas y se atribuye a la mezcla con agua de mar.

Como resultado, en esta época del año, se identifica una zona de

aproximadamente 500 hectáreas en la zona de Saint-Louis Du Sud con valores de salinidad por encima de los recomendados por la Unión Europea (conductividad eléctrica superior a 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$). En la llanura de Aquin, donde el acuífero costero aluvial tiene una mayor extensión, se identifica una gran área con unos valores superiores a 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ que llega hasta más de 10 km tierra adentro. No obstante, en esta zona más próxima a la costa y susceptible de problemas de intrusión salina, los valores no superan en ningún caso los 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

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. La presencia de canales que entran tierra adentro también afecta negativamente a la salinidad del acuífero.

La explotación intensiva de pozos cerca de la costa es un factor importante que puede agravar este proceso. Esta cartografía se

elaboró en la época lluviosa que es cuando hay más flujo de agua dulce y por lo tanto probablemente refleje el mejor estado que el acuífero presenta a lo largo de un año. Se esperaría que en época seca, con la consiguiente disminución de la recarga en la cuenca, hubiera un avance de la cuña salina. Aunque en la cartografía realizada la llanura de Aquin no aparece como una zona altamente afectada por la entrada de agua salina, este proceso de intrusión salina puede llegar a

afectar a la población de manera importante en época de aguas bajas. En este sentido, se identifican concentraciones de cloruros más elevadas a las que perturbarían según la geología evidenciando por lo tanto la presencia actual y en otros periodos de este proceso.

Como consecuencia, se recomienda realizar otra campaña de campo en época seca para poder el alcance del proceso de intrusión salina.

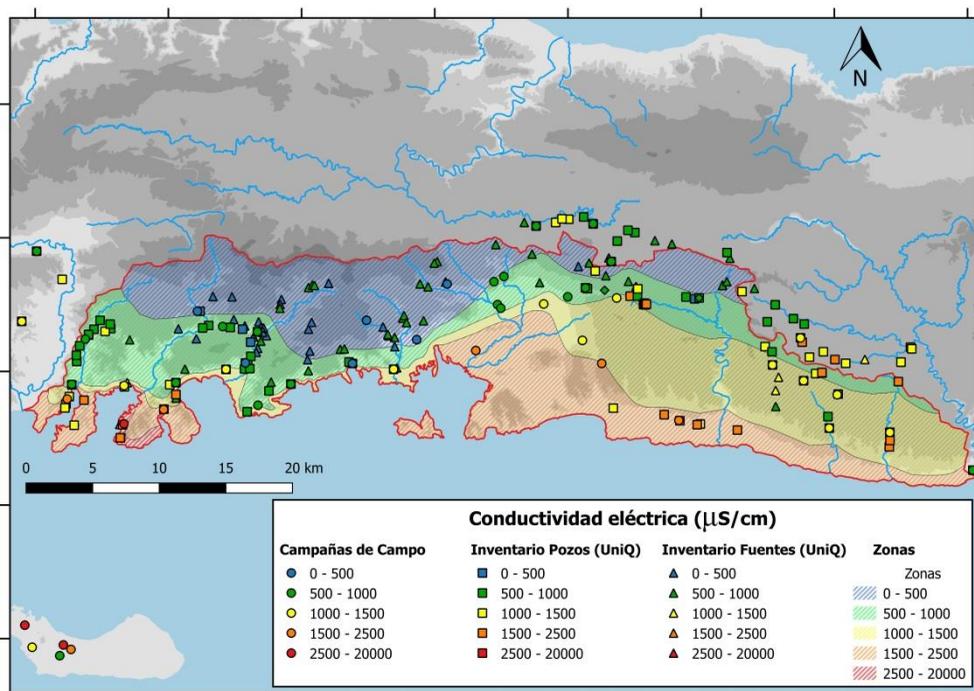


Figura 19. Mapa de isoconductividades.

9 MODELO CONCEPTUAL

En el acuífero costero aluvial de la llanura de Aquin, las principales recargas al acuífero son por precipitación sobre el mismo. Además, cuenta con entradas laterales a través de los acuíferos cárstico y volcánico aguas arriba. La descarga del acuífero se produce hacia el mar y temporalmente hacia el río. En las salidas hay que sumar las extracciones de agua para abastecimiento pero especialmente para riego agrícola siendo este sector el principal consumidor de agua subterránea.

9.1 RECARGA

La recarga al acuífero depende del terreno, de su pendiente, de la vegetación, de la sequedad o humedad, etc. Cuando no se dispone de toda esta información, se puede aproximar este parámetro mediante métodos empíricos con la ecuación de Chaturdevi (1973) realizada por el UP U.P. Irrigation Research Institute (IRI) que ha

sido aplicada satisfactoriamente en otras zonas tropicales (Empirik, 2013). La recarga promedio calculada corresponde al 15% de la precipitación anual, que oscila del 17% los años más secos al 12 % en los años más húmedos.

9.2 DESCARGA

La piezometría indica que durante la época lluviosa, el río supone una fuente de descarga del acuífero, ya que éste alimenta al río. Este carácter efluente del río puede variar tanto temporal como espacialmente en función de las características del medio y de la precipitación.

El flujo subterráneo natural desemboca en el mar siendo una de las principales salidas de agua. Este flujo se ve minorizado por extracción de estos caudales a través de pozos y captaciones y puede limitarse a zonas del acuífero.

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. La presencia de canales naturales en la zona

costera también favorece la salinización del agua subterránea de esta zona. No obstante, la salinidad no siempre indica un flujo neto hacia el interior.

Estado actual del acuífero

El mapa piezométrico y el estudio de la conductividad eléctrica ponen de manifiesto la existencia de un proceso inicial de intrusión salina en la zona costera de Saint-Louis Du Sud y en la llanura de Aquin. Como resultado, una pequeña franja de la zona costera presenta valores de salinidad por encima de los recomendados por la OMS para el consumo humano ($>2500 \mu\text{S}/\text{cm}$). Pero en otras zonas si bien no son tan elevados, sí que son valores superiores a los que se esperaría si no hubiera intrusión. Esto señala que los valores pueden ser más elevados en otras épocas del año y que hay un riesgo real que el avance la intrusión salina progrese con los años. Hay que tener en cuenta que el ascenso salino se produce gradualmente hasta llegar a un valor crítico por encima del cual asciende muy rápidamente. Es importante evitar llegar a este valor.

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 y prever problemas futuros. También se recomienda disminuir las extracciones de agua en los pozos más próximos a la costa.

10 PRESIONES Y CONTAMINACIÓN

En el presente estudio se ha evaluado el estado cualitativo del acuífero respecto distintas presiones de origen antrópico sobre el medio. También se han analizado las concentraciones de coliformes relacionadas con el saneamiento.

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 ningún problema medio-ambiental. Pero cuando los niveles de nitrato exceden el máximo de 50 mg/l en el agua, puede suponer un riesgo para la población si se consume. 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. El elevado y continuado consumo de nitratos (cuando se identifican concentraciones

superiores a 50 mg/L) 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 valores. 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.



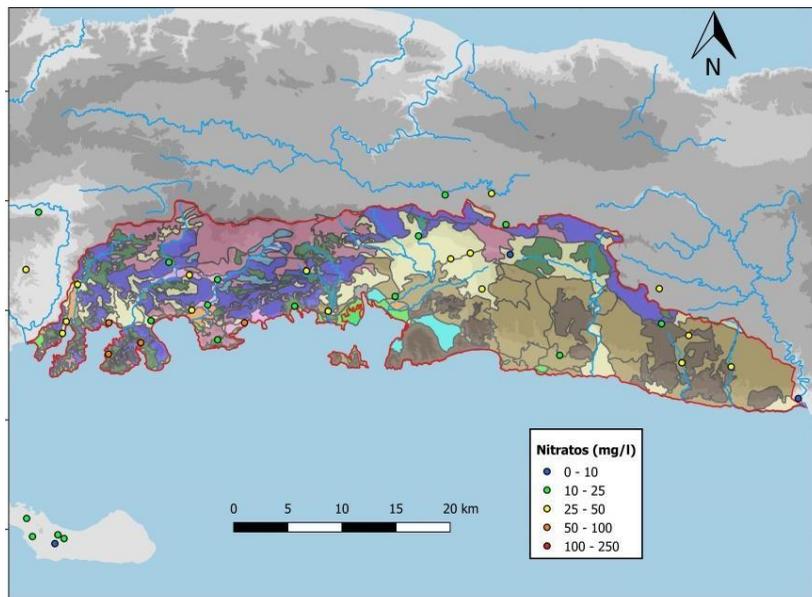


Figura 20. Distribución de nitratos en abril-diciembre 2016. Leyenda usos del suelo en Figura 2.

Durante la primera campaña de campo (abril - diciembre 2016) se midieron los nitratos en todos los puntos visitados mediante tiras reactivas que dan un rango de valores (Figura 20). Se seleccionaron los puntos más representativos y, en la segunda campaña (mayo - julio 2017) (Figura 21), los nitratos se analizaron en el laboratorio.

En la representación de los nitratos sobre los usos del suelo

(Figuras 20 y 21) 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 llanura de Aquin. Los datos estimados con las tiras reactivas, utilizadas en la primera campaña, sobreestiman ligeramente los valores pero ofrecen un valor orientativo muy útil.

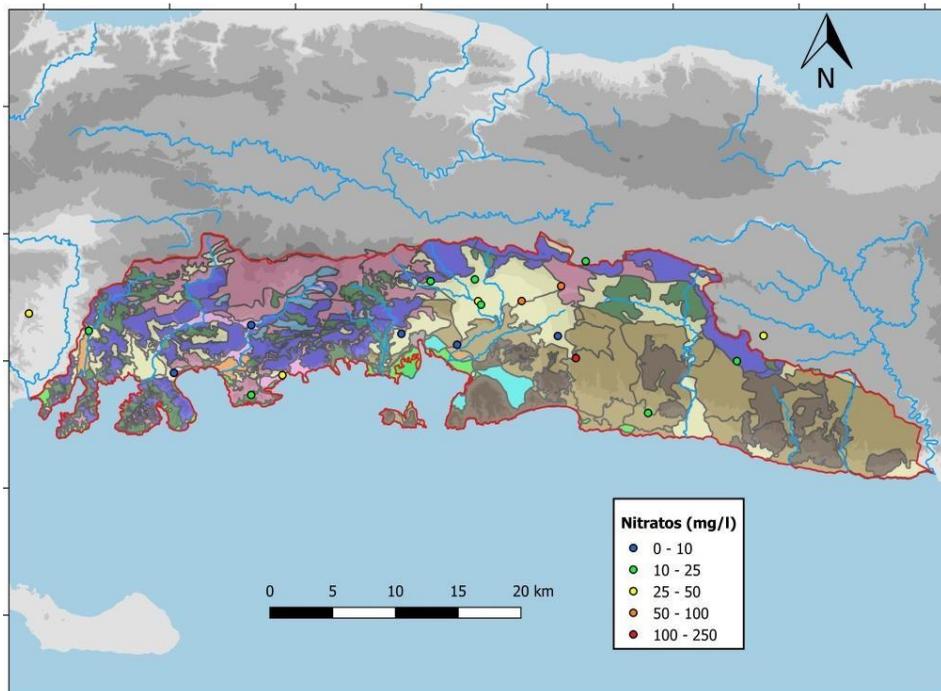


Figura 21. Distribución de nitratos en mayo – julio 2017. Leyenda usos del suelo en Figura 2.

10.2 METALES

En la segunda campaña de campo se analizaron las concentraciones de hierro (Fe), zinc (Zn) y aluminio (Al). Los resultados se han comparado con los límites establecidos por la

Organización Mundial de la Salud (OMS). Debido a que los valores de Al y Zn no superan los límites establecidos, solo se representan los del hierro (Figura 22).

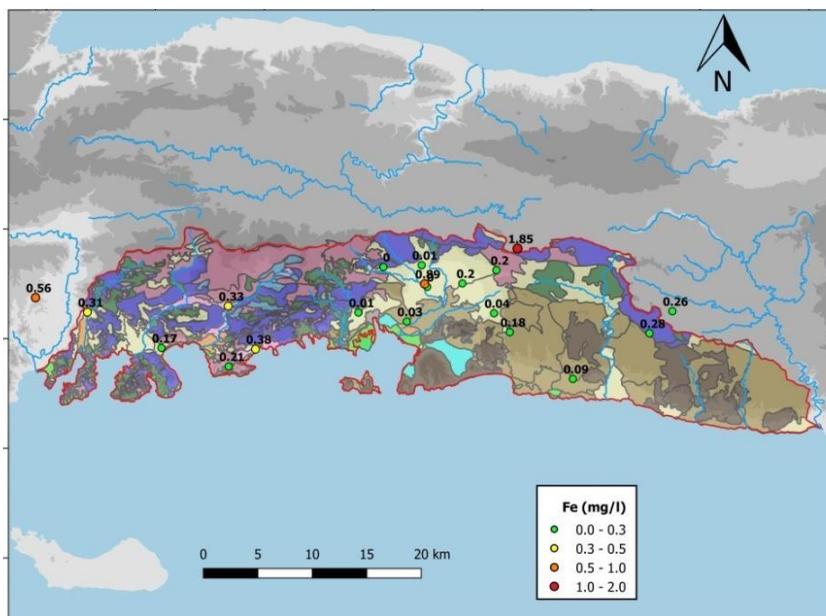


Figura 22. Distribución espacial de hierro (abril – julio 2017).

La distribución espacial del hierro tampoco presenta relación con los usos del suelo. El límite que la OMS establece para el hierro es de 0.3 mg/l. Este valor es superado por seis de los veinte puntos muestreados. Especialmente, hay tres puntos con valores muy elevados, de 0.56, 0.89 y 1.85 mg/l, aunque dos de ellos quedan fuera de la zona de estudio. No se observa correlación con otros parámetros y se atribuye a actividades locales o a mezcla con agua que puede llevar vertidos de actividades aguas arriba.

Puntualmente se observan valores de hierro (Fe) por encima de los valores establecidos por la OMS. Por lo tanto, no se recomienda el uso de estos puntos de agua para el consumo humano, especialmente en los más elevados: 0617-NA-2 (0.56 mg/l), 0417-NA-3 (0.89 mg/l) y 0517-NA-4 (1.85 mg/l).

Los puntos con mayores concentraciones de nitratos son 0417-NA-4, 0417-NA-1 y 0417-NA-2, con 50.5, 73.5 y 123.1 mg/l respectivamente. En éstos se recomienda tomar el agua con precaución o evitar tomarla.

10.3 ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

Además de los nitratos y los metales, en la segunda campaña, para determinar la calidad del agua también se realizó un análisis microbiológico. Concretamente, se analizaron coliformes totales, coliformes fecales, pseudomonas, recuento de gérmenes a 36°C, levaduras y moho, además de presencia de patógenos y bacterias concretas como *Escherichia Coli*.

Los resultados de estos análisis, muestran una baja calidad de las aguas subterráneas en la mayoría de los pozos muestreados (Tabla 3). Los límites establecidos por la OMS son de <1 CFU/100ml para coliformes fecales, pseudomonas, patógenos, *Escherichia Coli* y levaduras y moho. Para el número de gérmenes a 36 °C, este límite es de <20 CFU/100ml.

Bacterias coliformes

Las bacterias coliformes son un grupo de microorganismos que se encuentran comúnmente en el suelo, aguas superficiales y plantas. También están presentes en los intestinos de animales y humanos. Las bacterias coliformes que la lluvia arrastra por el suelo, usualmente quedan atrapadas en las rocas y a medida que el agua pasa por las rocas llega a los sistemas de agua subterránea. Sin embargo, los pozos que no están bien construidos o no están bien sellados pueden proveer una puerta para que las bacterias coliformes entren al agua subterránea y contaminen el agua de abastecimiento de la población.

Aunque la mayoría de las bacterias coliformes generalmente no causan enfermedad, los niños y las personas de edad avanzada tienen un mayor riesgo de enfermarse. Además, estas bacterias pueden ser indicadores de la presencia de organismos que pueden causar enfermedades (patógenos). Los organismos que causan enfermedades suelen tener su origen en excrementos y desechos procedentes del sistema de saneamiento. El subgrupo más común de estas bacterias es *Escherichia Coli*.

Todos los puntos exceden los límites establecidos para los **gérmenes y pseudomonas**, mientras que el número de **coliformes fecales** excede los límites en todos ellos, a excepción de uno.

La mitad de los pozos muestreados, diez de los veinte totales, sobrepasan los límites establecidos para el contenido de **levaduras y moho** en el agua. Además, cuatro de ellos con presencia de ***Escherichia Coli***, que es un tipo de bacteria que indica la presencia de contaminación por excrementos y de la cual algunas cepas pueden causar enfermedades.

Por último, en seis de los pozos muestreados, se ha detectado la presencia de **patógenos**, los cuales provocan enfermedades en el organismo que las ingiere. Algunas de las bacterias patógenas más destacadas son *Salmonella*, *Legionella* y *Helicobacter pylori*. Por este motivo, se recomienda que no se utilice el agua de estos puntos directamente para

consumo humano. Además, se debería realizar una revisión de estos pozos para determinar el origen de esta contaminación por materia fecal y tratar de remediar este foco.

No obstante, tanto el agua de los pozos con presencia de patógenos como los que muestran presencia de coliformes fecales, debería ser tratadas antes de utilizarse para consumo humano, básicamente una desinfección. De esta manera se reduce la posibilidad de contraer una enfermedad por la ingestión de estas aguas. También se recomienda realizar una campaña de campo más completa que analice más pozos de la zona para ver si este problema de contaminación de bacterias de origen fecal se extiende a lo largo de la región. El hecho de que la distribución espacial de esta contaminación de origen fecal sea de manera generalizada (Figura 23) se atribuye a una falta de saneamiento y de protección de las captaciones..

Tabla 3. Valores de contaminantes fecales en el agua subterránea indicando el límite permitido según legislación internacional.

MUESTRAS	Coliformos fecales	Escherichia coli	Gérmenes a 36°C	Patógenos	Pseudomonas	Levaduras y Moho
Unidades	CFU/100ml	CFU/100ml	CFU/100ml	Presencia	CFU/100ml	CFU/100ml
Límite	< 1	< 1	< 20	NO	< 1	< 1
0717-NA-1	22	2	>200	SI	>200	47
0417-NA-1	70	0	>200	NO	>200	<1
0417-NA-3	4	0	>200	NO	>200	<1
0417-NA-4	0	0	52	NO	38	<1
0417-NA-2	2	0	146	NO	136	<1
0517-NA-1	>200	20	>200	NO	>200	>200
0517-NA-3	12	0	>200	NO	>200	>200
0517-NA-2	8	0	>200	NO	>200	>200
0517-NA-4	88	0	>200	NO	>200	>200
0717-NA-2	14	0	>200	NO	148	70
0717-NA-3	>200	>200	>200	SI	>200	>200
0717-NA-4	36	0	>200	NO	>200	60
0717-NA-5	>200	96	>200	NO	>200	>200
0717-NA-6	16	0	>200	SI	>200	55
0617-NA-2	>200	0	>200	NO	19	<1
0617-NA-3	>200	0	>200	NO	>200	<1
0617-NA-4	>200	0	>200	SI	8	<1
0617-NA-1	>200	0	>200	NO	59	<1
0617-NA-1	>200	0	>200	SI	12	<1
0617-NA-2	98	0	>200	SI	52	<1
LAQ	>200	<1	>200	-	>200	-
GEAQ	<1	<1	20	-	<1	-
GEAQ1	<1	<1	>200	-	<1	-
CCSS	>200	<1	>200	-	>200	-
BBCV	>200	>200	>200	-	>200	-

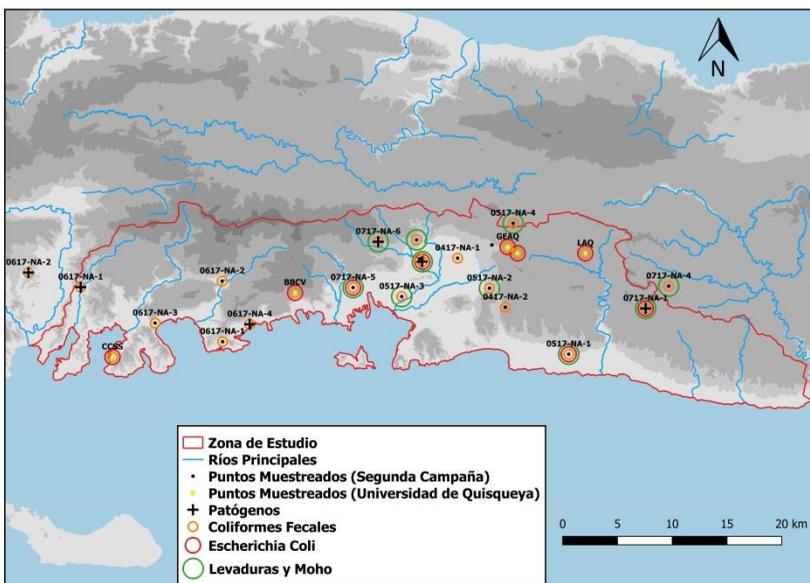


Figura 23. Distribución espacial de las bacterias fecales detectadas en la segunda campaña y en el muestreo de la Universidad de Quisqueya.

11 PROTECCIÓN Y TRATAMIENTOS

11.1 INTRODUCCIÓN

Para poder establecer medidas de prevención, protección y tratamiento de los recursos hídricos es importante conocer el origen de los contaminantes, si es el caso.

En general, en la calidad del agua influyen factores tanto naturales (fauna, flora, geología, etc.) como derivados del uso humano. Estas pueden ser puntuales (descargas de aguas residuales, vertidos de aguas fecales...) o no puntuales (agua de escorrentía urbana y actividad agrícola). También hay que sumarle el estado de los pozos ya que si están mal construidos o poco protegidos aumenta el riesgo de contaminación.

En esta zona de estudio han evaluado diferentes tipos de contaminantes:

- Los nitratos pueden proceder de malas prácticas agrícolas y de vertidos domésticos (no conexión a red de saneamiento). Se observa que si bien hay aportes de estos contaminantes de origen humano no son aún muy elevados y sólo limitan el uso para uso de boca puntualmente. No obstante, el hecho que se detecten sugiere intervenir ahora para evitar que las concentraciones vayan en aumento. La implementación de una red de monitoreo permitiría ver tendencias en este sentido.
- De todos los metales analizados sólo se detectó puntualmente elevadas concentraciones de hierro pero en valores muy por encima de los recomendados en diferentes legislaciones. Estas concentraciones pueden deberse tanto a un origen natural (si bien de momento no se han identificado rocas con hierro en esta zona) como a características de la propia captación como a vertidos en el medio fruto de la actividad humana. Se desaconseja el uso de esta agua para consumo.

- Se ha medido la conductividad eléctrica y la concentración en cloruros para evaluar el estado de la salinización del acuífero costero. La intrusión salina es variable a lo largo del año y en la época en que se realizó el muestreo se observó que el proceso de intrusión salina afectaba a la mayor parte del acuífero aluvial pero en niveles aún no demasiado elevados.
- Contenido microbiológico. Prácticamente todas las captaciones presentan presencia de coliformes, gérmenes y distintas bacterias. Además se detectan también patógenos en algunas muestras. Como consecuencia, es necesario proteger estas captaciones y realizar un tratamiento a esta agua antes de ser consumida.

11.2 PROTECCIÓN

Los acuíferos poco profundos y/o no confinados son los más vulnerables a la contaminación. En los acuíferos confinados los niveles confinados impermeables suponen una protección adicional al acuífero. En los acuíferos libres no existe esta protección natural y la zona no saturada ejerce una función protectora mediante filtración e interacción con el suelo. No obstante, si la zona no saturada es poco profunda (nivel piezométrico cercano a la superficie) el acuífero es vulnerable a la contaminación ya que los contaminantes pueden alcanzar más fácilmente el

reservorio subterráneo. En los acuíferos cársticos en los que hay cavidades y vías preferenciales de flujo la vulnerabilidad también es muy elevada. Este tipo de acuíferos vulnerables pueden estar expuestos a contaminación por las descargas o filtraciones domésticas, zonas no conectadas a saneamiento, pérdidas de las redes de alcantarillado, fosas sépticas, prácticas agrícolas, etc.

Los acuíferos costeros además son vulnerables a la contaminación por intrusión salina desde el mar. La reducción de flujos de agua salada al mar y las extracciones de agua en las

zonas costeras favorecen estos procesos.

Para la prevención de la intrusión salina requiere una disminución de las extracciones o una redistribución de los puntos de bombeo hacia zonas menos vulnerables a la intrusión salina. La prevención de la contaminación debida a actividades humanas (parámetros microbiológicos y nutrientes) puede realizarse a partir del control de las actividades humanas que pueden tener impacto sobre la calidad del agua. En este sentido, se recomienda aplicar perímetros de protección a las captaciones utilizadas para consumo humano. En función de los parámetros hidráulicos se establecen tres perímetros o zonas concéntricas de protección alrededor de un pozo. En la zona más próxima al pozo, donde los contaminantes tienen tiempos de tránsito bajos hacia el pozo, se limitan prácticamente todas actividades que pueden tener impacto: fosas

sépticas, letrinas, agricultura, Esta zona además puede impermeabilizarse para aumentar la protección... En el segundo nivel de protección se recomienda limitar sólo ciertas actividades de menor impacto y así sucesivamente. Todas estas recomendaciones para la prevención de la contaminación se pueden consultar en la guía para la calidad del agua potable (WHO, 2011).

En caso de la construcción de nuevas captaciones se recomienda tener en cuenta las actividades humanas antes de su ubicación. También es muy importante proteger las captaciones para prever la entrada directa de contaminantes al agua de consumo humano. Todos los pozos deben estar cerrados, tapados y protegidos. Un pozo bien sellado, revestido e impermeabilizado además minimiza problemas de contaminación.

11.3 TRATAMIENTOS

Tras la protección del agua de origen, las siguientes barreras contra la contaminación del sistema de abastecimiento de agua de consumo son las operaciones de tratamiento del agua, incluidas la desinfección, y la eliminación de contaminantes por medios físicos.

La desinfección consiste en la destrucción de microorganismos patógenos y es una operación fundamental que muy frecuentemente se realiza mediante productos químicos reactivos como el cloro. La desinfección constituye una barrera eficaz para numerosos patógenos (especialmente las bacterias) durante el tratamiento del agua de consumo y debe utilizarse tanto en aguas superficiales como en aguas

subterráneas expuestas a la contaminación fecal.

La desinfección con cloro del agua de consumo si bien es una medida que se recomienda aplicar, hay que tener en cuenta que ayuda a reducir el riesgo de contraer enfermedades si bien no garantiza la total seguridad. Tiene una eficacia limitada frente a algunos protozoos patógenos y frente a algunos virus. La eficacia de la desinfección puede también ser insatisfactoria en caso de turbidez elevada por lo que hay que controlar este parámetro.

Puede medirse y controlarse fácilmente la concentración de algunos desinfectantes del agua de consumo, como el cloro, y se recomienda realizar análisis frecuentes si se practica la cloración del agua (WHO, 2011).

12 RECOMENDACIONES

En general, los datos recopilados indican que el estado cualitativo no es satisfactorio pero aún no es grave y con ciertas actuaciones se puede consumir el agua mayoritariamente. En este sentido, hay parámetros a los que hay que prestar especial atención, implementar acciones de corrección y hacer un seguimiento del avance para evitar que progrese la contaminación y acontezca irremediable .

Por un lado, los resultados sugieren un proceso de salinización del acuífero debido a entradas de agua del mar que se ve agravado por la explotación de los cercana a la costa. La sobreexplotación de esta zona costera en épocas o años secos podría repercutir en el estado del acuífero y limitar su uso futuro. Dentro de la zona de estudio, se ha identificado una franja en la costa de unas 500 hectáreas donde la actual salinización supera los límites recomendados por la OMS. No se recomienda utilizar el agua subterránea de esta zona 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 del 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.

En 6 puntos se superan las concentraciones de hierro recomendadas. Se atribuye a procesos locales. En un punto, se supera seis veces el límite establecido. No se recomienda el consumo de agua de estos pozos.

La presencia de contaminantes microbiológicos como coliformes fecales en las aguas subterráneas excede los límites establecidos por la OMS en 19 de los 20 pozos muestreados, y es muy alta en la mayoría. Además, la mitad de los pozos muestreados sobrepasan los límites establecidos para el contenido de levaduras y moho en el agua. Cuatro de estos pozos tienen presencia de *Escherichia Coli*. Este tipo de bacterias, juntamente con bacterias patógenas, las cuales se han detectado en seis pozos muestreados, pueden provocar enfermedades como la *Salmonella*. Por este motivo, se recomienda que el agua de estos puntos no sea utilizado para consumo humano sin tratamiento. Además, se debería realizar una revisión de estos pozos para determinar el origen de esta contaminación por materia fecal, realizar medidas de protección del pozo frente a esta contaminación y un tratamiento de estas aguas contaminadas.

También se recomienda ampliar el muestreo caracterizando las aguas

de los ríos, ya que estos pueden tener repercusión en la calidad de los acuíferos y, por consiguiente, en los pozos que se utilizan para el consumo humano.

Los datos satelitales de precipitación y la aplicación de los modelos climáticos de predicción del cambio climático indican una tendencia a la disminución de las precipitaciones anuales y un aumento de los eventos extremos. La disminución de las precipitaciones supondrá un incremento de la intrusión salina y por lo tanto una disminución de la calidad de los recursos. Por otro lado, el aumento de los episodios extremos de precipitación incrementará los episodios de inundaciones y la escorrentía y por lo tanto el riesgo de contaminación. Como consecuencia, es aún más importante establecer medidas de protección de las captaciones.

13 BIBLIOGRAFÍA

- Adamson, J.K., Jean-Baptiste, G. y Miner, W.J. (2016). Summary of groundwater resources in Haiti. Wessel, G.R., and Greenberg, J.K., eds., *Geoscience for the Public Good and Global Development: Toward a Sustainable Future: Geological Society of America Special Paper 520*, p. 1–22, doi:10.1130/2016.2520(14).
- 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.
- Bernárdez, E. (2004). Mapa geológico de la República Dominicana a escala 1:50.000. Hoja de Mao (5974-1). República Dominicana. Consorcio IGME-BRGM-INYPSA. Cartografía Geotemática, Proyecto K Julio 2002/Octubre 2004.
- Birkel, C. (2016). Caracterización del comportamiento hidrológico actual, bajo escenarios de cambio de cobertura y escenarios futuros de clima de la región hidrológica de Aquin/Saint-Louis Du Sud, Haití. Proyecto Water Clima LAC. www.waterLAC.eu.
- CIESIN (2012). *Land Use and Land Cover Baseline Report. Data and analysis of land use and land cover practices*, South Department, Haiti. Center for International Earth Science Information Network. Earth Institute, Columbia University.
- 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.
- 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.

- IPCC (2014). Cambio Climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resumen para responsables de políticas.
- MARNDR (2012). Résultats provisoires du Recensement général de l'agriculture (RGA) au Département Du Sud. Ministère de l'agriculture, des ressources naturelles et du développement rural.
- MARNDR (2013a). Résumé des résultats du Recensement général de l'agriculture (RGA) au niveau national. Ministère de l'agriculture, des ressources naturelles et du développement rural.
- PNUD (2012). Rapport sur les infrastructures d'eau potable dans les communes Aquin, Saint-Louis du Sud et Cavaillon. Ministère de l'Environnement/Programme de Nations Unies pour le Développement, 16 p.
- PNUMA (2013). Haïti – République Dominicaine: Défis Environnementaux dans la zone frontalière. Programme des Nations Unies pour l'Environnement. GEO Haïti - State of the Environment Report. PNUD: Haïti. ISBN: 978-92-807-3343-3.
- Viladés, M., Clarens, F., Nadeau, J., Benegas, L. y Charles, E. (2017) POLICY BRIEF: Perception de la vulnérabilité au changement climatique dans la zone de Aquin et Saint Louis Du Sud, Haïti. Proyecto Water Climate LAC. www.waterLAC.eu.
- WHO (2011). Guidelines for drinking-water quality. Fourth edition. WHO Library Cataloguing-in-Publication Data. ISBN 978 92 4 154815.



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
WORLDWIDE

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
MILITAR