

Universidad de Costa Rica

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería de Biosistemas

Práctica Dirigida de Graduación para optar por el grado académico
de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL MUESTREO AMBIENTAL
EFICIENTE DEL ION NITRATO EN AGUAS SUPERFICIALES Y SUELOS
DE UNA FINCA BANANERA EN EL CARIBE COSTARRICENSE**

María Angélica Zamora Espinoza

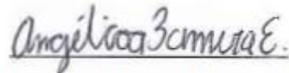
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

2022

Hoja de aprobación

Esta práctica dirigida fue aceptado por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar al grado y título de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.



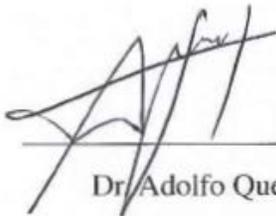
María Angélica Zamora Espinoza

Estudiante



Dr. Juan Salvador Chin Pampillo

Director Proyecto Final de Graduación



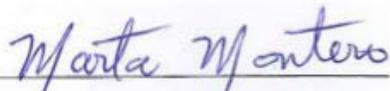
Dr. Adolfo Quesada Román

Comité asesor



Lic. Veda Obando Bustos

Comité asesor



Dra. Marta Montero Calderón

Presidente Tribunal Examinador



Dr. Ronald Aguilar Álvarez

Miembro Tribunal Examinador

Dedicatoria

Para mi familia, en especial a mis padres Vilma y Jorge, por su apoyo incondicional.

Agradecimientos

A Dios, por ser mi fortaleza y darme salud, protección y bendiciones.

A toda mi familia, por su presencia, consejos y generosidad.

A Juan Carlos Porras, por su motivación, compañía, amor y paciencia.

A don Mauricio Porras, doña Lucrecia Salas y Mauricio José, mi segunda familia, por su cariño, bondad, sabiduría y consejos.

A doña Maricel Guzmán y don Carlos Sandí, por su hospitalidad y atenciones.

A Ana Sandí y a Alonso Mata, por su amistad y compañía.

Al comité asesor de esta práctica dirigida conformado por el Dr. Juan Salvador Chin Pampillo, Dr. Adolfo Quesada Román y Lic. Veda Obando Bustos, por su acompañamiento, disposición y compromiso.

A don Jorge Sauma, gerente general de la Corporación Bananera Nacional S.A (CORBANA), por permitirme desarrollar esta investigación. Además, al personal de CORBANA, especialmente de la Sección Suelo-Planta por el trabajo y colaboración.

Finalmente, a Universidad de Costa Rica, Escuela de Biosistemas y al Centro de Investigación en Contaminación Ambiental (CICA) por todos los recursos y facilidades brindadas.

Índice

Hoja de aprobación

Dedicatoria

Agradecimientos

Índice de abreviaturas **I**

Índice de figuras **III**

Índice de tablas **IV**

RESUMEN **1**

ABSTRACT **3**

1. INTRODUCCIÓN **5**

1.1. Justificación 5

1.2. Objetivos 7

1.2.1. Objetivo general 7

1.2.2. Objetivos específicos 7

2. MARCO TEÓRICO **8**

2.1. Generalidades del cultivo de banano en Costa Rica 8

2.2. Régimen de precipitación en la Región Caribe de Costa Rica 9

2.3. Corporación Bananera Nacional (CORBANA) 10

2.4. Ion Nitrato (NO_3^-) 11

2.4.1. Ciclo del nitrógeno 11

2.4.2. Fertilizantes nitrogenados 11

2.4.3. Proceso Haber-Bosch 12

2.4.4. Características del ion nitrato (NO_3^-) en suelo y agua superficial	12
2.4.5. Metodologías para cuantificar ion nitrato (NO_3^-)	12
2.4.6. Pérdida de ion nitrato en campo	13
2.4.7. Antecedentes de ion nitrato (NO_3^-) en fincas bananeras	14
2.5. Sistemas de información geográfica (SIG) y modelos geoespaciales	14
2.5.1. Geomorfometría y parámetros morfométricos	15
2.6. Modelo Lineal Generalizado (GLM)	16
3. MATERIALES Y MÉTODOS	17
3.1. Área de estudio	17
3.2. Recopilación de la información	18
3.3. Modelo geoespacial	20
3.4. Muestreo ambiental ion nitrato	21
3.5. Diseño experimental	22
3.6. Programa de muestreo	23
3.7. Muestreo de agua superficial	26
3.8. Análisis de las muestras de agua superficial	27
3.9. Muestreo de suelo	28
3.10. Análisis de muestras de suelo	28
3.11. Análisis estadístico	29
3.12. Modelo Lineal Generalizado (GLM)	29
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
4.1. Modelo geoespacial	31
4.1.1. Pendiente (S) y factor de longitud de la pendiente (LSF)	31
4.1.2. Índice de rugosidad del terreno (TRI)	31
4.1.3. Índice topográfico de humedad (TWI)	33
4.1.4. Acumulación del flujo (FA)	34

4.1.5. Superposición de las capas	35
4.2. Muestreo ambiental ion nitrato	36
4.2.1. Concentración de ion nitrato en agua superficial	37
4.2.1.1. Validación modelo geoespacial	38
4.2.1.2. Modelo Lineal Generalizado (GLM)	39
4.2.1.3. Comparación tratamiento de coberturas	41
4.2.1.4. Muestreo convencional	44
4.2.2. Concentración de ion nitrato en suelo	45
4.2.2.1. Comparación tratamiento de coberturas	45
4.3. Hoja divulgativa	47
5. CONSLUSIONES	48
6. RECOMENDACIONES	50
7. REFERENCIAS	57
Apéndice A: Metodología modelo geoespacial	58
Apéndice B: Prueba de estabilidad ion nitrato	59
Apéndice C: Modelo Lineal Generalizado (GLM)	60
Apéndice D: Capas de variables geomorfométricas	63
Modelo de Elevación Digital	63
Pendiente	64
Factor de Longitud de la Pendiente (LS Factor).	65
Índice de rugosidad del terreno (TRI).	66
Índice topográfico de humedad (TWI)	67
Acumulación del flujo	68
Modelo geoespacial	69

Apéndice E: Concentración de ion nitrato en agua superficial y suelo	70
Apéndice F: Hoja divulgativa	72

Índice de abreviaturas

AIC	Del inglés <i>Akaike Information Criterion</i>
CORBANA	Corporación Bananera Nacional
DEM	Modelo de Elevación Digital, del inglés <i>Digital Elevation Model</i>
EIS	Electrodo de ión selectivo
ENOS	El Niño-Oscilación del Sur
ESRI	Del inglés <i>Environmental Systems Research Institute</i>
FA	Acumulación del flujo, del inglés <i>Flow Accumulation</i>
FAO	Del inglés <i>Food and Agriculture Organization</i>
GLM	Del inglés <i>General Linear Model</i>
IMN	Instituto Meteorológico Nacional
ISA	Del inglés <i>Ionic Strength Adjuster</i>
LS Factor	Factor de longitud de la pendiente, del inglés <i>Slope Length Factor</i>
RGB	Cámara de imagen real (rojo, verde y azul), del inglés <i>red, green, and blue camera</i>
SAGA	Del inglés <i>System for Automated Geoscientific Analyses</i>
SIG	Sistemas de Información Geográfica
<i>Slope</i>	Pendiente
TRI	Índice de rugosidad del terreno, del inglés <i>Terrain Ruggedness Index</i>
TWI	Índice topográfico de humedad, del inglés <i>Topographic Wetness Index</i>
VANT, dron	Vehículo aéreo no tripulado
NO_3^-	Nitrato
NH_3	Amoniaco
N	Nitrógeno

Índice de figuras

1	Planta de banano de la finca en estudio ubicada en Siquirres, Limón.	8
2	Representación y detalle de a) Costa Rica con la provincia de Limón resaltada, b) Finca San Pablo ubicada en el distrito Pacuarito c) Mapa del área de estudio.	17
3	Precipitación mensual histórica (1987-2020) y en el periodo de estudio (2021-2022) registrada en la estación meteorológica 28 Millas.	18
4	Modelo de Elevación Digital (DEM) de la zona de estudio.	19
5	Esquema de la metodología utilizada para obtener el modelo geoespacial.	21
6	Metodología utilizada para monitorear la concentración de ion nitrato en la finca bananera en estudio.	22
7	Puntos de muestreo en la zona de estudio definidos según los diseños experimentales.	24
8	Representación del diseño de trampas para recolectar escorrentía superficial.	26
9	Ráster de la pendiente (S) y del factor de longitud de la pendiente (LSF) en la zona de estudio.	32
10	Ráster del índice de rugosidad del terreno (TRI) en la zona de estudio.	33
11	Ráster del índice topográfico de humedad (TWI) de la zona de estudio.	34
12	Ráster de acumulación de flujo (FA) de la zona de estudio.	35
13	Modelo geoespacial obtenido a partir de las variables geomorfométricas en estudio.	36
14	Concentración promedio de ion nitrato en agua superficial en los diferentes puntos de muestreo.	37
15	Distribución espacial de la concentración promedio de ion nitrato en agua superficial en los diferentes puntos de muestreo.	38
16	Concentración promedio de ion nitrato en agua superficial en el tratamiento de alta y baja probabilidad de concentrar humedad según el modelo geoespacial planteado.	42
17	Concentración promedio de ion nitrato en agua superficial en el tratamiento sin cobertura y con cobertura.	43

18	Muestras del tratamiento sin cobertura (suelo descubierto) así como con cobertura entre plantas de banano.	44
19	Concentración promedio de ion nitrato en agua superficial en los diferentes puntos de muestreo (muestreo estratificado).	45
20	Concentración promedio de ion nitrato en suelo en el tratamiento sin cobertura y con cobertura.	47
A1	Esquema de la metodología utilizada para obtener el modelo geoespacial.	58
C1	Correlación de Pearson entre la concentración de ion nitrato (C) y las variables geomorfológicas independientes.	61
D1	Modelo de Elevación Digital (DEM) de la zona de estudio.	63
D2	Ráster normalizado de 0-1000 de la pendiente de la zona de estudio.	64
D3	Ráster normalizado de 0-1000 del factor de longitud de la pendiente (LS factor) de la zona de estudio.	65
D4	Ráster normalizado de 0-1000 del índice de rugosidad del terreno (TRI) de la zona de estudio.	66
D5	Ráster normalizado de 0-1000 del índice topográfico de humedad (TWI) de la zona de estudio.	67
D6	Ráster normalizado de 0-1000 de acumulación de flujo (FA) de la zona de estudio.	68
D7	Ráster del modelo geoespacial, producto de la superposición de capas de variables geomorfométricas.	69
E1	Volumen promedio de las trampas de escorrentía superficial en los muestreos realizados.	72

Índice de tablas

1	Capas de variables geomorfológicas utilizados en la elaboración del modelo geoespacial.	20
2	Nomenclatura de los puntos de muestreo según el diseño experimental.	25
3	Fechas del muestreo de agua superficial y precipitación acumulada registrada por la estación meteorológica 28 Millas.	27
4	Fechas del muestreo de suelo.	28
5	Distribución de la hipótesis nula (H0) según el diseño experimental planteado en agua superficial.	30
6	Parámetros utilizados para modelar la concentración de ion nitrato en agua superficial. La desviación nula es 2,1082 en 27 grados de libertad ($^{\circ}$ df), la desviación residual es 2,0326 en 25 $^{\circ}$ df y el AIC es 14,2. **P=0,01.	40
B1	Prueba preliminar de estabilidad de ion nitrato.	59
C1	Datos utilizados para calcular el Modelo Lineal Generalizado (GLM). Todos los valores se encuentran normalizados de 0-1.	60
E1	Resumen de resultados sin procesar de concentración de ion nitrato en agua superficial.	70
E2	Resumen de resultados sin procesar de concentración de ión nitrato en suelo. . . .	71

RESUMEN

En el manejo del cultivo de banano (*Musa sp.*) se aplican fertilizantes para cubrir los requerimientos nutricionales de las plantas, sin embargo, uno de los problemas relacionados a esta actividad, es la pérdida de estos nutrientes en el sitio de aplicación por fenómenos como la escorrentía superficial. Estas pérdidas pueden causar acumulación de nitrato en agua superficial y suelo que impacta de forma negativa el ambiente. Avances en la tecnología actual como la agricultura de precisión y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), permiten gestionar el territorio y la agricultura con la finalidad de disminuir los impactos negativos que puedan tener los minerales y los compuestos químicos en el ambiente. Esta investigación tuvo como objetivo, proponer una metodología de muestreo de los niveles de ion nitrato en aguas superficiales y suelos para un monitoreo ambiental eficiente en una finca bananera de 267 ha ubicada en el Caribe costarricense.

Primero, se desarrolló un modelo geoespacial a partir de un Modelo de Elevación Digital (DEM) de una resolución de 9 cm (imágenes tomadas por vehículo aéreo no tripulado (VANT)). Se calcularon variables geomorfométricas con el software ArcGIS 10.6 y SAGA GIS 7.8.2: pendiente (S), factor de longitud de la pendiente (LSF), índice de rugosidad del terreno (TRI), índice topográfico de humedad (TWI) y acumulación de flujo (FA). Posteriormente, se realizó un muestreo ambiental de ion nitrato en agua superficial y suelo posterior a eventos de precipitación mayores a 50 mm. Las muestras recolectadas se analizaron en el Centro de Investigaciones de CORBANA. Con la información del modelo geoespacial y la concentración de ion nitrato, se realizó un Modelo Lineal Generalizado (GLM), así como, un análisis estadístico para conocer el vínculo entre las variables.

El resultado del modelo geoespacial indicó que la mayor probabilidad de concentrar humedad se presentó en la entrada de los canales de drenaje, sin embargo, a nivel de concentración, se obtuvo que no hay diferencias significativas entre tomar muestras al inicio de los canales o en el centro de la plantación. Por otra parte, se mostró que hay diferencias estadísticamente significativas entre la concentración de ion nitrato en áreas con cobertura vegetal así como en áreas con suelo descubier-

to debido a procesos de erosión. Por último, el GLM infirió que las variables geomorfométricas pendiente (S) e índice topográfico de humedad (TWI), son la principal influencia en la variabilidad de la concentración de ion nitrato en la finca bananera en estudio.

Las principales conclusiones es que no se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas entre la concentración de ion nitrato en las áreas definidas con alta o baja probabilidad de concentrar humedad así como en los puntos de muestreo establecidos de forma aleatoria. Por el contrario, sí se presentaron diferencias estadísticamente significativas en la concentración de ion nitrato en las zonas con cobertura vegetal entre plantas y las que presentaban suelo descubierto.

Por último, se recomienda replicar la metodología utilizando imágenes tomadas por un VANT de menos de un año de diferencia del muestreo de agua superficial y suelo. Además, tomar en cuenta la aplicación de fertilizantes con el fin de complementar el análisis de resultados.

ABSTRACT

In the management of banana crops (*Musa sp.*) fertilizers are applied to cover plants nutritional requirements, however, one of the problems related to this activity, is the loss of these nutrients at the application site due to phenomena such as surface runoff. These losses can cause nitrate accumulation in the surface of water and soil that negatively impacts the environment. Advances in current technology such as precision agriculture and Geographic Information Systems (GIS), allow to manage the territory and agriculture with the purpose of reducing the negative impacts that minerals and chemicals compounds may have in the environment. The objective of this research is to propose a methodology for sampling nitrate ion levels in surface waters and soils for an efficient environmental monitoring in a banana farm of 267 ha located in the Caribbean region of Costa Rica.

First, a geospatial model was developed from a Digital Elevation Model (DEM) of a 9 cm resolution (images taken by unmanned aerial vehicle (UAV)). Geomorphometric variables were calculated with the ArcGIS 10.6 and SAGA GIS 7.8.2 software: slope (S), slope length factor (LS Factor), terrain roughness index (TRI), topographic wetness index (TWI) and flow accumulation (FA). Subsequently, an environmental sampling out of ion nitrate in surface water and soil was carried out after precipitation events greater than 50 mm. The collected samples were analyzed at CORBANA's Research Center. With the information from the geospatial model and the nitrate ion concentration, a Generalized Linear Model (GLM) was made, as well as a statistical analysis to find out the link between variables.

The geospatial model results indicated that the greatest probability of moisture concentration was presented at the entrance of the drainage channels, however, at concentration level, it was obtained that there are no significant differences between taking samples at the beginning of the channels or in the center of the plantation. On the other hand, it was shown that there are statistically significant differences between the nitrate ion concentrations in areas with vegetative cover as well as in areas

with uncovered soil due to erosion processes. Finally, the GLM deduce that the geomorphometric variables, slope (S) and topographic wetness index (TWI), are the main influence on the variability of the nitrate ion concentration in the banana farm under study.

The main conclusions are that no statistically significant differences were obtained between the concentration of nitrate ion in the defined areas with high or low probability of moisture concentration as well as the random define sample points. On the other hand, significant statistical differences of ion nitrate were found on the areas with vegetative cover between plants and the ones with bare soil.

Finally, it is recommended to replicate the methodology by using images taken by a UAV from the soil and surface water test, with less than one year difference. Also, consider the application of fertilizers to complement the analysis of results.

Capítulo 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

El banano (*Musa sp.*) se produce en más de 130 países a nivel mundial y provee alimento e ingreso económico a familias de todos los continentes (Kumar et al., 2015). Según la base de datos estadísticos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2021), en 2019 se estimó una producción mundial aproximada de 116 millones de toneladas de banano en un área de siembra de 5 millones de hectáreas. En América Latina, los países de Ecuador, Colombia y Costa Rica lideran el mercado y proveen cerca del 70 % de las importaciones que realiza la Unión Europea (FAO, 2020). La Corporación Bananera Nacional [CORBANA S.A] (2021), indicó que en 2019 Costa Rica exportó cerca de 2,1 millones de toneladas métricas de banano, esto equivale a 121 millones de cajas.

En el cultivo de banano, se aplican fertilizantes con el fin de cubrir los requerimientos nutricionales de la planta, estos insumos permiten aportar nutrientes al suelo para aumentar la productividad y poder satisfacer la demanda del producto (López & Espinosa, 1995). Uno de los principales problemas relacionados a la aplicación de fertilizantes, es la pérdida de nutrientes en el sitio de aplicación. Se puede perder hasta el 85 % del fertilizante aplicado a los cultivos por fenómenos de escorrentía superficial (De Bie & Bense, 2017).

El nitrógeno (N) es un elemento que es esencial pero limitante para los sistemas biológicos (Udvardi et al., 2021), es absorbido por las plantas como ion nitrato (NO_3^-), el cual, por su movilidad, en ocasiones se pierde fácilmente por procesos de lixiviación y escorrentía superficial (López & Espinosa, 1995). Si bien la presencia del ion nitrato en agua y suelo forma parte del ciclo natural del nitrógeno, hay factores antropogénicos que promueven su incorporación al medio a través de fuentes difusas o puntuales, y que han causado que las concentraciones aumenten y provoquen efectos no deseados en el ambiente (Serio et al., 2018). La acumulación de ion nitrato tiene impac-

tos en el cambio climático, ya que se asocia con la emisión de gases de efecto invernadero y puede causar eutrofización y proliferación de algas tóxicas en aguas receptoras (Nodeh et al., 2017). Por otra parte, la lixiviación del ion nitrato a zonas saturadas del suelo, puede contaminar las aguas subterráneas y según la concentración, causar problemas en la salud (Huang et al., 2018; Krouk et al., 2010).

Tomando en cuenta lo anterior, es necesario buscar metodologías eficientes para realizar monitoreos ambientales que permitan cuantificar la concentración de ion nitrato, tanto en la matriz de suelo como en el agua superficial. Muestrear estas áreas les permitiría a los productores bananeros definir alternativas para prevenir o mitigar pérdidas por lixiviación y escorrentía superficial, y así, disminuir el impacto ambiental que su industria pueda causar (Di & Cameron, 2002).

Por otra parte, debido al crecimiento de la densidad poblacional que conlleva al aumento en la demanda de cultivos, los recursos naturales resultan ser limitados (Izaguirre, 2020). Es necesario mantener identificadas y monitoreadas las zonas con mayor riesgo de acumulación de nitrato, sin que esto genere pérdidas en la rentabilidad de la producción. Avances en la tecnología actual como la agricultura de precisión, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los modelos geoespaciales, permiten gestionar el territorio y la agricultura con la finalidad de disminuir los impactos que puedan tener los minerales en el ambiente, así como: determinar áreas de cultivo, estimar la productividad y diagnosticar enfermedades (Brase, 2018; Guzmán-Álvarez et al., 2022).

Este proyecto elaboró una propuesta de muestreo de los niveles de concentración de ion nitrato en aguas superficiales y suelos para un monitoreo ambiental eficiente en una finca bananera del Caribe costarricense. Se realizó un modelo geoespacial acompañado de análisis químicos para la identificación de la presencia del ion nitrato (NO_3^-). La metodología representa una herramienta para que la empresa bananera pueda diseñar de forma eficiente los monitoreos ambientales en sus fincas con el fin de optimizar el uso de los recursos. El proyecto se desarrolló en colaboración con CORBANA en una finca bananera ubicada en el cantón de Siquirres, provincia Limón.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Elaborar una metodología de muestreo de los niveles de ion nitrato en aguas superficiales y suelos para un monitoreo ambiental eficiente en una finca bananera del Caribe costarricense.

1.2.2. Objetivos específicos

- Generar un modelo geoespacial mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la estimación de la probabilidad de la presencia de ion nitrato para su identificación en aguas superficiales y suelos.
- Validar el modelo geoespacial propuesto a través de muestreo para la determinación de la concentración del ion nitrato como caso de estudio en una finca bananera del Caribe costarricense.
- Proponer una metodología de muestreo eficiente para la medición precisa de la presencia del ion nitrato en aguas superficiales y suelos en fincas bananeras.

Capítulo 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Generalidades del cultivo de banano en Costa Rica

El cultivo de banano (*Musa sp.*), pertenece a la familia de las musáceas y es originario del Suroeste de Asia. En la Región Caribe de Costa Rica (específicamente en la Región Huetar Caribe), la variedad más utilizada para la exportación es el subgrupo Cavendish que se caracteriza por tener un pseudotallo alto, hojas anchas y frutos medianos. El ciclo fenológico del cultivo es de aproximadamente 404 días, dependiendo de las condiciones climáticas y de relieve, así como de la variedad (Vargas et al., 2017) (Figura 1).

Figura 1

Planta de banano de la finca en estudio ubicada en Siquirres, Limón.



A este cultivo se le aplican fertilizantes para mantener la producción acorde a las necesidades del mercado. Si no se tiene un plan de fertilización adecuado, las plantas pueden presentar amarillamiento de las hojas y retraso en el crecimiento (López & Espinosa, 1995). Sin embargo, con el fin de mantener controladas las concentraciones de compuestos químicos aplicados en la matriz de agua y suelo, se debe de definir monitoreo ambiental adecuado para asegurar que los nutrientes no se pierdan en otros procesos naturales como escorrentía superficial y lixiviación.

Otra característica de las plantaciones de banano es que, con el fin de transportar la fruta desde el campo hacia la planta de procesamiento, se utiliza un cable que interconecta todas las zonas de la finca. Hay una línea principal llamada “Cable Real” y hay líneas secundarias que conectan con el. El nombre de las áreas de la finca o parcela experimental, se definen basadas en este número de cable utilizado como transporte.

2.2. Régimen de precipitación en la Región Caribe de Costa Rica

La zona Huetar Caribe, región donde se produce la mayor cantidad de banano en el país, se caracteriza por no tener un régimen de época seca definido. Se divide en dos subregiones: Caribe Norte y Caribe Sur. El Caribe Norte, donde se ubica la zona de estudio de esta investigación, abarca desde Barra del Colorado hasta el sur de Limón Centro y la precipitación anual en esta zona va de 3500 mm a 4500 mm. Por otra parte, en el Caribe Sur, la precipitación anual es de 2500 mm a 3000 mm. En ambas regiones, en los meses de febrero, marzo, setiembre y octubre la precipitación disminuye a aproximadamente 100 mm mensuales. El periodo máximo de lluvias se encuentra entre los meses de abril a agosto y de noviembre a enero, en estos meses, la precipitación suele ser de 300 mm a 400 mm mensuales (Instituto Meteorológico Nacional [IMN], 2008). Aunado a lo anterior, se requiere un sistema de drenaje eficiente (secundarios y terciarios) que evite la acumulación de agua, así como el aumento en el nivel freático en las plantaciones bananeras. Incluso, en la preparación del suelo para la siembra de banano se construyen domos en medio de los canales terciarios con el fin de evitar la acumulación de agua superficial (Bolaños, 2019). Los domos suelen ser de 20 metros de ancho con una pendiente de alrededor de 3 % (Vargas et al., 2017).

Cuando la región Caribe se encuentra modulada por las fases de ENOS (El Niño-Oscilación del Sur) se presentan variaciones en las precipitaciones. Bajo condiciones del Fenómeno de El Niño (calentamiento de las aguas tropicales del océano Pacífico), la zona se caracteriza por el aumento en la intensidad de los escenarios lluviosos, por el contrario, con el Fenómeno de La Niña (enfriamiento atípico de las mismas aguas), se presenta la disminución de la precipitación. Por ejemplo, en el años 2015, el Caribe Norte estuvo modulado por el fenómeno de El Niño, en febrero de ese año, se presentó un aumento en la precipitación mensual de un 21 % (IMN, 2015), por el contrario, en el año 2022 con el fenómeno de La Niña, en el mismo mes de febrero se presentaron deficiencias en la precipitación en un 51 % (IMN, 2022).

2.3. Corporación Bananera Nacional (CORBANA)

La Corporación Bananera Nacional (CORBANA), se fundó en 1971 como ente oficial regulador del banano en Costa Rica. Se encarga de fortalecer la producción y la calidad del cultivo, así como velar por la participación de las diversas empresas en la comercialización. El Estado, a través de CORBANA, ha promovido la coordinación de productores y del sector financiero para lograr consensos en torno al modelo de producción. Sus cuatro ejes principales para fomentar el modelo sostenible de la producción son los de coordinación, productividad, protección ambiental y responsabilidad social (CORBANA, 2022).

La empresa cuenta con uno de los Centros de Investigación del cultivo de banano más completo de Latinoamérica, donde se analiza la fertilidad y nutrición, cultivo de tejidos, microbiología de suelos, determinación del impacto de plaguicidas, así como nuevos procedimientos para combatir plagas. Este Centro de Investigación está ubicado en la provincia de Limón, cantón de Pococí, distrito La Rita. CORBANA también cuenta con el proyecto BANACLIMA, que monitorea, recopila y maneja información en tiempo real de las condiciones climáticas de las zonas de producción de banano en Costa Rica, con el fin de ser un apoyo para los productores (CORBANA, 2022).

2.4. Ion Nitrato (NO_3^-)

El ion nitrato (NO_3^-) forma parte del ciclo del nitrógeno. Es la fuente principal de nitrógeno disponible para las plantas, además, es un componente esencial para los seres vivos. A un nivel natural no tiene ningún impacto ambiental, sin embargo, cuando los niveles de concentración en agua potable son elevados ($> 50 \text{ mg/L}$), hay riesgo potencial para el ser humano (Krouk et al., 2010). También, bajo condiciones anaeróbicas en el suelo, se puede generar óxido nitroso (N_2O), un gas de efecto invernadero (Garzón & Cárdenas, 2013).

2.4.1. Ciclo del nitrógeno

El ciclo del nitrógeno explica la movilidad del nitrógeno desde el gas nitrógeno (N_2), el depósito principal en la atmósfera, hasta los sitios donde se acumula el amoníaco (NH_3) y el nitrato (NO_3^-) en el suelo y el agua. En la atmósfera se encuentra un 78 % del gas nitrógeno, sin embargo, solo algunas bacterias pueden convertir el nitrógeno a una forma biodisponible (NH_3 y NO_3^-) para que las plantas lo puedan absorber, este proceso se denomina fijación de nitrógeno. El nitrato, también se produce cuando los relámpagos de las tormentas eléctricas combinan nitrógeno y oxígeno formando compuestos de óxido nitroso (N_2O) que posteriormente se disuelve con la precipitación. El ciclo se completa gracias a las bacterias desnitrificantes que descomponen el nitrato y lo liberan como gas nitrógeno (Audesirk et al., 2011).

2.4.2. Fertilizantes nitrogenados

Se utilizan fertilizantes nitrogenados con el fin de aportar nitrógeno y potenciar el crecimiento de las plantas al favorecer la síntesis de proteínas y el proceso de fotosíntesis. La cantidad de compuestos nitrogenados se controlan según las condiciones climáticas, la vegetación, topografía y las actividades antropogénicas. Algunas fuentes que contienen amonio o nitrato son: urea ($CO(HN_2)_2$), nitrato de amonio (NH_4NO_3), sulfato de amonio ($(NH_4)_2SO_4$), fosfato diamónico ($(NH_4)_2PO_4$), nitrato de potasio (KNO_3) y nitrato de calcio ($Ca(NO_3)_2$) (López & Espinosa, 1995).

2.4.3. Proceso Haber-Bosch

El nitrógeno es un nutriente esencial para los sistemas biológicos, sin embargo, como se mencionó anteriormente, su disponibilidad es limitada. A inicios del siglo XX, el proceso industrial *Haber-Bosch* surgió como una opción para alivianar esta limitación de nitrógeno en la producción agrícola. Se basa en la conversión del nitrógeno atmosférico en amoníaco para la producción de los fertilizantes nitrogenados (Udvardi et al., 2021).

2.4.4. Características del ion nitrato (NO_3^-) en suelo y agua superficial

La concentración de ion nitrato en el suelo y en el agua superficial, generalmente, no se mantiene durante mucho tiempo. La disipación del compuesto, se deben a la absorción por las plantas, la escorrentía superficial, lixiviación y desnitrificación microbiana. Es decir, el rápido agotamiento del nitrato se debe a factores bióticos y abióticos (Crawford & Glass, 1998).

2.4.5. Metodologías para cuantificar ion nitrato (NO_3^-)

El ion nitrato se puede cuantificar mediante una amplia variedad de métodos. Algunas metodologías incluyen la espectrofotometría Ultravioleta-Visible (UV-VIS) y el electrodo de ion selectivo (EIS):

1. Espectrofotometría Ultravioleta-Visible (UV-VIS)

Mediante este método de identificación, se mide la absorbancia del nitrato a 220 nm. El proceso consiste en agregar una solución ácido clorhídrico (HCl) a la muestra. Este primer paso se realiza para acidificar y prevenir la interferencia de hidróxidos o carbonatos en el resultado final. Posteriormente, se realiza la lectura de la absorbancia a una longitud de onda de 220 nm y a 275 nm en un espectrofotómetro UV-VIS. Este proceso se debe de realizar con el equipo calibrado. Con la ecuación (1) se obtiene el resultado donde: $N-NO_3^-$ es la concentración de nitrógeno como nitrato (mg/L), m es el inverso de la pendiente de la curva de calibración, A_{220} es la absorbancia a 220 nm y A_{275} es la absorbancia a 275 nm. Esta metodología se ajusta a la Ley de Beer entre 0,03 y 5 mg $N-NO_3^-/L$ (Kafle, 2020).

$$N - NO_3^- \left(\frac{mg}{L} \right) = m \cdot (A220 - (2 \cdot A275)) \quad (1)$$

2. Electrodo de ion selectivo (EIS)

El electrodo de ion selectivo (EIS) se considera un método de detección directa, consiste en un sensor electroquímico basado en membranas selectivas como elementos de reconocimiento (Ortuño et al., 2014). Se caracteriza por ser de bajo costo, portátil y de respuesta rápida (Mahmud et al., 2020). Para utilizar un EIS es necesario agua desionizada o destilada para preparar las disoluciones y los estándares, una solución de ajuste de fuerza iónica o más conocida por sus siglas en inglés como *Ionic Strength Adjuster (ISA)* y estándares de referencia para calibrar el equipo (Cole-Parmer, 2021a).

2.4.6. Pérdida de ion nitrato en campo

En un estudio realizado por Chhabra et al. (2010), se investigaron las diferentes formas de pérdida de nitrógeno en el cultivo de arroz, en India, a partir de análisis espacial con SIG (Sistemas de Información Geográfica). El procesamiento de imágenes se realizó en el programa PCI Geomatica versión 9.0 (*PCI Geomatics Company*) y junto al mapa de textura de suelo delimitaron el área de estudio. Además, con una base de datos de los fertilizantes aplicados en el área y datos de la precipitación, obtuvieron que las pérdidas de nitrógeno por lixiviación en forma de urea, amonio y nitrato, son predominantes con respecto a las pérdidas por volatilización del amoníaco.

En Costa Rica, el cultivo de banano está sujeto a pérdida de nutrientes debido a las condiciones de precipitación del país, específicamente del Caribe. Acón-Ho et al. (2013) realizó una investigación que busca analizar mediante balance hídrico las pérdidas de nutrientes por procesos de lixiviación debido a la percolación del agua de lluvia en suelos andisoles cultivados con banano al este del Río Reventazón. Se instalaron lisímetros a 60 cm y a 90 cm, las muestras se tomaron cada dos semanas durante el mes de octubre y noviembre del 2003 y cada ocho días a partir de diciembre del 2003 a mayo del 2004. Para el balance hídrico se tomaron en cuenta factores como: precipitación,

evapotranspiración, capacidad de campo, y otros. Concluyeron que las condiciones que favorecen la lixiviación de nutrientes son: alta humedad en el suelo, concentración de nitrato a nivel radicular del cultivo, condiciones que favorecen la desnitrificación, temperatura y reacciones redox del suelo. Además, se obtuvo que la pérdida de nitrógeno tuvo diferencias significativas cuando se aplica nitrato de amonio con respecto a sulfato de amonio y urea.

2.4.7. Antecedentes de ion nitrato (NO_3^-) en fincas bananeras

El análisis de concentraciones de nitrato en suelo o en agua de fincas bananeras se ha investigado a nivel mundial. En un estudio realizado por Khatik et al. (2011) en India, se obtuvo concentraciones de ion nitrato en suelo de 63,2 mg/kg, 72,5 mg/kg y 80,6 mg/kg. El 10 % de las muestras indican un valor mayor que 100 mg/kg, 74 % entre 50 mg/kg y 100 mg/kg y el 16 % contenidos menores a los 50 mg/kg. Además, es importante destacar que el 28 % de las muestras indicaron acumulación de ion nitrato en los primeros 10 cm de matriz de suelo e iban disminuyendo con respecto a la profundidad. Por otra parte, Aryal et al. (2012) desarrolló un estudio donde analizó la calidad del agua superficial dentro de una plantación de la región sureste de México con una precipitación media anual de 3868 mm, obtuvo que los valores de concentración de ion nitrato en el agua superficial de los cultivos de banano eran de aproximadamente 0-50 mg/L.

2.5. Sistemas de información geográfica (SIG) y modelos geoespaciales

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), son una herramienta de secuencia de funciones interrelacionadas que permite la entrada, almacenamiento, procesamiento y generación de datos espaciales georreferenciados, es decir, es una base de datos que contiene información geográfica (Star & Estes, 1991). Un modelo geoespacial, en un contexto de SIG, permite describir la variación de fenómenos y emular condiciones reales de superficie de la Tierra. Los modelos geoespaciales se han utilizado para la regionalización operativa de servicios de salud (Dallagassa et al., 2019; Hernández-Ávila et al., 2010), para predecir erosión del suelo (Koirala et al., 2019), susceptibilidad a deslizamientos (Quesada-Román, 2021), entre otros.

2.5.1. Geomorfometría y parámetros morfométricos

Los mapas geomorfológicos son la mejor herramienta para comprender el contexto físico de la superficie de la tierra. Deben incluir información sobre las propiedades espaciales: dimensiones, pendiente, curvatura, relieve, entre otros. La información se recolecta a diferentes escalas en relación con el propósito de la investigación (Marchesini et al., 2014). Según Pike et al. (2009), hay cuatro pasos para el análisis geomorfométrico. El primero es la generación de la superficie como un Modelo de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés), la corrección de la superficie del modelo, el cálculo de los parámetros morfométricos y la aplicación de los resultados en el problema de investigación. El DEM es la representación de la superficie de la tierra y es la base para calcular los parámetros de superficie. Algunos parámetros morfométricos son:

- **Pendiente:** La pendiente es la tasa de cambio en la altura sobre la distancia entre dos puntos. Es la inclinación o desnivel con respecto al suelo. Valores bajos representan un terreno más plano y una pendiente alta indica uno más empinado (Guzzetti et al., 1999).
- **Factor de longitud de la pendiente (LS Factor):** La longitud de la pendiente se refiere a la proyección horizontal del suelo desde que comienza la zona de escorrentía hasta el punto final del tramo que se está considerando. Este factor describe el efecto de la topografía en la erosión del suelo y es adimensional. Valores máximos se asocian a áreas de fuerte pendiente y los valores mínimos a zonas con pendiente menor (Panagos et al., 2015).
- **Índice de Rugosidad del Terreno (TRI):** El índice de rugosidad topográfica proporciona una medida cuantitativa de la heterogeneidad topográfica, entre más alto es el valor del TRI, más rugoso es el terreno. Está influenciado por las características de la roca y del suelo (Riley et al., 1999).
- **Índice Topográfico de Humedad (TWI):** El índice topográfico de humedad se conoce también como índice topográfico compuesto, representa la tendencia del agua a acumularse en cualquier punto de la cuenca, es decir, el proceso natural de gravedad que mueve el agua

según la pendiente (Poudyal et al., 2010). Se explica en la ecuación (2) donde SCA se refiere al área de captación (*Specific Catchment Area*) y ϕ a la pendiente (Mattivi et al., 2019).

$$TWI = \ln\left(\frac{SCA}{\phi}\right) \quad (2)$$

2.6. Modelo Lineal Generalizado (GLM)

Los Modelos Lineales Generalizados (GLM) de las siglas en inglés de *Generalized Linear Models*, se utilizan cuando no se cumplen los supuestos de los modelos lineales como: 1- distribución normal de los errores, 2- varianza constante (homocedasticidad) y 3- la variable dependiente se relaciona linealmente con las variables independientes. Cuando se realiza un GLM se deben de tener claros conceptos como los siguientes:

- **Devianza (D^2):** La devianza da una idea de la variabilidad de los datos. Para obtener la medida de la variabilidad explicada por el modelo, se compara la devianza del modelo nulo (*Null deviance*) con la devianza residual (*Residual deviance*). Esto indica el valor de variabilidad de la variable que no es explicada por el modelo.

$$D^2 = \left(\frac{\text{Devianza modelo nulo} - \text{Devianza residual}}{\text{Devianza modelo nulo}}\right) \cdot 100 \quad (3)$$

- **Criterio de evaluación de modelos:** El criterio comunmente utilizado es el Criterio de Información de Akaike (AIC del inglés *Akaike Information Criterion*). Cuanto más pequeño sea el valor de AIC, mejor es el ajuste ya que evalúa el ajuste del modelo a los datos así como la complejidad del mismo. Es muy utilizado para comparar modelos iguales (mismas variables) pero con funciones de vínculo distintas.

Capítulo 3

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

El área de estudio (Figura 2) de esta investigación comprendió una parcela de 40 hectáreas, parte de una finca bananera con cultivar Grande Naine (*Musa AAA*, subgrupo Cavendish) que tiene un área total de 267 hectáreas ubicada en Siquirres, Limón, Costa Rica. Durante el periodo de la investigación (agosto 2021-agosto 2022), la estación meteorológica 28 Millas (Figura 3), ubicada a menos de 1 km del área analizada, registró una precipitación media mensual de 186 mm y un acumulado anual de 2254 mm. La temperatura máxima del ambiente fue de 34,6°C y la mínima de 17,1°C con una temperatura media de 25,7°C y la humedad relativa fue de 86 %.

Figura 2

Representación y detalle de a) Costa Rica con la provincia de Limón resaltada, b) Finca San Pablo ubicada en el distrito Pacuarito c) Mapa del área de estudio.

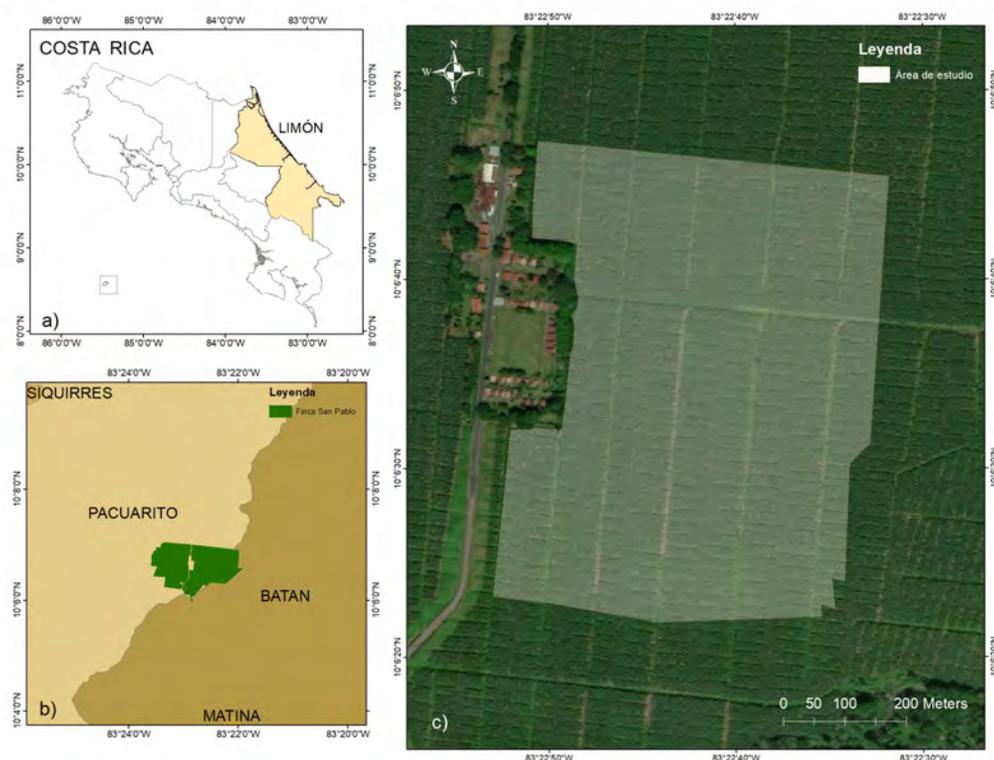
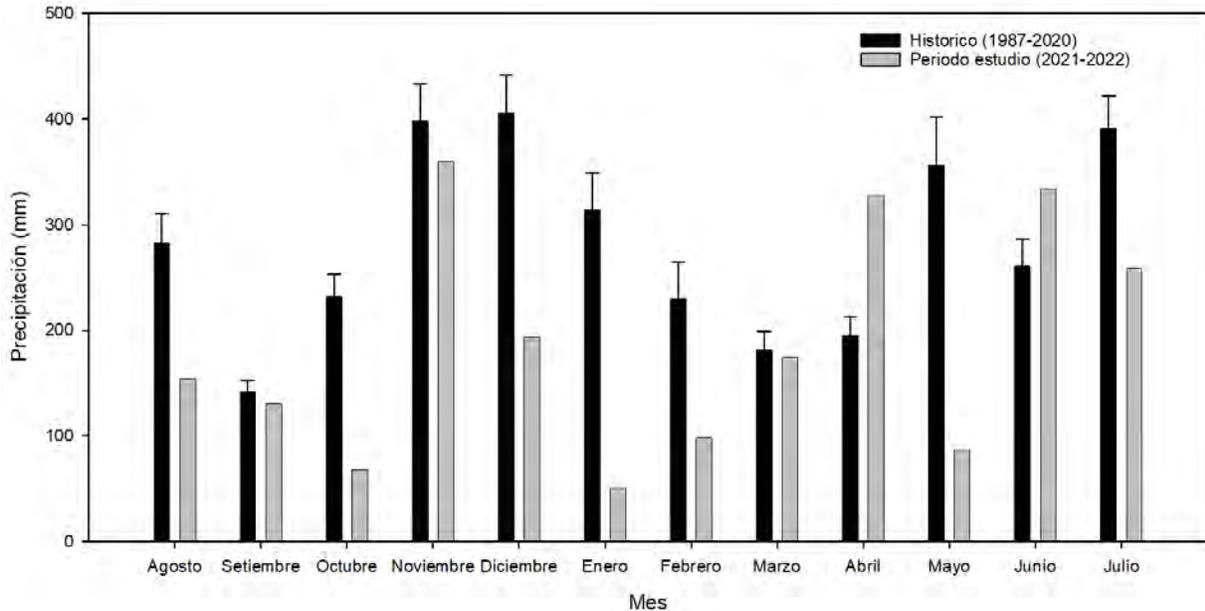


Figura 3

Precipitación mensual histórica (1987-2020) y en el periodo de estudio (2021-2022) registrada en la estación meteorológica 28 Millas.



Nota: La precipitación mensual histórica contiene barras de error estándar de la media del conjunto de datos de precipitación correspondientes a 33 años (1987-2020).

3.2. Recopilación de la información

La información utilizada para el modelo geoespacial se recopiló de investigaciones previas realizadas por CORBANA. El DEM lo generó y suministró la corporación, a partir de datos propios generados con imágenes tomadas previamente (19 de junio del 2018) en el sitio de estudio con un vehículo aéreo no tripulado (VANT) *DJI Phantom 4 V.2*, con cámara de imagen real (RGB por sus siglas en inglés). El DEM tenía una resolución de 9 cm x 9 cm (Figura 4) y la altitud más alta que presenta el sitio de estudio es de 43 m y la más baja de 22 m. Por otra parte, las fechas para el cronograma de muestreos ambientales se definieron a partir de los datos registrados en la Estación Meteorológica 28 Millas del proyecto BANACLIMA de CORBANA desde el mes de agosto 2021

a agosto 2022.

Figura 4

Modelo de Elevación Digital (DEM) de la zona de estudio.



Nota: La figura muestra el modelo de elevación digital (DEM), en color verde se indican los valores más altos de elevación (zona de plantación) y el color rojo los valores más bajos (drenajes). Ambos valores se encuentran en metros.

3.3. Modelo geoespacial

El modelo geoespacial se obtuvo a partir de la superposición de capas de datos e índices geomorfológicos (Tabla 1). La selección de las capas a utilizar se definió a partir de la información disponible brindada por CORBANA. La superposición, así como algunas de las capas se realizaron en el programa ArcGIS versión 10.6 (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2021) y en el programa *System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA)* versión 7.8.2.

En la Figura 5 se muestra la metodología utilizada para obtener el modelo geoespacial. Se calculó el TWI para conocer la distribución de la humedad en el suelo (Mattivi et al., 2019; Sørensen et al., 2006), y el TRI para conocer la heterogeneidad de la zona de estudio (Riley et al., 1999). Además, se utilizan otras variables como la acumulación de flujos, el factor de longitud de la pendiente y la pendiente del terreno. Todas las variables topográficas se calcularon a partir del DEM. Posteriormente, las variables se normalizaron con valores de 0 a 1000 para superponerlas entre sí. Se desarrolló el modelo geoespacial para obtener la representación gráfica de zonas con tendencia a concentrar mayor humedad en dos rangos: alto y bajo, utilizando el método de rupturas naturales de Jenks que permite representar la espacialidad de los atributos de los datos (Jiang, 2013).

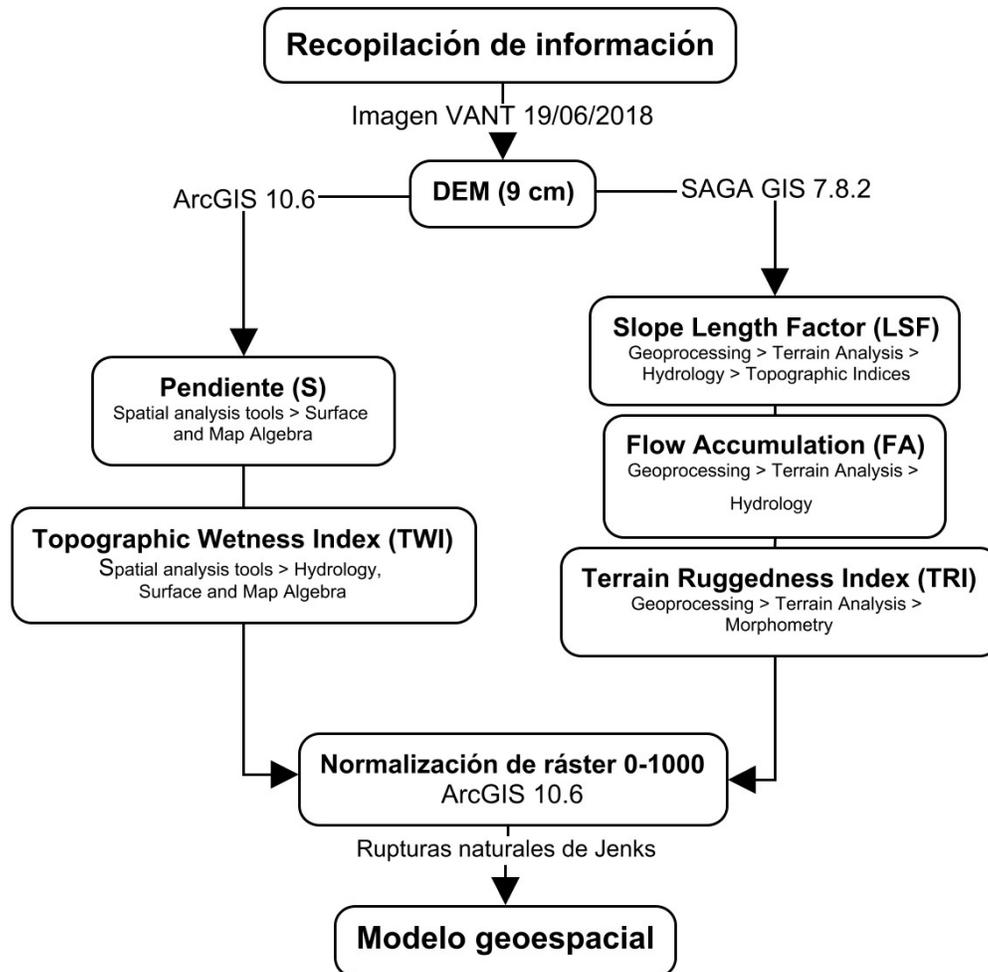
Tabla 1

Capas de variables geomorfológicas utilizados en la elaboración del modelo geoespacial.

Capa de datos	Abreviación	Programa
Pendiente	S	ArcGIS 10.6
Factor de longitud de la pendiente	LSF	SAGA GIS 7.8.2
Índice de rugosidad del terreno	TRI	SAGA GIS 7.8.2
Índice topográfico de humedad	TWI	ArcGIS 10.6
Acumulación de flujo	FA	SAGA GIS 7.8.2

Figura 5

Esquema de la metodología utilizada para obtener el modelo geoespacial.



Nota: La figura muestra el esquema de la metodología utilizada para obtener el modelo geoespacial. En cada recuadro se detalla la secuencia de comandos para calcular las variables geomorfológicas en los programas informáticos indicados. El proceso se puede ver en detalle en la figura A1 en el apéndice A.

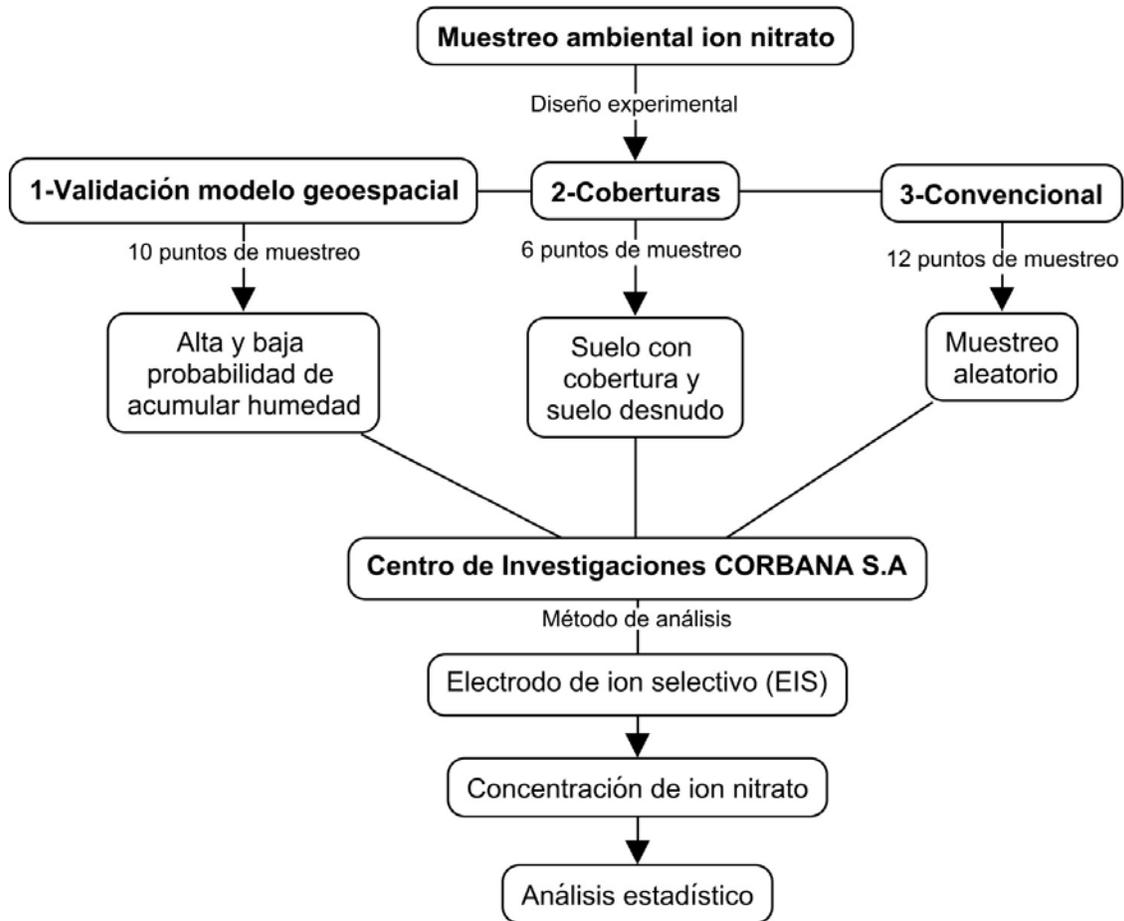
3.4. Muestreo ambiental ion nitrato

Se estableció un programa de muestreo químico con el fin de validar el modelo geoespacial y analizar el comportamiento del compuesto químico en diferentes puntos de la zona de estudio. Se definieron 28 puntos de muestreo según los diseños estadísticos planteados, por otra parte, posterior

a obtener la concentración de ion nitrato, se realizó un análisis estadístico (Ver Figura 6).

Figura 6

Metodología utilizada para monitorear la concentración de ion nitrato en la finca bananera en estudio.



3.5. Diseño experimental

Se establecieron tres diseños experimentales para desarrollar la metodología del monitoreo ambiental. Primero, se verificó si se presentaban diferencias significativas en la concentración de ion nitrato entre las zonas con rango alto y bajo de probabilidad de concentrar humedad según el modelo geoespacial con el fin de validarlo. El segundo diseño experimental consistió en analizar si habían diferencias significativas en la concentración de ion nitrato en zonas de la plantación que se encuentran con cobertura vegetal en comparación con las áreas con suelo descubierto entre plantas.

Por último, el tercer diseño experimental examinó si habían diferencias significativas en la concentración de ion nitrato mediante un muestreo estratificado, es decir, sin tomar en cuenta el modelo geoespacial como herramienta.

3.6. Programa de muestreo

Se colocaron 28 puntos de muestreo de agua superficial y 6 puntos de muestreo de suelo (Figura 7). Los puntos se definieron según los diseños experimentales preestablecidos en la metodología de esta investigación. El detalle de la nomenclatura se encuentra en la Tabla 2. Los puntos de muestreos que tenían como objetivo analizar la concentración de ion nitrato en las áreas de alta probabilidad de concentración de humedad se colocaron en la entrada de los canales terciarios y los de baja probabilidad en el centro de los domos (en medio de la plantación). Por otra parte, en las áreas con cobertura vegetal, suelo descubierto y muestreo estratificado, se colocaron los puntos de muestreo a la entrada de los canales terciarios.

Posteriormente, se realizó el muestreo para conocer la concentración de nitrato tanto en agua superficial como en suelo de la finca bananera en estudio. El muestreo de suelo se realizó en los meses de diciembre del año 2021 y enero, junio del año 2022 (Tabla 4). Por otra parte, el monitoreo de agua superficial se realizó dentro de las 96 horas (4 días) posteriores a cinco eventos de precipitación mayores a 50 mm. El criterio de precipitación se estableció ya que en un estudio previo realizado en la zona por Valverde (2021), se indica que en eventos de precipitación mayores a aproximadamente 50 mm se generaba escorrentía superficial en campo. El muestreo de agua superficial se realizó en los meses de noviembre, diciembre del año 2021 y junio del año 2022 (Tabla 3). Se tomó en cuenta la información registrada por la Estación Meteorológica 28 Millas para definir la fecha de muestreo.

Puesto que el ion nitrato no tiende a mantenerse mucho tiempo en la matriz de suelo o agua, se realizó una prueba de estabilidad del compuesto para poder definir la metodología de muestreo. La prueba de estabilidad consistió en colocar una concentración patrón de 5 mg/L de ion nitrato

en un recipiente de 3785 mL con agua desionizada (por triplicado) y realizar una medición diaria de la concentración del compuesto durante 96 horas (4 días). Esta prueba preliminar indicó que no habían diferencias significativas en la concentración de ion nitrato en los recipientes durante el periodo analizado. Por esto, se estableció el muestreo de agua superficial en las 96 horas posteriores al evento de precipitación. En la Tabla B1 del Apéndice B se detallan los resultados obtenidos en esta prueba preliminar.

Figura 7

Puntos de muestreo en la zona de estudio definidos según los diseños experimentales.



Tabla 2*Nomenclatura de los puntos de muestreo según el diseño experimental.*

Tratamiento	Punto de muestreo	Detalle de la ubicación del punto de muestreo
Alta probabilidad	004	
Alta probabilidad	009	
Alta probabilidad	010	Alta probabilidad de concentrar humedad, entrada canales terciarios
Alta probabilidad	024	
Alta probabilidad	025	
Baja probabilidad	006	
Baja probabilidad	007	
Baja probabilidad	012	Baja probabilidad de concentrar humedad, centro de los domos
Baja probabilidad	021	
Baja probabilidad	026	
Sin cobertura	013	
Sin cobertura	014	Suelo descubierto, entrada canales terciarios
Sin cobertura	015	
Con cobertura	016	
Con cobertura	017	Suelo con cobertura, entrada canales terciarios
Con cobertura	018	
Convencional	001	
Convencional	002	
Convencional	003	
Convencional	005	
Convencional	008	
Convencional	011	
Convencional	019	Puntos definidos de forma aleatoria, entrada canales terciarios
Convencional	020	
Convencional	022	
Convencional	023	
Convencional	027	
Convencional	028	

3.7. Muestreo de agua superficial

Se tomaron 100 mL de agua superficial recolectada en trampas de esorrentía ubicadas en la entrada de los canales terciarios o en el centro de los domos según el diseño experimental. Las trampas consistieron en envases de plástico de 3785 mL, los cuales se enterraron aproximadamente 14,5 cm y con las aperturas en los costados se permitió el ingreso del agua superficial o bien, el desbordamiento del excedente (Figura 8). Estos recipientes se vaciaban previo a los eventos de precipitación con el fin de obtener las muestras de agua almacenada por menos de 96 horas. Cada muestra se recolectó con guantes y se rotuló de forma adecuada para identificar los puntos, posteriormente, se trasladaron al Centro de Investigaciones de CORBANA a una temperatura menor a 6°C para su procesamiento (Eaton et al., 2005).

Figura 8

Representación del diseño de trampas para recolectar esorrentía superficial.



(a) Representación gráfica de la trampa



(b) Trampas colocadas en la zona de estudio

Tabla 3

Fechas del muestreo de agua superficial y precipitación acumulada registrada por la estación meteorológica 28 Millas.

Muestreo agua superficial	Fecha	Precipitación acumulada (mm)
1	03/11/2021	98,1
2	02/12/2021	145,4
3	14/06/2022	125,5
4	04/07/2022	127,7
5	04/08/2022	99,5

Nota: Precipitación acumulada se entiende desde el momento en el que se vaciaron las trampas de escorrentía hasta el día que se realizó el muestreo.

3.8. Análisis de las muestras de agua superficial

El procesamiento de las muestras de agua superficial se realizó en el Centro de Investigaciones de CORBANA, específicamente en el laboratorio de la Sección Suelo-Planta. En cada muestreo se tomaban 28 muestras de agua superficial, por lo tanto, se analizó un total de 140 muestras en el periodo de investigación.

Se utilizó un electrodo de ion selectivo (EIS) *Oakton, Cole-Parmer* (Cole-Parmer, 2021a) conectado a un medidor portable *Thermo Scientific Orion Star A329* para cuantificar la concentración de ion nitrato (Thermo Fisher Scientific, 2021). Para la calibración del equipo, se agregaron 50 mL de solución estándar de 1 mg/L, 10 mg/L y 100 mg/L en tres recipientes de 100 mL y posteriormente se les añadió 1 mL de solución ISA (*Ionic Strength Adjuster 2M ((NH₄)₂SO₄)*) (Cole-Parmer, 2021b). Por último, se introdujo el EIS y se agitó hasta ajustar los puntos de la curva de calibración.

En el proceso de preparación de la muestra, se tomaron 50 mL del agua de escorrentía recolectada, se filtró con papel filtro *Whatman 42* por gravedad y se le agregó 1 mL de solución ISA. Poste-

riormente, se introdujo el EIS en la muestra y se agitó hasta que la lectura de concentración de ion nitrato se estabilizara. El electrodo se enjuagó con agua desionizada entre mediciones, además, previo a la preparación de la muestra, se aseguró que tanto los estándares como las muestras estuvieran a una temperatura de 23°C a 25°C.

3.9. Muestreo de suelo

En el muestreo de suelo, las muestras se recolectaron de 0 cm a 30 cm de profundidad con un barreno tubular tipo *Lord Soil* de 1 pulgada de diámetro interno. Primero, se limpió el área y se tomó una muestra compuesta a 30 cm de las trampas de escorrentía. Las muestras se depositaron en bolsas plásticas nuevas y limpias y se transportaron hasta el Centro de Investigaciones de CORBANA a una temperatura menor a 6°C.

Tabla 4

Fechas del muestreo de suelo.

Muestreo de suelo	Fecha
1	10/12/2021
2	14/01/2022
3	14/06/2022
4	18/07/2022
5	04/08/2022

3.10. Análisis de muestras de suelo

El procesamiento de las muestras de suelo se realizó en el Centro de Investigaciones de CORBANA, específicamente en el laboratorio de la Sección Suelo-Planta. En cada muestreo se tomaba un total de 6 muestras de suelo, por lo tanto, se analizó un total de 30 muestras en el periodo de investigación.

Las muestras de suelo se secaron a 40°C por 48 horas y se molieron a un tamaño de partícula menor

a 2 mm. Posteriormente, se pesaron 7,5 gramos de la muestra de suelo en un recipiente de 100 mL, se agregó 75 mL de agua desionizada (relación 1:10) y se agito por 10 minutos. Luego, se filtró con papel filtro *Whatman 42*. De este filtrado se tomaron 50 mL y se les agregó 1 mL de solución ISA. Por último, se repitió el proceso de preparación descrito para las muestras de escorrentía superficial y el procedimiento para obtener el resultado, pero utilizando la ecuación (4).

$$NO_3^- \left(\frac{mg}{kg} \right) = \frac{Lectura\ electrodo\ (mg/L) \cdot Volumen\ de\ extraccion\ (mL)}{Peso\ de\ la\ muestra\ (g)} \quad (4)$$

3.11. Análisis estadístico

Todos los análisis se realizaron con el software estadístico *InfoStat* versión 2018 (Rienzo et al., 2018) según el diseño experimental tomando en cuenta un nivel de significancia de ($\alpha = 0,05$). Primero, se procedió con una prueba de normalidad Shapiro-Wilk donde si el valor de probabilidad (p) era mayor al nivel de significancia, los datos se procesaban como una distribución normal, de lo contrario, no había normalidad. Si se mostraba un comportamiento normal, se realizaba un análisis estadístico paramétrico de varianza ANOVA de una vía con prueba Tukey para definir si existían o no diferencias estadísticamente significativas. Si los datos no mostraban un comportamiento normal, se realizaba una prueba no paramétrica Kruskal-Wallis (Kruskal & Wallis, 1952) para identificar si hay diferencias significativas entre muestras. Se estableció la hipótesis nula (H_0) para cada uno de los diseños experimentales (Tabla 5). Por otra parte, para calcular el error estándar de cada conjunto de datos, se utilizó la ecuación (5), donde σ es la desviación estándar y n es el número de observaciones de la muestra (Walpole et al., 2012).

$$Error\ estandar = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

3.12. Modelo Lineal Generalizado (GLM)

Primero, se realizó un correlograma de Pearson para establecer la correlación lineal entre las variables. Donde el coeficiente de correlación (r) es un número entre 1 y -1 (0,9 o -0,9 se considera

alta colinearidad) (Vinod, 2017). Posteriormente, con un Modelo Lineal Generalizado (GLM por sus siglas en inglés) en el programa *R Studio* (R Team Core, 2013) se definió el vínculo entre la variable dependiente, es decir, concentración de ion nitrato (C) y las variables geomorfométricas independientes utilizadas en el modelo geoespacial (Tabla 1) (Cayuela, 2009). El GLM se realizó a partir de un análisis del Criterio de Información Akaike (AIC) para predecir el error menor y la calidad del mejor modelo estadístico (Burnham & Anderson, 2004). Con una selección estadística hacia atrás (*backward selection* se contrarrestó la hipótesis completa ($C \sim \text{LSF} + \text{TWI} + \text{TRI} + \text{FA} + \text{S}$) contra la hipótesis alternativa ($C \sim \text{TWI} + \text{S}$). Todas las covariables se estandarizaron de 0 a 1. Finalmente, los parámetros del modelo se utilizaron para evaluar el peso de cada interacción de covariable que explica la concentración de ion nitrato. El código utilizado se presenta en el Apéndice C así como el conjunto de datos utilizado (Tabla C1).

Tabla 5

Distribución de la hipótesis nula (H0) según el diseño experimental planteado en agua superficial.

Diseño experimental	Tratamiento	Hipótesis nula (H0)
Concentración de ion nitrato entre las zonas con rango alto y bajo de probabilidad de concentrar humedad.	Alta probabilidad Baja probabilidad	No existe diferencia significativa en la concentración de ion nitrato entre los tratamientos de alta probabilidad y baja probabilidad.
Concentración de ion nitrato en zonas de la plantación que se encuentran con cobertura vegetal y áreas con suelo descubierto entre plantas.	Con cobertura Sin cobertura	No existe diferencia significativa en la concentración de ion nitrato entre los tratamientos sin cobertura y con cobertura.
Concentración de ion nitrato en los diferentes puntos de muestreo (muestreo estratificado)	Convencional	No existe diferencia significativa en la concentración de ion nitrato en los diferentes puntos de muestreo.

Capítulo 4

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Modelo geoespacial

4.1.1. Pendiente (S) y factor de longitud de la pendiente (LSF)

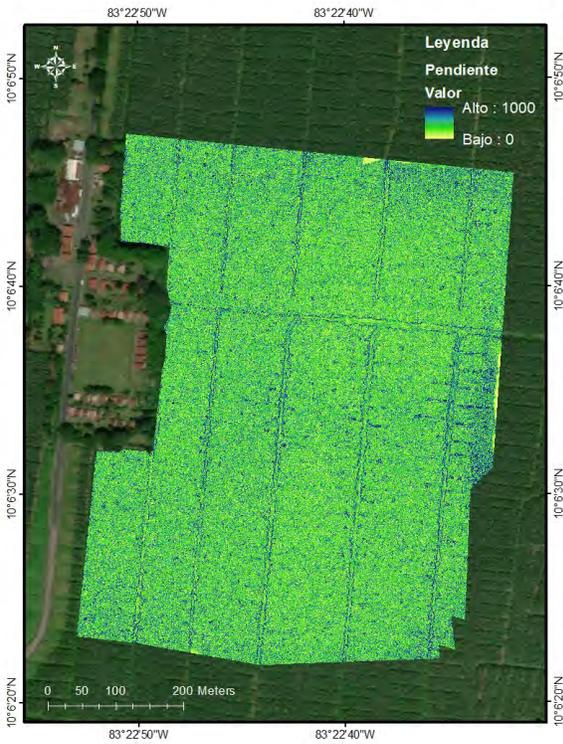
Se obtuvo que el gradiente de pendiente normalizada (Figura 9 (a)) más alto en la zona de estudio corresponde a los canales secundarios y terciarios. Este gradiente alto de pendiente provoca una escorrentía rápida donde aumenta la velocidad y el volumen de agua, lo que causa, pérdida potencial de suelo (Coletto Flores, 2019). Por otra parte, en la Figura 9 (b) se muestra el mapa raster del factor de longitud de la pendiente. En este se observa que la mayor incidencia de la topografía sobre el transporte de sedimento en la zona de estudio, se presenta de igual manera en los canales secundarios y terciarios. Para mejor detalle ver Figura D2 y D3, Apéndice D.

4.1.2. Índice de rugosidad del terreno (TRI)

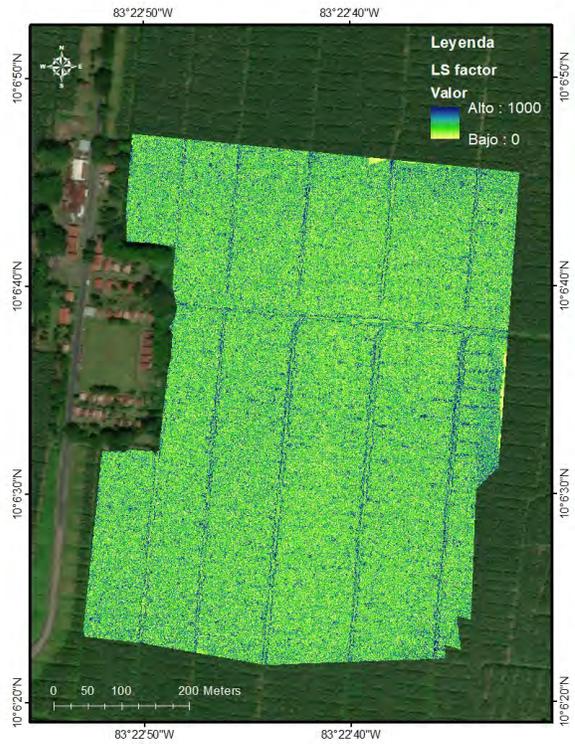
El índice de rugosidad del terreno (Figura 10 (a)), calculado para conocer la variabilidad en la elevación, indica que en las secciones con pendiente más pronunciada, es decir en los canales secundarios y terciarios, la rugosidad es mayor. Por el contrario, en la zona de la plantación los valores de rugosidad son más bajos debido a que presentan una variabilidad del terreno leve (Riley et al., 1999). Para más detalle ver Figura D4, Apéndice D.

Figura 9

Ráster de la pendiente (S) y del factor de longitud de la pendiente (LSF) en la zona de estudio.



(a) Pendiente (S)

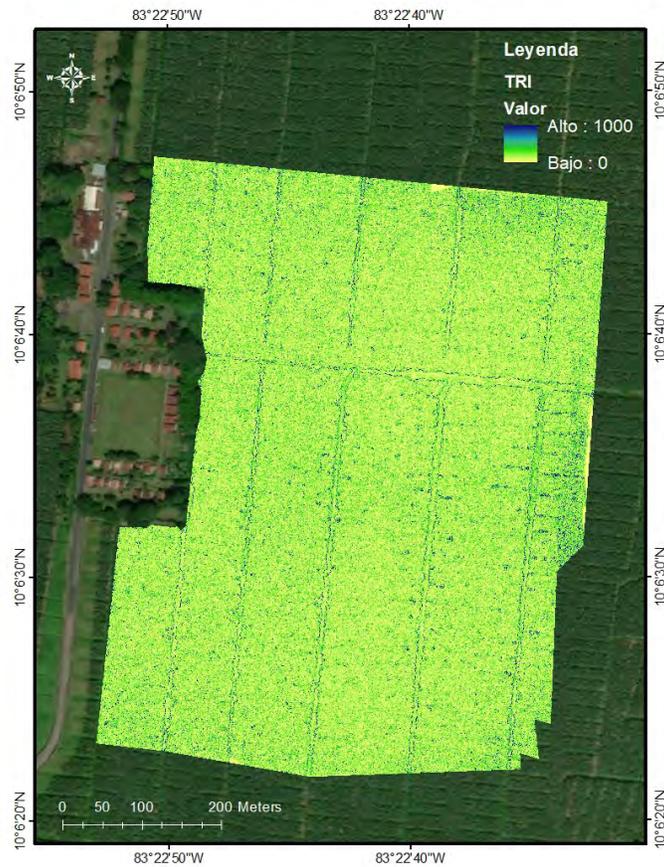


(b) Factor de longitud de la pendiente (LSF)

Nota: (a) La figura muestra la pendiente (S), en color azul se indican los valores más altos de pendiente (drenajes) y el color amarillo los valores más bajos (zona de plantación). (b) La figura muestra el factor de longitud de la pendiente (LSF), en color azul se indican los valores más altos longitud de la pendiente (drenajes) y el color amarillo y verde los valores más bajos (zona de plantación). Todas las variables se normalizaron de 0 a 1000, donde 1000 se considera alto y 0 bajo.

Figura 10

Ráster del índice de rugosidad del terreno (TRI) en la zona de estudio.



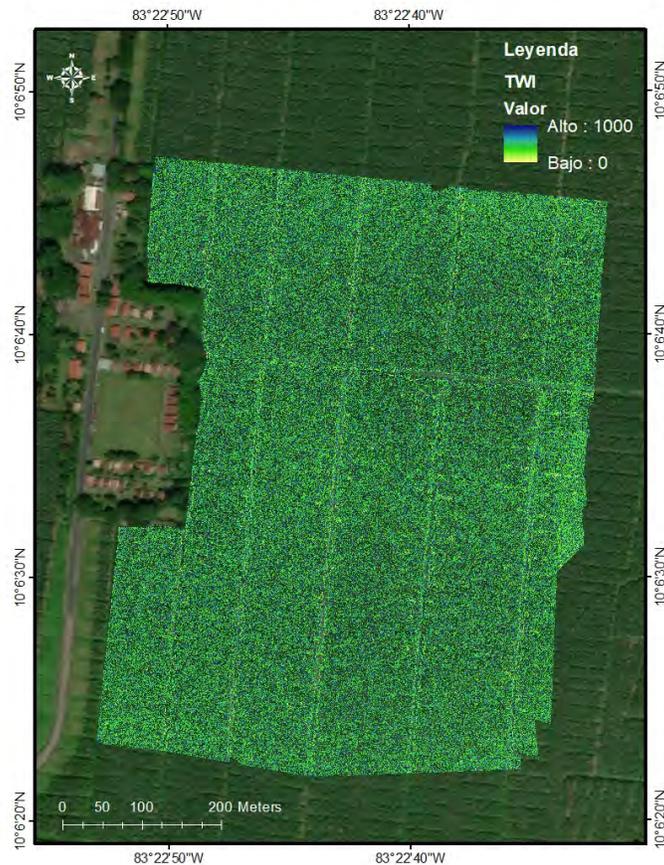
Nota: La figura muestra el índice de rugosidad del terreno (TRI), en color azul se indican los valores más altos de rugosidad (drenajes) y el color amarillo y verde los valores más bajos (zona de plantación). Todas las variables se normalizaron de 0 a 1000, donde 1000 se clasifica como valor alto y 0 como bajo.

4.1.3. Índice topográfico de humedad (TWI)

Los valores del índice topográfico de humedad (Figura 11) muestran la distribución de la humedad. Como se esperaba, los drenajes terciarios y secundarios son áreas más propensas a condiciones de saturación. Estas áreas son idóneas para comprender los impactos topográficos de los procesos hidrológicos como la escorrentía superficial, infiltración y erosión (Gaspari et al., 2013). Para más detalle ver Figura D5, Apéndice D.

Figura 11

Ráster del índice topográfico de humedad (TWI) de la zona de estudio.



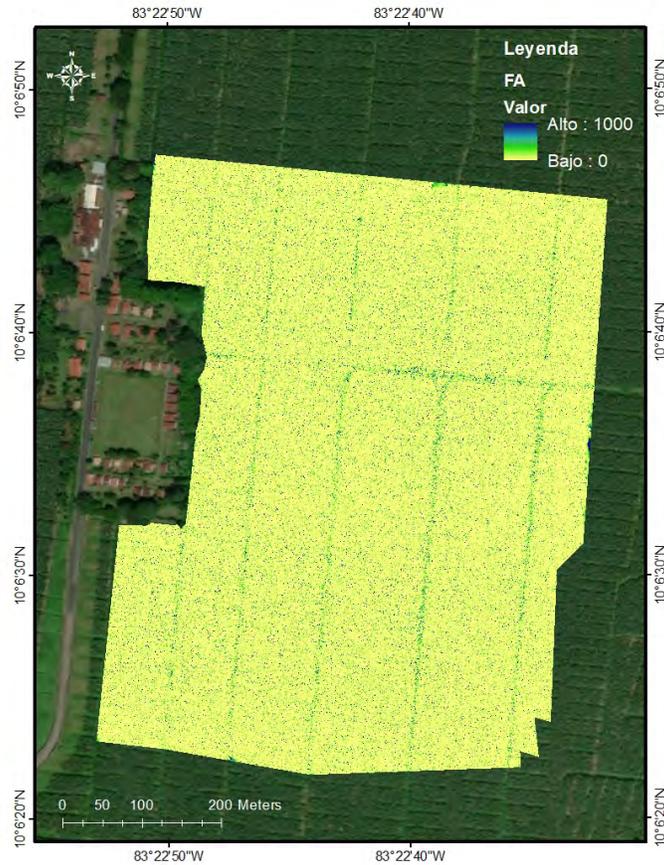
Nota: La figura muestra el índice topográfico de humedad (TWI), en color azul se indican los valores más altos de humedad (drenajes) y el color amarillo los valores más bajos (zona de plantación). Todas las variables se normalizaron de 0 a 1000, donde 1000 se clasifica como valor alto y 0 como bajo.

4.1.4. Acumulación del flujo (FA)

El ráster de acumulación de flujo se muestra en la Figura 12. Hay valores altos de acumulación en áreas de flujo concentrado como los drenajes secundarios y terciarios (Arnold, 2010; Schäuble et al., 2008). La zona de plantación se observa como área de baja acumulación de flujo. Para más detalle ver Figura D6, Apéndice D.

Figura 12

Ráster de acumulación de flujo (FA) de la zona de estudio.



Nota: La figura muestra la acumulación de flujo (FA), en color azul se indican los valores más altos de humedad (drenajes) y el color amarillo los valores más bajos (zona de plantación). Todas las variables se normalizaron de 0 a 1000, donde 1000 se clasifica como valor alto y 0 como bajo.

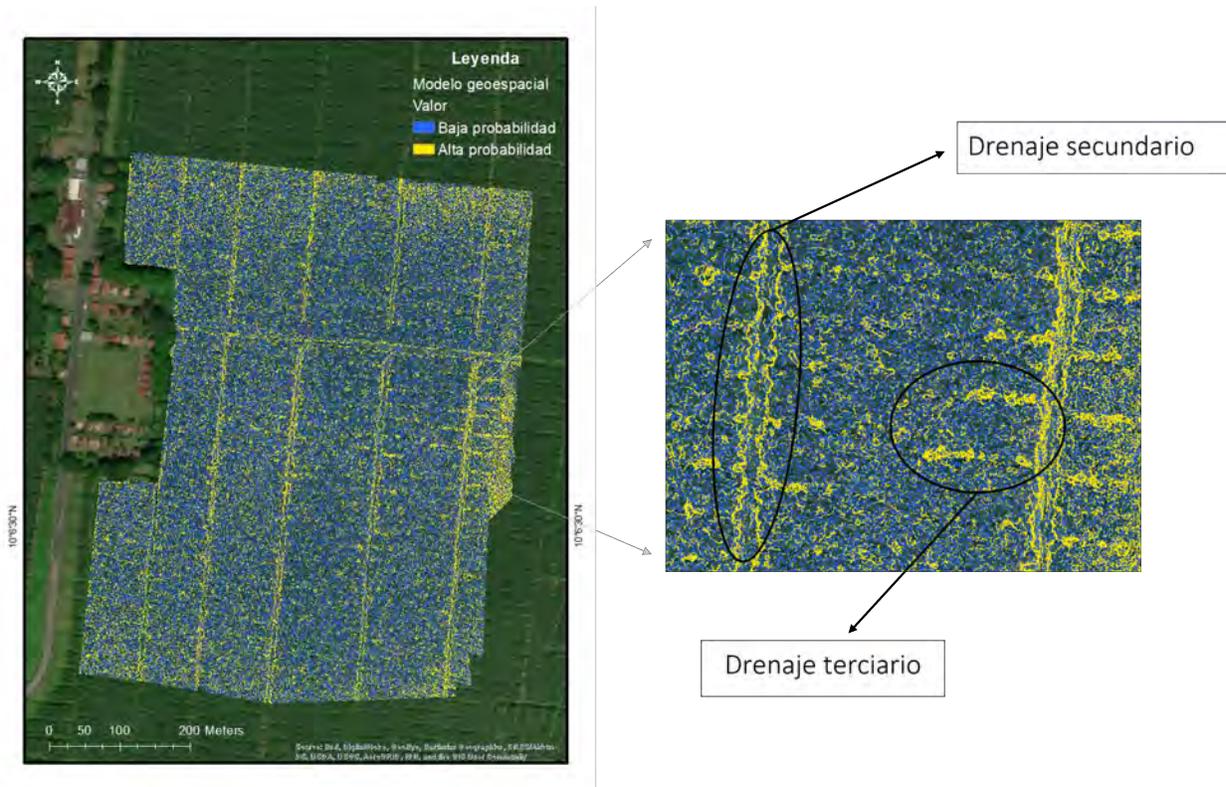
4.1.5. Superposición de las capas

El resultado final del modelo geoespacial se muestra en la Figura 13. En las zonas de plantación, hay una menor probabilidad de concentrar humedad. Por otra parte, según lo esperado, es más probable que se presente una concentración de ion nitrato mayor en los drenajes tanto secundarios como terciarios ya que son áreas de mayor acumulación de humedad. Sin embargo, a pesar de se observan las áreas de drenajes como alta probabilidad y centro de los domos como baja probabilidad de concentrar humedad, la alta resolución del modelo geoespacial, condiciona el resultado

obtenido ya que no permite visualizar de forma más clara las áreas clasificadas. Para más detalle ver Figura D7, Apéndice C.

Figura 13

Modelo geoespacial obtenido a partir de las variables geomorfológicas en estudio.



Nota: En la figura se muestra el modelo geoespacial, se observa cómo aumenta la probabilidad de concentrar áreas de mayor humedad y por ende concentración de ion nitrato cerca de los drenajes secundarios y terciarios (color amarillo), así como en la zona de plantación (color azul), disminuye. A la derecha se observa en detalle los canales de los drenajes secundarios y terciarios. Todas las variables se normalizaron de 0 a 1000, donde 1000 se clasifica como valor alto y 0 como bajo.

4.2. Muestreo ambiental ion nitrato

La validación del modelo geoespacial se realizó a partir del monitoreo ambiental de la concentración de ion nitrato en agua superficial y suelo de la finca bananera. Asimismo, se realizó un

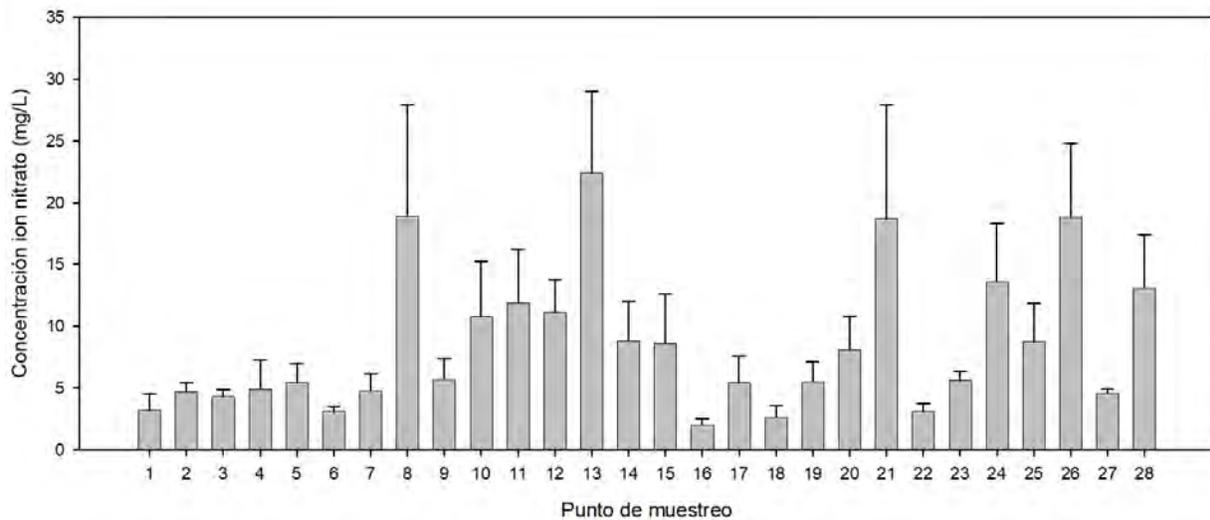
Modelo Lineal Generalizado (GLM) para definir el vínculo entre la concentración de ion nitrato y las variables geomorfométricas utilizadas en el desarrollo del modelo geoespacial con el fin de optimizarlo.

4.2.1. Concentración de ion nitrato en agua superficial

A modo de resumen, los resultados de ion nitrato en agua superficial de todos los puntos analizados, se observan gráficamente en la Figura 14, así como, espacialmente se muestra la Figura 15. El resultado de cada uno de estos puntos de muestreo correspondía a un diseño experimental. A continuación se detalla el análisis. Asimismo, los datos crudos utilizados en el análisis se indican en el cuadro E1 del apéndice E. El volumen de agua promedio recolectado en las trampas de escorrentía se muestra en la Figura E1 del apéndice E.

Figura 14

Concentración promedio de ion nitrato en agua superficial en los diferentes puntos de muestreo.



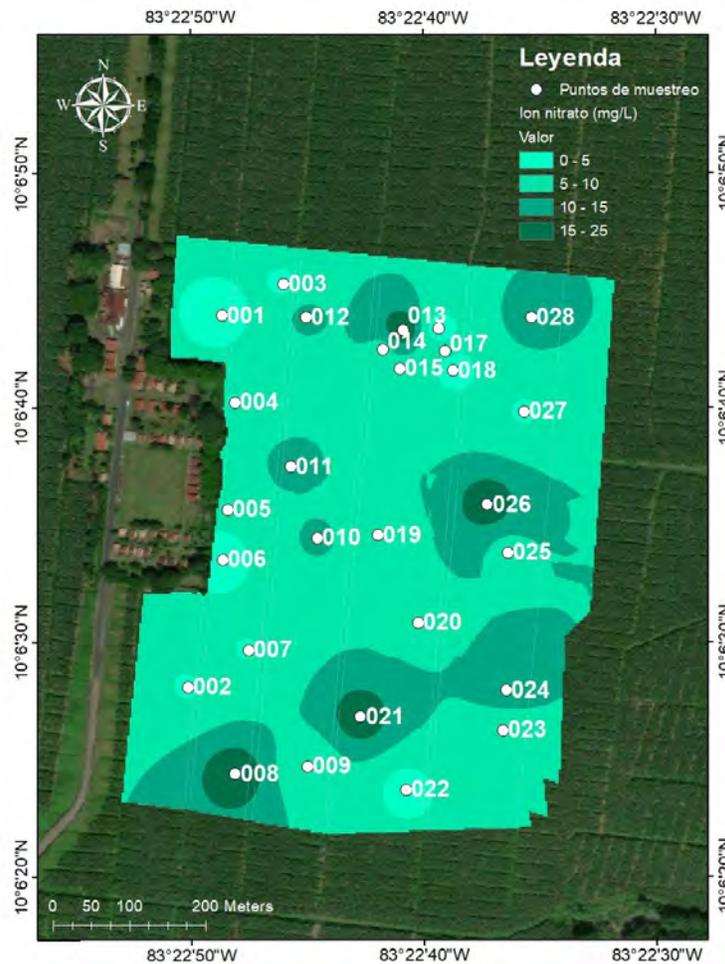
Nota: Se incluyen barras de error estándar de la media del conjunto de datos de concentración de ion nitrato de los cinco muestreos realizados en agua superficial.

4.2.1.1. Validación modelo geoespacial

Los valores de concentración de ion nitrato en las zonas con rango alto y bajo de probabilidad de concentrar humedad, no mostraron una distribución normal en la prueba Shapiro-Wilks ($p < 0,05$). En la prueba Kruskal Wallis, se obtuvo un valor de probabilidad de $p = 0,5687$, por encima del nivel de significancia ($p > 0,05$). Por lo tanto, con un nivel de confianza del 95 %, no se rechaza la hipótesis nula, es decir, no existe diferencia estadísticamente significativa en la concentración de ion nitrato en los tratamientos de alta y baja probabilidad de concentrar humedad.

Figura 15

Distribución espacial de la concentración promedio de ion nitrato en agua superficial en los diferentes puntos de muestreo.



Por otra parte, el promedio de concentración de ion nitrato en agua superficial, obtenido de los cinco muestreos realizados, fue de $8,73 \pm 1,53$ mg/L en el tratamiento de alta probabilidad y en el de baja probabilidad el promedio fue de $11,28 \pm 2,49$ mg/L (Figura 16).

Se esperaba que la concentración del compuesto químico en estudio en las zonas con alta probabilidad fuera mayor, sin embargo, los datos obtenidos difieren de lo esperado. Este comportamiento se puede deber a distintas razones. La primera es que según Murillo et al. (2016) la erosión en fincas bananeras con sistema de suelo descubierto puede ser de entre 1 t/ha/año a 1,8 t/ha/año en clase de suelo I y II (predominantes en la zona de estudio). Esta condición de probabilidad de erosión pudo causar la modificación del diseño topográfico de los domos (disminución de pendiente) entre el periodo en el que se tomaron las imágenes VANT, de donde se extrajo información topográfica (2018) y el periodo en el que se realizó la validación del modelo geoespacial con el muestreo (2021-2022). Asimismo, el comportamiento observado también pudo ser causado, ya que, según Valverde (2021), la zona de estudio presentó la tabla de agua a los 180 cm de profundidad, este valor permite clasificar el área como pobremente drenada, y por consiguiente, el agua se pudo acumular en el centro de los domos, lo que resultó en una concentración de ion nitrato mayor.

Puesto que no hay diferencias significativas entre la ubicación de los puntos de muestreo (centro de los domos y entrada de los canales terciarios), se pueden involucrar otros criterios de conveniencia y oportunidad para seleccionar los sitios de muestreo al replicar la metodología. Durante las visitas de campo, se observó que los puntos de muestreo que se encontraban en la entrada de los canales terciarios tenían menor riesgo de ser obstáculos para las tareas diarias de producción en la finca en comparación a las ubicadas en el centro de los domos.

4.2.1.2. Modelo Lineal Generalizado (GLM)

Con el criterio AIC, se apoya el modelo de la hipótesis alternativa ($AICc=15,76$) contra la hipótesis completa ($AICc=23,61$). La metodología utilizada sugiere que el mejor GLM corresponde a los valores de pendiente (S) y el índice topográfico de humedad (TWI). Es decir, la concentración de

ion nitrato obtenida en la zona de estudio se ve influenciada por estas dos variables. Con el fin de optimizar el modelo geoespacial para replicar la metodología propuesta, el potencial usuario, podría utilizar solamente las variables de pendiente (S) y el índice topográfico de humedad (TWI), sin necesidad de aplicar todas las utilizadas de la Tabla 1, (la correlación de Pearson se indica en la Figura C1, Apéndice C). La Tabla 6 proporciona los parámetros del modelo. Este modelo se podría mejorar realizando el mismo proceso pero con información topográfica extraída en el mismo año en el que se realice el muestreo.

La variabilidad de datos, devianza, fue de 4 %, esto corresponde a la proporción de probabilidad de acumular humedad que no es explicada por el modelo geoespacial.

$$D^2 = \left(\frac{2,0326}{2,1082} \right) \cdot 100$$

$$D^2 = 4 \%$$

Tabla 6

*Parámetros utilizados para modelar la concentración de ion nitrato en agua superficial. La desviación nula es 2,1082 en 27 grados de libertad (° df), la desviación residual es 2,0326 en 25° df y el AIC es 14,2. **P=0,01.*

Términos del modelo	Valor estimado	Error estándar	Valor de t	P(> t)
TWI+S	0,4438	0,15	2,959	0,00667**
TWI	-0,1433	0,2731	-0,525	0,60437
S	-0,2248	0,2453	-0,916	0,36825

Nota: : La tabla proporciona los parámetros del modelo obtenido con el software estadístico RStudio.

4.2.1.3. Comparación tratamiento de coberturas

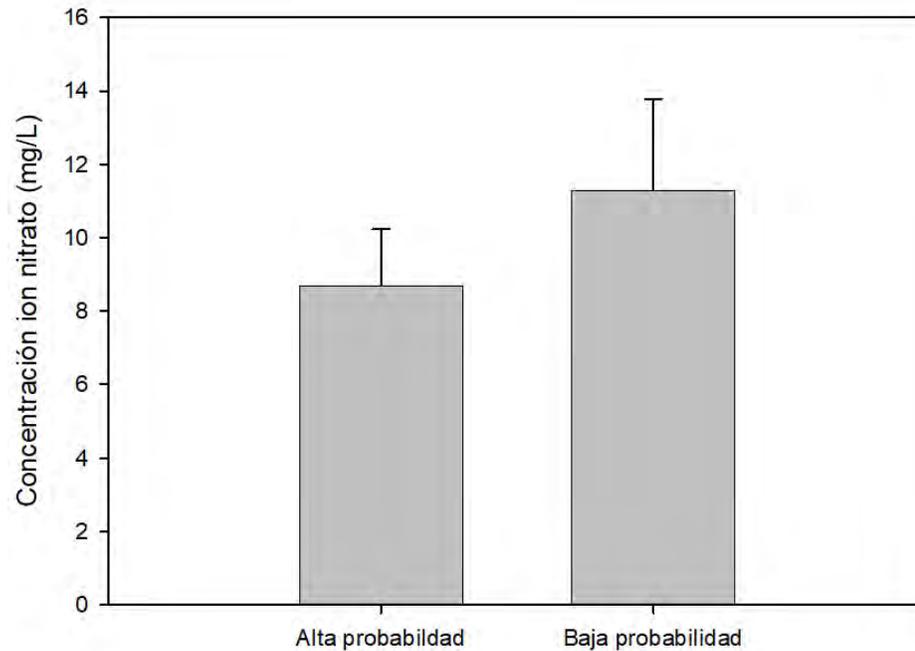
Los valores de concentración de ion nitrato en las zonas con tratamiento de cobertura vegetal y suelo descubierto entre plantas, no mostraron una distribución normal en la prueba Shapiro-Wilks ($p < 0,05$). En la prueba Kruskal Wallis, se obtuvo un valor de probabilidad de $p = 0,0005$, por debajo del nivel de significancia ($p < 0,05$). Por lo tanto, con un nivel de confianza del 95 %, se rechaza la hipótesis nula, es decir, existe diferencia estadísticamente significativa en la concentración de ion nitrato en los tratamientos con cobertura y sin cobertura.

En la Figura 17 se muestra la concentración de ion nitrato en este diseño experimental. La concentración promedio sin cobertura fue de $13,25 \pm 3,10$ mg/L. Por el contrario, el tratamiento con cobertura vegetal muestra una concentración promedio de $3,35 \pm 0,85$ mg/L.

Estos resultados se pueden explicar con las afirmaciones realizadas en las investigaciones de Murillo et al. (2016) y Valverde (2021), ya que, si bien no se cuantificaron las pérdidas por erosión, visualmente se notaba la diferencia en la toma de muestras (Figura 18). En el resultado, la concentración de ion nitrato del tratamiento sin cobertura casi triplica a la obtenida si se utiliza una cobertura vegetal de arvenses (coberturas vegetales que no compitan con el cultivo). Por otra parte, los autores establecen que la erosión aumenta con la precipitación, esto se debe a que las coberturas tienen un efecto amortiguador de los golpes directos de las lluvias sobre el suelo disminuyendo la escorrentía superficial y por ende, la concentración de los compuestos químicos como el nitrato.

Figura 16

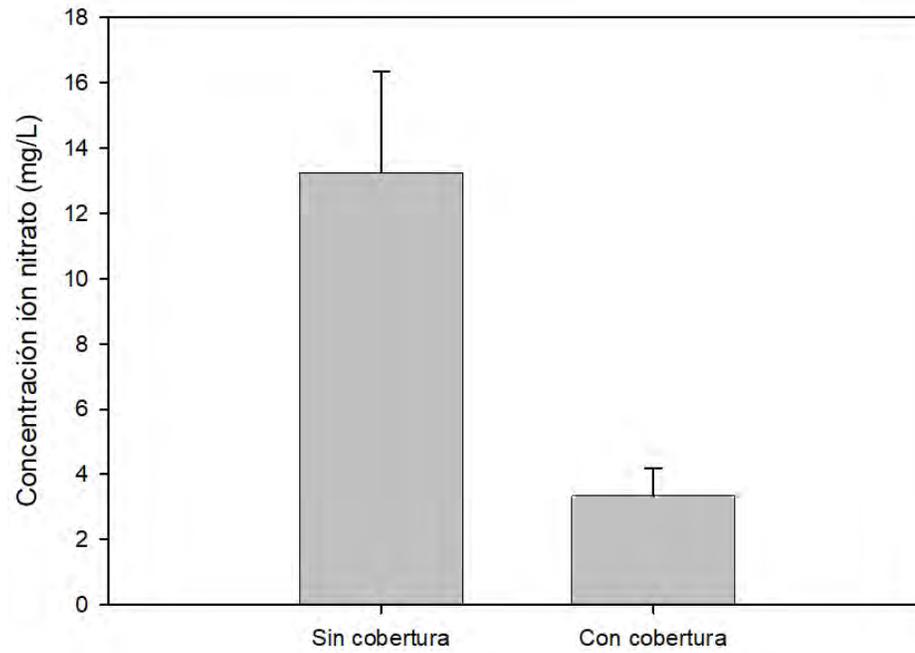
Concentración promedio de ion nitrato en agua superficial en el tratamiento de alta y baja probabilidad de concentrar humedad según el modelo geoespacial planteado.



Nota: En la figura se muestra la concentración de ion nitrato obtenida en los tratamientos definidos como alta y baja probabilidad de concentrar humedad con el fin de validar el modelo geoespacial. Se establecen barras de error estándar de la media del conjunto de datos de los cinco muestreos realizados de agua superficial.

Figura 17

Concentración promedio de ion nitrato en agua superficial en el tratamiento sin cobertura y con cobertura.



Nota: En la figura se muestra la concentración de ion nitrato obtenida en los tratamientos definidos como sin cobertura y con cobertura. Se establecen barras de error estándar de la media del conjunto de datos de los cinco muestreos realizados de agua superficial.

Figura 18

Muestras del tratamiento sin cobertura (suelo descubierto) así como con cobertura entre plantas de banano.



(a) Sin cobertura



(b) Con cobertura

4.2.1.4. Muestreo convencional

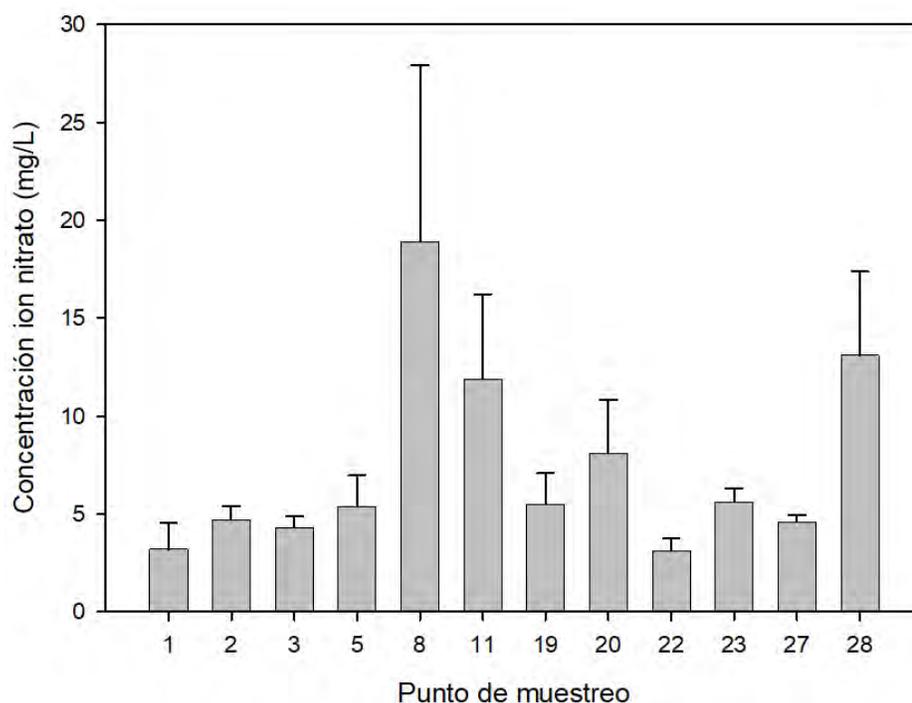
Los valores de concentración de ion nitrato en el muestreo convencional estratificado, mostraron una distribución normal en la prueba Shapiro-Wilks ($p > 0,05$). En el análisis estadístico paramétrico de varianza ANOVA de una vía con prueba Tukey, se obtuvo un valor de probabilidad de $p = 0,0584$, por encima del nivel de significancia ($p > 0,05$) y una prueba Tukey con todas las letras comunes. Por lo tanto, con un nivel de confianza del 95 %, no se rechaza la hipótesis nula, es decir, no existe diferencia significativa en la concentración de ion nitrato en los diferentes puntos de muestreo definidos bajo un muestreo estratificado.

En la Figura 19 se muestra la concentración de ion nitrato en este diseño experimental. La concentración mayor la presentó el punto de muestreo 8 con $18,90 \pm 9,03$ mg/L. Seguido por el 28 con

13,10±4,28 mg/L. El punto de muestreo con el valor menor fue el 22 con una concentración de 3,10±0,65 mg/L.

Figura 19

Concentración promedio de ion nitrato en agua superficial en los diferentes puntos de muestreo (muestreo estratificado).



Nota: En la figura se muestra la concentración de ion nitrato obtenida en el tratamientos definido como convencional. Se establecen barras de error estándar de la media del conjunto de datos de los cinco muestreos realizados de agua superficial.

4.2.2. Concentración de ion nitrato en suelo

4.2.2.1. Comparación tratamiento de coberturas

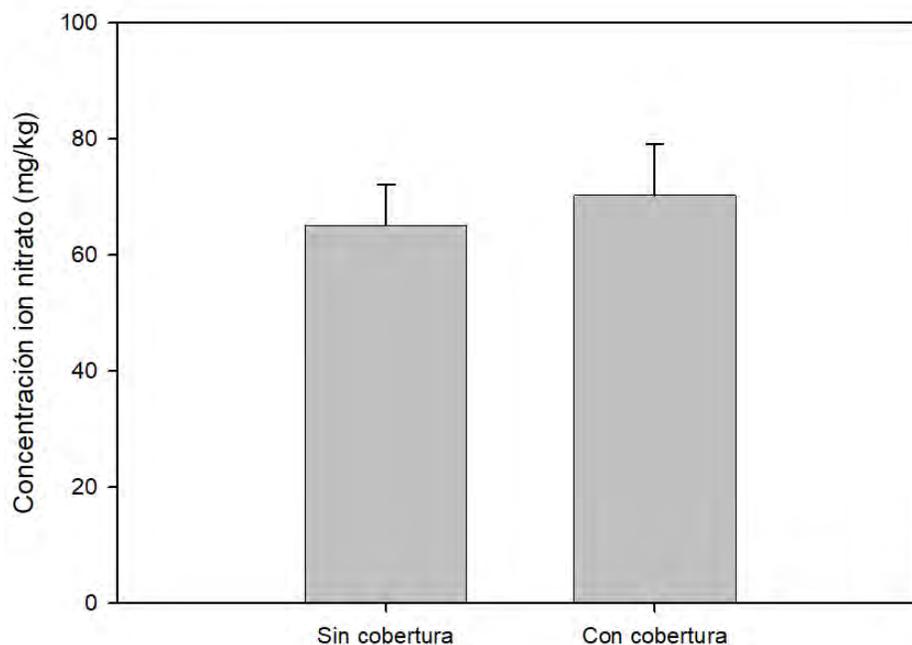
Los valores de concentración de ion nitrato en las zonas con tratamiento de cobertura vegetal y suelo desnudo entre plantas, mostraron una distribución normal en la prueba Shapiro-Wilks ($p >$

0,05). En el análisis estadístico paramétrico de varianza ANOVA de una vía con prueba Tukey, se obtuvo un valor de probabilidad de $p = 0,6509$, por encima del nivel de significancia ($p > 0,05$) y una prueba Tukey con todas las letras comunes. Por lo tanto, con un nivel de confianza del 95 %, se rechaza la hipótesis nula, es decir, no existe diferencia estadísticamente significativa en la concentración de ion nitrato en los tratamientos con cobertura y sin cobertura. El resumen de los resultados se observa en el cuadro E2 del apéndice E.

En la Figura 20 se muestra la concentración de ion nitrato en este diseño experimental. La concentración promedio sin cobertura fue de $65,10 \pm 7,01$ mg/kg. Por el contrario, el tratamiento con cobertura vegetal muestra una concentración promedio de $70,27 \pm 8,91$ mg/kg. Si se comparan con los resultados obtenidos de ion nitrato en agua superficial, se observa un comportamiento similar tomando en cuenta el error estándar de la media. Esto se explica porque la cobertura en el suelo contribuye a mejorar la infiltración del agua y la retención de humedad (Muñoz, 2012). Basado en observaciones previas (Valverde, 2021), es probable que por un fenómeno de saturación del suelo debido a la precipitación, el agua que contenía el nitrato disuelto, no tuvo el tiempo de contacto suficiente con el suelo para que se absorbiera el ion, por lo que, no se presentaron diferencias estadísticamente significativas en la concentración.

Figura 20

Concentración promedio de ion nitrato en suelo en el tratamiento sin cobertura y con cobertura.



Nota: En la figura se muestra la concentración de ion nitrato obtenida en los tratamientos definidos como sin cobertura y con cobertura. Se establecen barras de error estándar de la media del conjunto de datos de los cinco muestreos realizados de suelo.

4.3. Hoja divulgativa

Con el fin de proveer información técnica y científica actualizada sobre la producción de banano a la población costarricense interesada, CORBANA difunde noticias en medios de comunicación así como en plataformas virtuales. Con base en lo anterior, se elaboró una hoja divulgativa sobre la metodología planteada en esta investigación para ser difundida a nivel interno y externo de la organización. En el Apéndice F se adjunta el detalle de la publicación con el fin de replicar la metodología planteada en otras áreas de la finca bananera en estudio así como en otras zonas de producción.

5. CONCLUSIONES

- Se diseñó y se validó la metodología de monitoreo ambiental de ion nitrato en agua superficial de escorrentía y en suelo, la cual está disponible para ser utilizada por parte de la Corporación Bananera Nacional (CORBANA) en otras fincas, con la condición de que el modelo geoespacial incluido en esta metodología, solamente contempla el estudio de agua de escorrentía superficial, debido a limitaciones intrínsecas a las variables geomorfométricas utilizadas.
- No se demostró que exista diferencia estadísticamente significativa entre la concentración de ion nitrato de las muestras de agua superficial de escorrentía tomadas en las áreas de cultivo en el centro del domo, identificadas por el modelo geoespacial como áreas de baja probabilidad de acumulación de humedad, y los canales terciarios, identificados como áreas de alta acumulación de humedad, lo que implica que, las trampas de escorrentía superficial se pueden colocar en los canales terciarios para disminuir el riesgo de obstaculización de las labores diarias de la finca y de que las trampas sean dañadas accidentalmente.
- La concentración de ion nitrato en agua superficial de escorrentía fue cerca de tres veces menor en las zonas que tenían cobertura vegetal en el suelo entre las plantas, en comparación con las zonas que tenían suelo descubierto, lo que sugiere que la presencia de la cobertura vegetal podría afectar la concentración del ion nitrato en el agua de escorrentía superficial.
- Las variables con mayor influencia para el establecimiento del modelo geoespacial en esta metodología son la pendiente (S) y el índice topográfico de humedad (TWI), ya que, en conjunto, explican la variabilidad de la concentración de ion nitrato en agua superficial de escorrentía, si bien las demás variables geomorfométricas ayudan a complementar la información, no presentaron un aporte significativo.
- El régimen de precipitación constituye una condición limitante para implementar la metodología de monitoreo de ion nitrato propuesta, debido a que es un factor fundamental para

generar el agua superficial de escorrentía. En el periodo de estudio comprendido entre agosto del 2021 hasta agosto del 2022, se observó un régimen de precipitación bajo en comparación con el registro histórico, debido al efecto del fenómeno natural La Niña en el Caribe costarricense.

- Debido a la especificidad de las condiciones, este modelo geoespacial solamente se puede calcular a partir de imágenes de alta resolución como las tomadas por un vehículo aéreo no tripulado (VANT, dron), puesto que, la información pública de topografía que se encontró de forma libre en Costa Rica, no contenía una resolución suficiente para caracterizar con el grado de detalle necesario en este estudio la topografía de la finca.
- Se realizó un abordaje novedoso del problema mediante un enfoque transdisciplinario, en el cual, se integraron profesionales de distintas áreas de conocimiento que colaboraron en el diseño este proyecto. Este enfoque mostró fortalezas importantes como método de abordaje de esta problemática ambiental, por lo que, sería recomendable promover este tipo de metodologías de trabajo en futuros trabajos finales de graduación de la carrera de Ingeniería Agrícola y de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica.

6. RECOMENDACIONES

- Realizar el modelo geoespacial a partir de superposición de capas (pendiente (S) y el índice topográfico de humedad (TWI)) a una resolución de al menos 50 cm y con esto, mejorar la visualización de los mapas de referencia.
- Comparar el modelo geoespacial obtenido en esta investigación con uno realizado a partir de curvas de nivel, imágenes de los radares de RADARSAT-2 y Sentinel o algún otro instrumento para caracterizar la topografía, con el fin de obtener modelos a partir de otros recursos.
- Complementar esta investigación con un estudio de erosión donde se utilicen variables incluidas en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) como: la erosividad de la lluvia y la escorrentía, la erodabilidad del suelo, la longitud de la pendiente, factor de uso de suelo y las prácticas de apoyo para determinar si la cobertura vegetal tiene un efecto sobre la concentración de ion nitrato.
- Evaluar la robustez de la metodología propuesta considerando época seca y lluviosa, o bien, diferentes condiciones de topografía para determinar si es posible implementar la metodología en otros sitios de estudio.
- Corroborar que la metodología del modelo geoespacial, se pueda replicar en programas de acceso libre como SAGA GIS o QGIS, ya que, el no contar con una licencia de pago de ArcGIS, podría constituir un factor limitante para su aplicación.

Referencias

- Acón-Ho, J., Alpízar-Oses, L. & WingChing-Jones, R. (2013). Percolación y lixiviación de nutrientes en suelos bananeros al este del río Reventazón, Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 24(2), 329. <https://doi.org/10.15517/AM.V24I2.12532>.
- Arnold, N. (2010). A new approach for dealing with depressions in digital elevation models when calculating flow accumulation values. *Progress in Physical Geography*, 34(6), 781-809.
- Aryal, D. R., Geissen, V., Ponce-Mendoza, A., Ramos-Reyes, R. R. & Becker, M. (2012). Water quality under intensive banana production and extensive pastureland in tropical Mexico. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175(4), 553-559. <https://doi.org/10.1002/jpln.201100117>.
- Audesirk, T., Audesirk, G. & Byers, B. E. (2011). *Biology: Life on Earth with Physiology*. Pearson.
- Bolaños, E. (2019). Efecto de las inundaciones en las plantaciones bananeras del Caribe de Costa Rica [Flooding effect on banana plantations in the Caribbean of Costa Rica]. <https://www.musalit.org/seeMore.php?id=19580&recent>.
- Brase, T. (2018). Basics of a Geographic Information System. *Precision Agriculture Basics* (pp. 37-62). John Wiley Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2134/precisionagbasics.2016.0119>.
- Burnham, K. P. & Anderson, D. R. (2004). Multimodel Inference: Understanding AIC and BIC in Model Selection. *Sociological Methods Research*, 33(2), 261-304. <https://doi.org/10.1177/0049124104268644>.
- Cayuela, L. (2009). Modelos lineales generalizados (GLM). *Materiales de un curso del R del IREC*.
- Chhabra, A., Manjunath, K. R. & Panigrahy, S. (2010). Non-point source pollution in Indian agriculture: Estimation of nitrogen losses from rice crop using remote sensing and GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(3), 190-200. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.02.007>.

- Cole-Parmer. (2021a). *Oakton by Cole-Parmer® Combination Ion-Selective Electrode (ISE), Nitrate*. <https://www.coleparmer.com/i/oakton-by-cole-parmer-combination-ion-selective-electrode-ise-nitrate/2750422>.
- Cole-Parmer. (2021b). *Oakton Ionic Strength Adjustor (ISA) Solution, 2M (NH₄)₂SO₄*. <https://www.coleparmer.com/i/oakton-ionic-strength-adjustor-isa-solution-2m-nh4-2so4-1-pint/3580360>.
- Coletto Flores, R. (2019). “Modelamiento Cartográfico De Los Niveles De Erosión Del Suelo Zona Agrícola, Perú.
- CORBANA. (2022). *Quienes somos*. <http://www.corbana.co.cr/somos/>.
- Corporación Bananera Nacional [CORBANA S.A]. (2021). *Estadísticas de la exportación bananera en Costa Rica*. <http://www.corbana.co.cr/banano-de-costa-rica/#estadistica>.
- Crawford, N. M. & Glass, A. D. M. (1998). Molecular and physiological aspects of nitrate uptake in plants. *Trends in Plant Science*, 3(10), 389-395. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(98\)01311-9](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(98)01311-9).
- Dallagassa, M. R., Iachecen, F., Carvalho, D. R. & Ioshii, S. O. (2019). La producción de un modelo geoespacial aplicado a la gestión de la salud. *Revista Brasileira de Enfermagem*, 72(2), 420-426.
- De Bie, H. & Bense, V. (2017). Nutrient losses by leaching and surface runoff in a banana plantation in the Atlantic Zone of Costa Rica. *CORBANA: Wageningen university*. <https://edepot.wur.nl/431354>.
- Di, H. & Cameron, K. (2002). Nitrate leaching in temperate agroecosystems: sources, factors and mitigating strategies. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 64(3), 237-256. <https://doi.org/10.1023/A:1021471531188>.
- Eaton, A., American Public Health Association, American Water Works Association & Water Environment Federation. (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater. *American Public Health Association (APHA): Washington, DC, USA, 21*.

- Environmental Systems Research Institute [ESRI]. (2021). *Create Drone Imagery Products in ArcGIS Pro*. <https://doc.arcgis.com/en/imagery/workflows/tutorials/create-drone-imagery-products-ortho-mapping.htm>.
- FAO. (2020). *Análisis del mercado del banano 2019*. <https://www.fao.org/3/cb0168es/cb0168es.pdf>.
- Garzón, J. & Cárdenas, E. (2013). Emisiones antropogénicas de amoníaco, nitratos y óxido nítrico: compuestos nitrogenados que afectan el medio ambiente en el sector agropecuario colombiano. *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*, 60(2), 121-138.
- Gaspari, F., Rodríguez Vagaria, A., Senisterra, G., Delgado, M. I. & Besteiro, S. (2013). Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas.
- Guzmán-Álvarez, J. A., González-Zuñiga, M., Fernández, J. A. S. & Calvo-Alvarado, J. C. (2022). Uso de sensores remotos en la agricultura: aplicaciones en el cultivo del banano. *Agronomy Mesoamerican*, 48279-48279.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1), 181-216. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1).
- Hernández-Ávila, J. E., Santos-Luna, R., Palacio-Mejía, L. S., Salgado-Salgado, A. L., Ríos-Salgado, V. H., Rodríguez-López, M. H. & Sepúlveda-Amor, J. (2010). Modelo geoespacial automatizado para la regionalización operativa en planeación de redes de servicios de salud. *salud pública de méxico*, 52(5), 432-446.
- Huang, P., Zhang, J., Zhu, A., Li, X., Ma, D., Xin, X., Zhang, C., Wu, S., Garland, G. & Pereira, E. I. P. (2018). Nitrate accumulation and leaching potential reduced by coupled water and nitrogen management in the Huang-Huai-Hai Plain. *Science of The Total Environment*, 610-611, 1020-1028. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.127>.
- IMN. (2015). *Boletín meteorológico mensual. Febrero 2015*. <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/14641/FEBRERO>.

- IMN. (2022). *Boletín meteorológico mensual. Febrero 2022*. <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/526292/FEBRERO>.
- Instituto Metereológico Nacional [IMN]. (2008). *El clima, su variabilidad y cambio climático en Costa Rica*. http://users.clas.ufl.edu/prwaylen/geo3280articles/el_clima_variabilidad_y_cambio_climatico_en_cr_version_final.pdf.
- Izaguirre, E. (2020). *Explorando alternativas para suplir la demanda de alimento en respuesta al aumento de población*. <https://ddd.uab.cat/record/220326>.
- Jiang, B. (2013). Head/Tail Breaks: A New Classification Scheme for Data with a Heavy-Tailed Distribution. *The Professional Geographer*, 65(3), 482-494. <https://doi.org/10.1080/00330124.2012.700499>.
- Kafle, B. P. (2020). Chapter 5 - Application of UV–VIS spectrophotometry for chemical analysis. En B. P. B. T. .-. C. A. Kafle & M. C. by Spectrophotometry (Eds.). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814866-2.00005-1>.
- Khatik, V. A., Sarode, D. B., Jadhav, R. N., Ingle, S. T. & Attarde, S. B. (2011). Assessment on residual soil nitrate of intensively fertilized banana farms of Jalgaon Region.
- Koirala, P., Thakuri, S., Joshi, S. & Chauhan, R. (2019). Estimation of Soil Erosion in Nepal Using a RUSLE Modeling and Geospatial Tool. *Geosciences*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/geosciences9040147>.
- Krouk, G., Crawford, N. M., Coruzzi, G. M. & Tsay, Y.-F. (2010). Nitrate signaling: adaptation to fluctuating environments. *Current Opinion in Plant Biology*, 13(3), 265-272. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.12.003>.
- Kruskal, W. H. & Wallis, W. A. (1952). Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American statistical Association*, 47(260), 583-621.
- Kumar, P. L., Selvarajan, R., Iskra-Caruana, M.-L., Chabannes, M. & Hanna, R. (2015). Biology, etiology, and control of virus diseases of banana and plantain. *Advances in virus research*, 91, 229-269. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/bs.aivir.2014.10.006>.

- López, A. & Espinosa, J. (1995). Manual de Nutrición y fertilización del banano. *International Plant Nutrition Institute*. <https://rb.gy/rxy7ul>.
- Mahmud, M. A. P., Ejeian, F., Azadi, S., Myers, M., Pejcic, B., Abbassi, R., Razmjou, A. & Asadnia, M. (2020). Recent progress in sensing nitrate, nitrite, phosphate, and ammonium in aquatic environment. *Chemosphere*, 259, 127492. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127492>.
- Marchesini, I., Rossi, M., Mondini, A., Santangelo, M. & Bucci, F. (2014). Morphometric signatures of landslides. *Third Open Source Geospatial Research and Education Symposium (OGRS), Espoo, Finland*, 10-13.
- Mattivi, P., Franci, F., Lambertini, A. & Bitelli, G. (2019). TWI computation: a comparison of different open source GISs. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 4(1), 6. <https://doi.org/10.1186/s40965-019-0066-y>.
- Muñoz, F. (2012). Costo control de malezas en finca Teresa 05. *Pococi, Costa Rica. Administrador de Compañía Bananera La Teresa SA finca*, 5.
- Murillo, J., Méndez-Estrada, V. H. & Brenes Prendas, S. (2016). Efecto de *Geophila macropoda* (Rubiaceae) como arvense de cobertura en la erosión hídrica en bananales de Guápiles, Limón, Costa Rica. *Cuadernos de Investigación UNED*, 8(2), 217-223.
- Nodeh, H. R., Sereshti, H., Afsharian, E. Z. & Nouri, N. (2017). Enhanced removal of phosphate and nitrate ions from aqueous media using nanosized lanthanum hydrous doped on magnetic graphene nanocomposite. *Journal of Environmental Management*, 197, 265-274. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.004>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2021). *FAOSTAT production statistics for banana and plantain 2019*. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- Ortuño, J. A., Tomás-Alonso, F. & Rubio, A. M. (2014). Chapter 9 - Ion-Selective Electrodes Based on Ionic Liquids. En A. Pérez De Los Ríos & F. J. B. T. -. I. L. i. S. T. Hernández Fernández (Eds.). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63257-9.00009-2>.

- Panagos, P., Borrelli, P. & Meusburger, K. (2015). A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water. *Geosciences*, 5(2), 117-126. <https://doi.org/10.3390/geosciences5020117>.
- Pike, R., Evans, I. & Hengl, T. (2009). Chapter 1 Geomorphometry: A Brief Guide. En T. Hengl & H. I. Reuter (Eds.), *Geomorphometry* (pp. 3-30). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00001-9](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00001-9).
- Poudyal, C. P., Chang, C., Oh, H.-J. & Lee, S. (2010). Landslide susceptibility maps comparing frequency ratio and artificial neural networks: a case study from the Nepal Himalaya. *Environmental Earth Sciences*, 61(5), 1049-1064. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0426-5>.
- Quesada-Román, A. (2021). Landslide risk index map at the municipal scale for Costa Rica. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 56, 102144. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102144>.
- R Team Core. (2013). R: A language and environment for statistical computing.
- Rienzo, J. A. D., Balzarini, M., Gonzalez, L., Casanoves, F. & Tablada, M. (2018). *InfoStat* (Ver. 2018). <https://www.infostat.com.ar/index.php>
- Riley, S. J., DeGloria, S. D. & Elliot, R. (1999). Index that quantifies topographic heterogeneity. *intermountain Journal of sciences*, 5(1-4), 23-27.
- Schäuble, H., Marinoni, O. & Hinderer, M. (2008). A GIS-based method to calculate flow accumulation by considering dams and their specific operation time. *Computers & Geosciences*, 34(6), 635-646.
- Serio, F., Miglietta, P. P., Lamastra, L., Ficocelli, S., Intini, F., De Leo, F. & De Donno, A. (2018). Groundwater nitrate contamination and agricultural land use: A grey water footprint perspective in Southern Apulia Region (Italy). *Science of The Total Environment*, 645, 1425-1431. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.241>.
- Sørensen, R., Zinko, U. & Seibert, J. (2006). On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(1), 101-112. <https://doi.org/10.5194/hess-10-101-2006>.

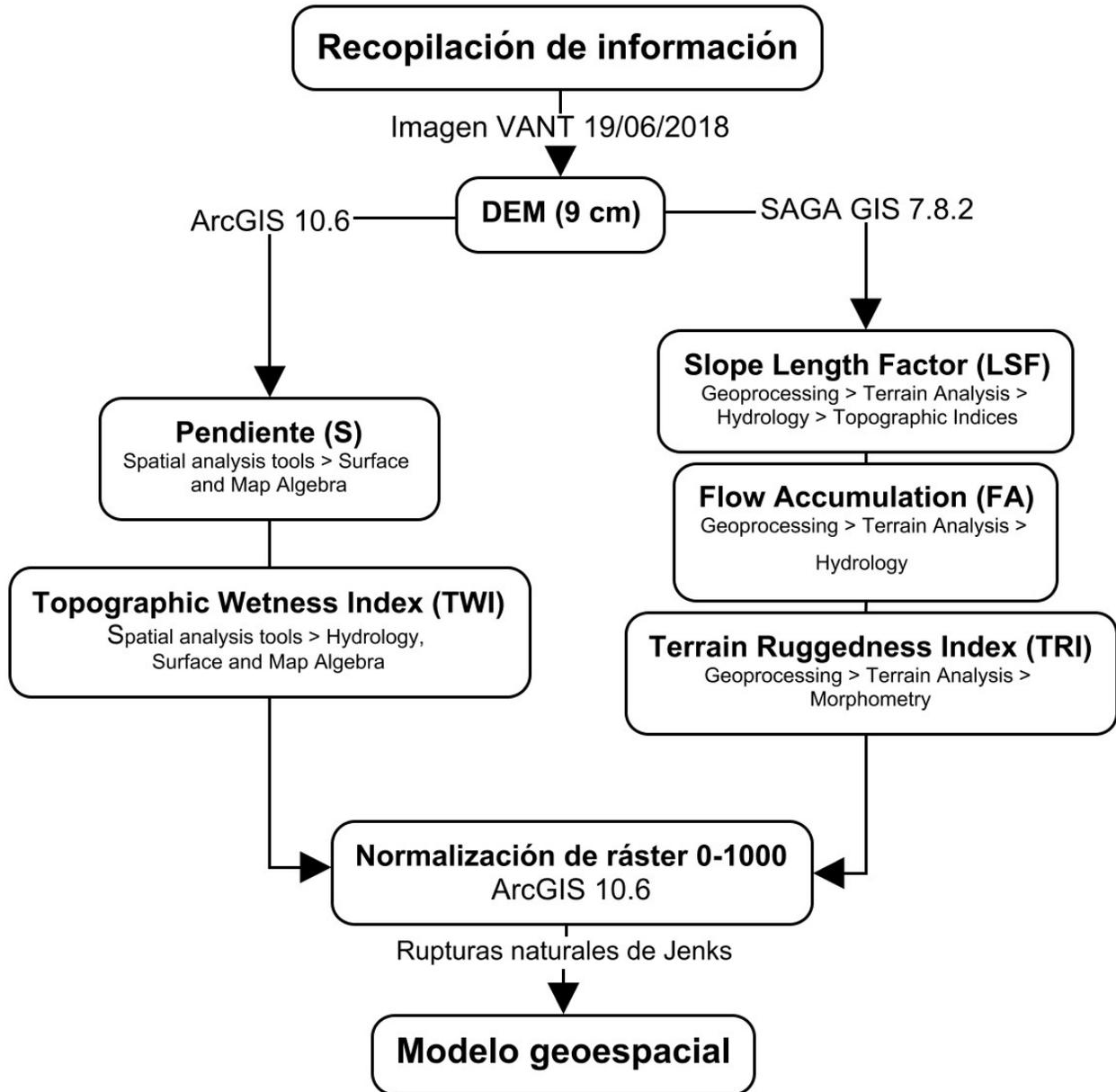
- Star, J. & Estes, J. (1991). Geographic information systems: An introduction. *Geocarto International*, 6(1), 46-46. <https://doi.org/10.1080/10106049109354297>.
- Thermo Fisher Scientific. (2021). *Orion Star™ A329 pH/ISE/Conductivity/Dissolved Oxygen Portable Multiparameter Meter*. <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/STARA3290>.
- Udvardi, M., Below, F. E., Castellano, M. J., Eagle, A. J., Giller, K. E., Ladha, J. K., Liu, X., Maaz, T. M., Nova-Franco, B., Raghuram, N., Robertson, G. P., Roy, S., Saha, M., Schmidt, S., Tegeder, M., York, L. M. & Peters, J. W. (2021). A research road map for responsible use of agricultural nitrogen. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.660155>.
- Valverde, E. (2021). *Efecto de distintos sistemas de manejo de coberturas sobre la salud del suelo, en una finca bananera de Siquirres, Limón, Costa Rica*. Universidad de Costa Rica.
- Vargas, A., Walter, W., Morales, M. & Vignola, R. (2017). *Ficha técnica del cultivo de banano*. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/reduccion-impacto-por-eventos-climaticos/Informe-final-Banano.pdf>.
- Vinod, H. D. (2017). Generalized correlation and kernel causality with applications in development economics. *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, 46(6), 4513-4534. <https://doi.org/10.1080/03610918.2015.1122048>.
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L. & Ye, K. (2012). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. *Norma*, 162, 157.

Apéndice A

Metodología modelo geoespacial

Figura A1

Esquema de la metodología utilizada para obtener el modelo geoespacial.



Apéndice B

Prueba de estabilidad ion nitrato

Tabla B1

Prueba preliminar de estabilidad de ion nitrato.

Fecha	Temperatura (°C)	Pendiente de calibración	Ion nitrato (mg/L)		
			1	2	3
24/05/2022	23,6	-51	4,2	4,3	4,5
25/05/2022	26,1	-49	4,3	4,6	4,6
26/05/2022	26,7	-49	4,4	4,5	4,7
27/05/2022	23,7	-49	4,3	4,3	4,8

Apéndice C

Modelo Lineal Generalizado (GLM)

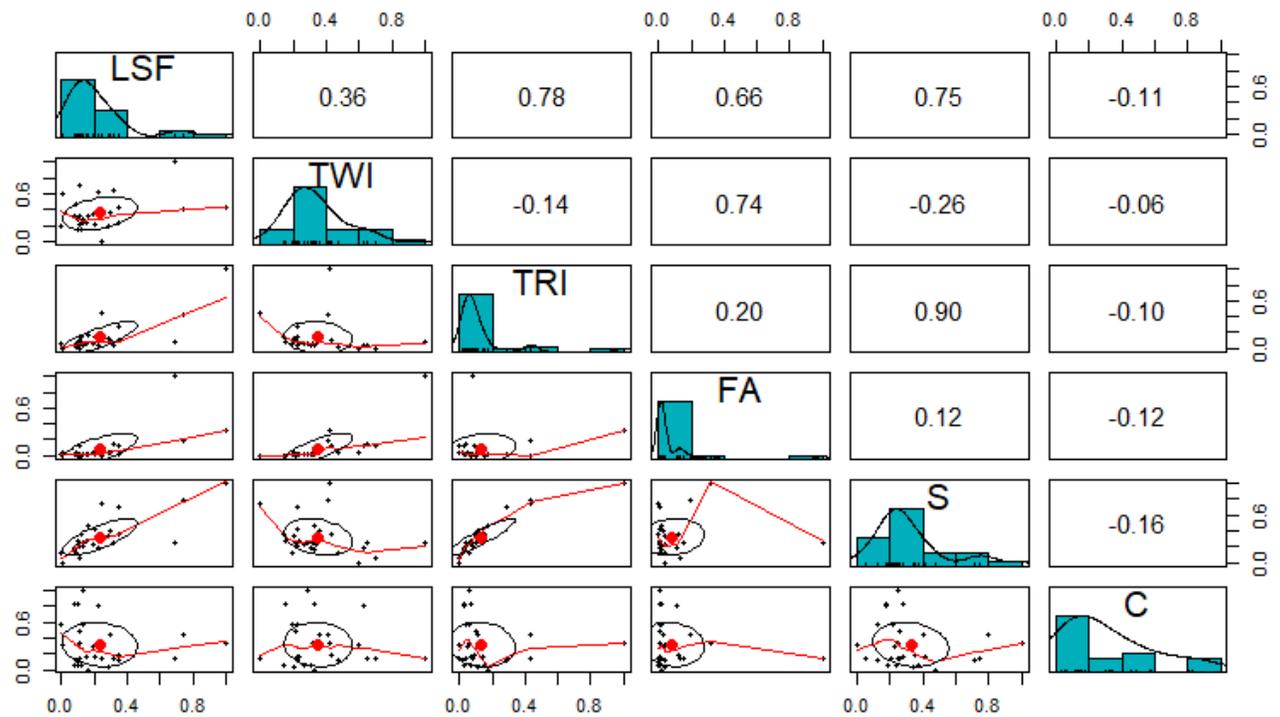
Tabla C1

Datos utilizados para calcular el Modelo Lineal Generalizado (GLM). Todos los valores se encuentran normalizados de 0-1.

Punto de muestreo	LSF	TWI	TRI	FA	S	C (mg/L)
1	0,124	0,143	0,150	0,000	0,368	0,065
2	0,241	0,000	0,437	0,002	0,745	0,135
3	0,353	0,225	0,284	0,011	0,710	0,112
4	0,313	0,644	0,044	0,152	0,252	0,141
5	0,695	1,000	0,083	1,000	0,257	0,142
6	0,105	0,267	0,066	0,011	0,232	0,053
7	0,110	0,700	0,000	0,131	0,050	0,137
8	0,095	0,149	0,072	0,005	0,276	0,826
9	0,347	0,432	0,094	0,119	0,349	0,180
10	0,743	0,415	0,435	0,190	0,794	0,453
11	0,112	0,213	0,097	0,004	0,253	0,485
12	0,296	0,363	0,109	0,034	0,402	0,452
13	0,126	0,285	0,059	0,013	0,242	1,000
14	0,115	0,319	0,056	0,013	0,243	0,340
15	0,011	0,602	0,000	0,042	0,000	0,319
16	0,157	0,329	0,172	0,021	0,474	0,000
17	0,149	0,238	0,067	0,012	0,278	0,172
18	0,286	0,201	0,116	0,043	0,340	0,030
19	0,206	0,221	0,139	0,008	0,415	0,171
20	0,196	0,342	0,051	0,038	0,229	0,299
21	0,226	0,626	0,032	0,114	0,177	0,811
22	0,078	0,310	0,031	0,013	0,186	0,056
23	0,113	0,220	0,083	0,017	0,203	0,152
24	0,128	0,225	0,043	0,023	0,213	0,574
25	1,000	0,424	1,000	0,319	1,000	0,331
26	0,083	0,325	0,034	0,020	0,171	0,828
27	0,091	0,471	0,021	0,035	0,120	0,126
28	0,000	0,189	0,056	0,006	0,123	0,577

Figura C1

Correlación de Pearson entre la concentración de ion nitrato (C) y las variables geomorfológicas independientes.



Código Modelo Lineal Generalizado (GLM)

```
install.packages("psych")
library(psych)
install.packages("gpairs")
pairs.panels(Data[,-7], method = "pearson", hist.col = "00AFBB", density = TRUE, ellip-
ses = TRUE )

install.packages("MuMIn")
library(MuMIn)
```

```
mnull<-glm(C~1, data=Data, family=gaussian)
m1<-glm(C~LSF+TWI+TRI+FA+S, data=Data, family=gaussian)
m2<-glm(C~ LSF+TRI+FA+S, data=Data, family=gaussian)
m3<-glm(C~ LSF+TWI+FA+S, data=Data, family=gaussian)
m4<-glm(C~ LSF+TWI+TRI+S, data=Data, family=gaussian)
m5<-glm(C~ LSF+TWI+TRI+FA, data=Data, family=gaussian)
```

```
AICc(m1,m2,m3,m4,m5)
```

```
m6<-glm(C~ TWI+FA+S, data=Data, family=gaussian)
m7<-glm(C~ LSF+FA+S, data=Data, family=gaussian)
m8<-glm(C~ LSF+TWI+S, data=Data, family=gaussian)
m9<-glm(C~ LSF+TWI+FA, data=Data, family=gaussian)
```

```
AICc(m6,m7,m8,m9)
```

```
m10<-glm(C~ TWI+S, data=Data, family=gaussian)
m11<-glm(C~ LSF+S, data=Data, family=gaussian)
m12<-glm(C~ LSF+TWI, data=Data, family=gaussian)
```

```
AICc(m10,m11,m12)
```

Apéndice D

Apéndice D: Capas de variables geomorfométricas

Figura D1

Modelo de Elevación Digital (DEM) de la zona de estudio.



Figura D2

Ráster normalizado de 0-1000 de la pendiente de la zona de estudio.

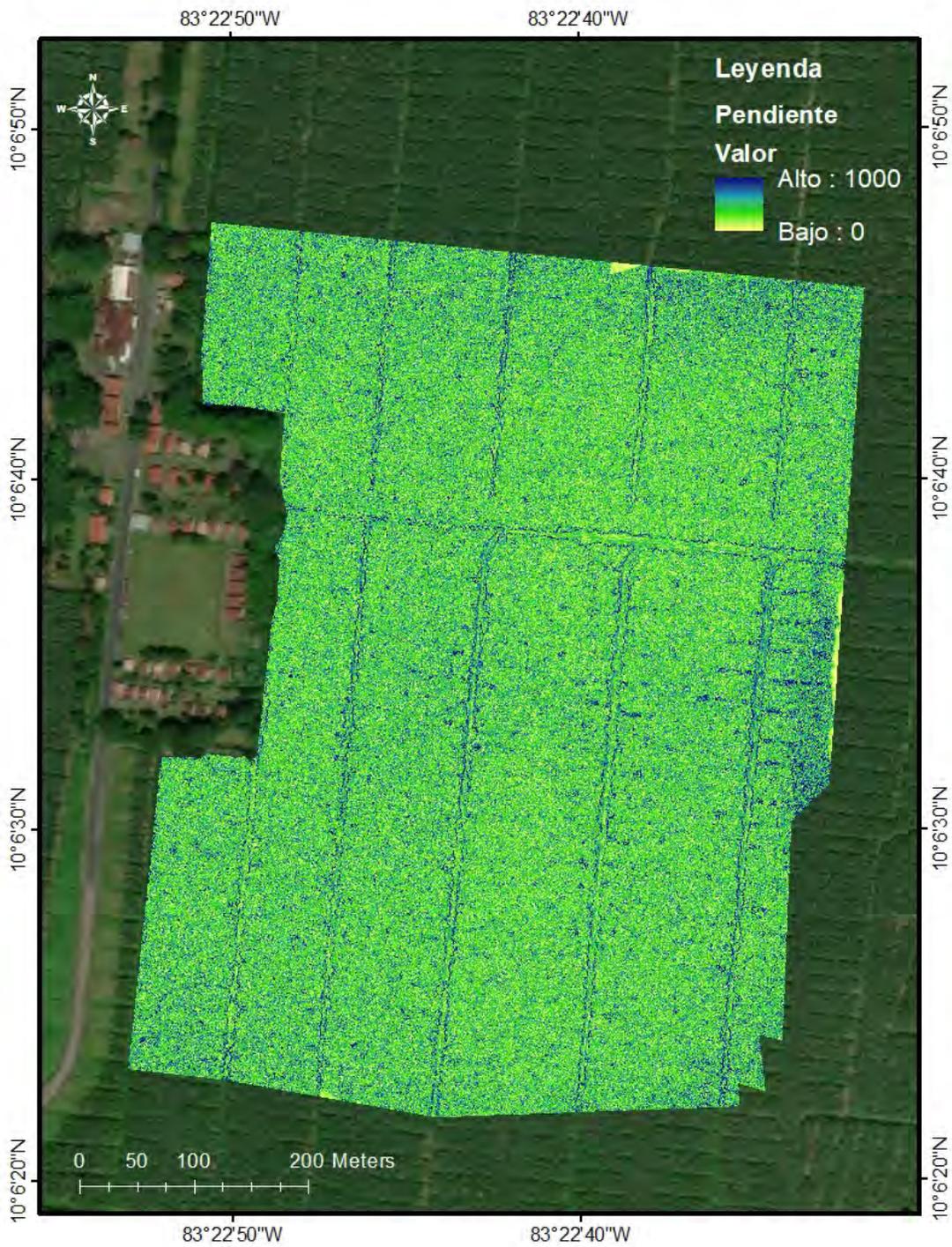


Figura D3

Ráster normalizado de 0-1000 del factor de longitud de la pendiente (LS factor) de la zona de estudio.

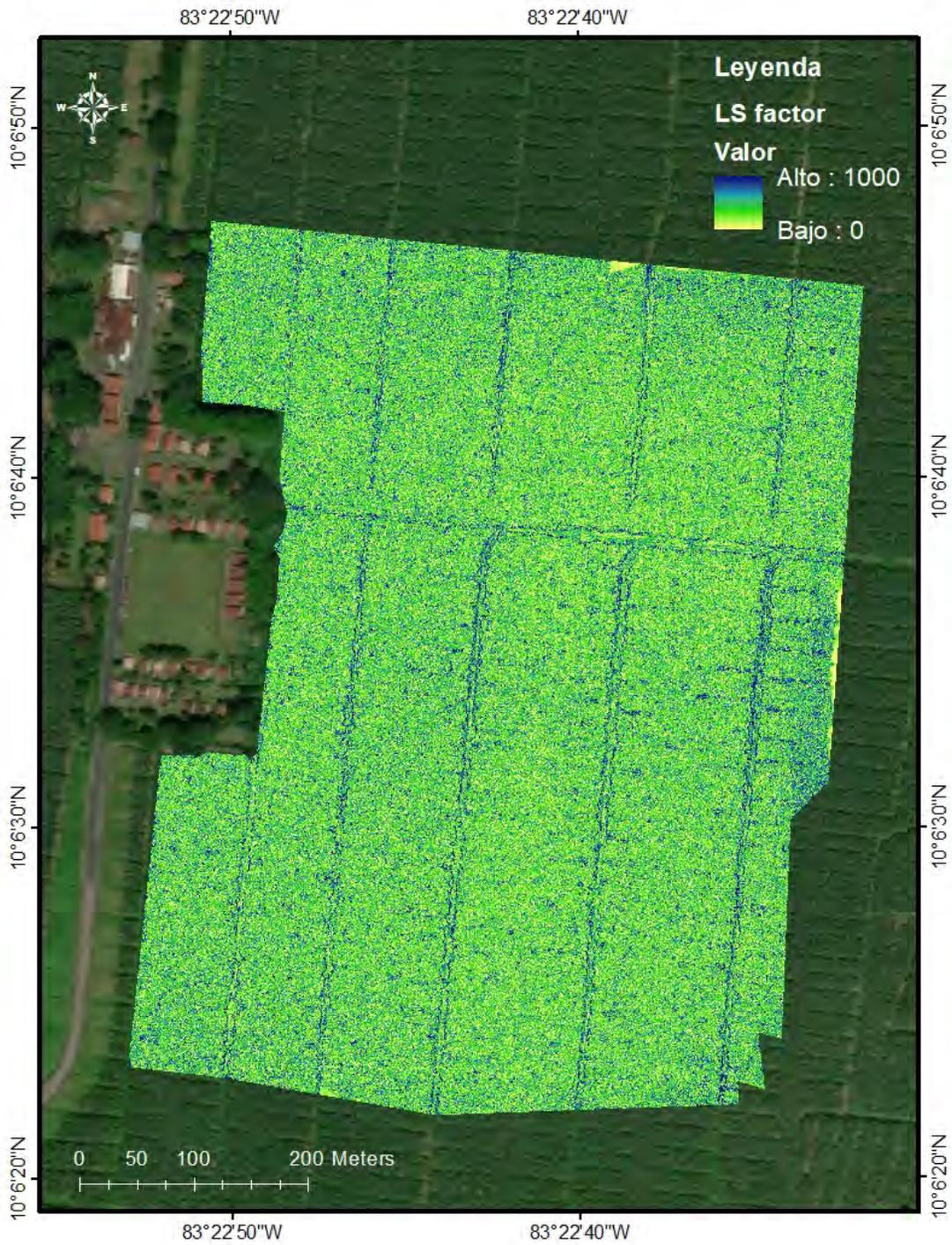


Figura D4

Ráster normalizado de 0-1000 del índice de rugosidad del terreno (TRI) de la zona de estudio.

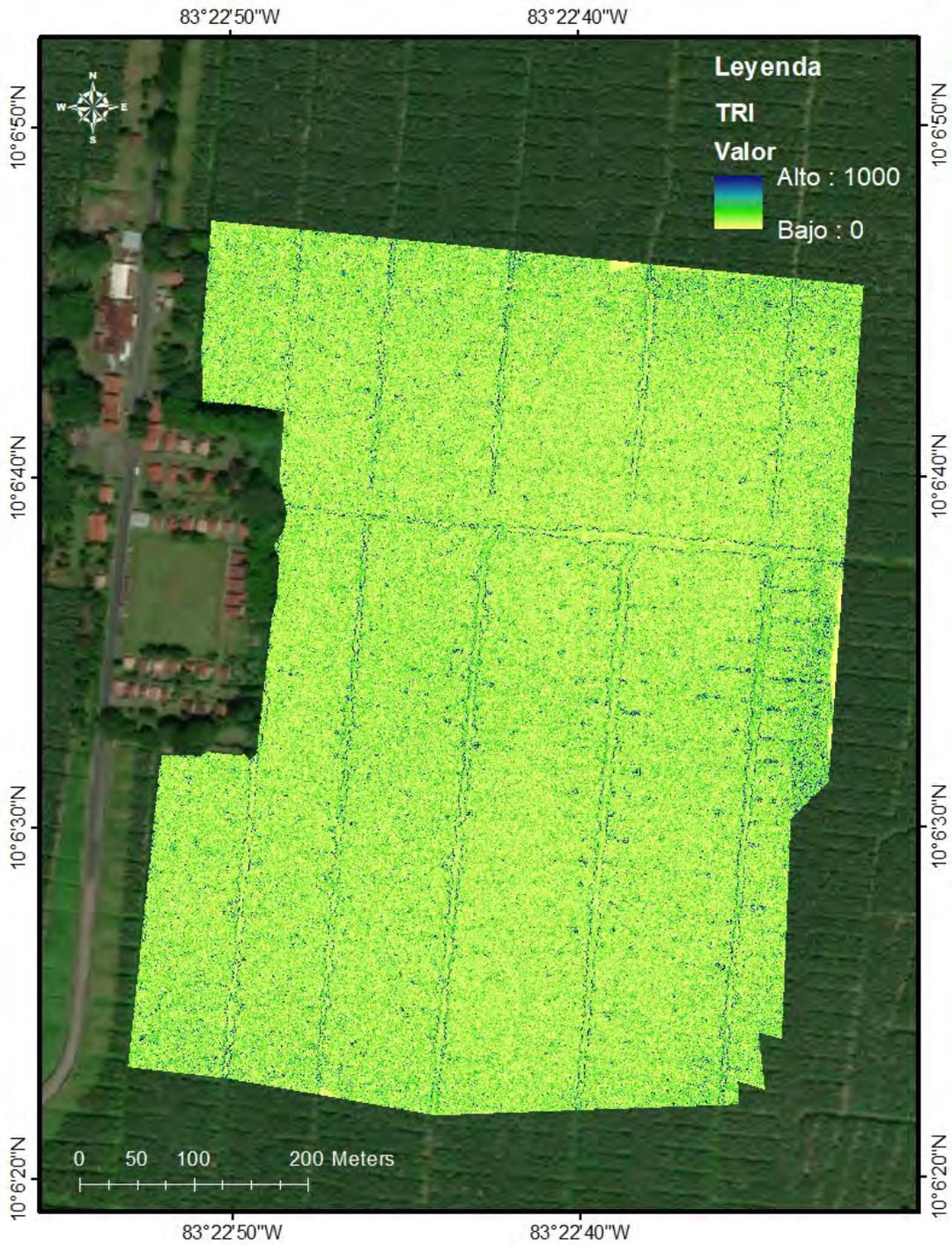


Figura D5

Ráster normalizado de 0-1000 del índice topográfico de humedad (TWI) de la zona de estudio.



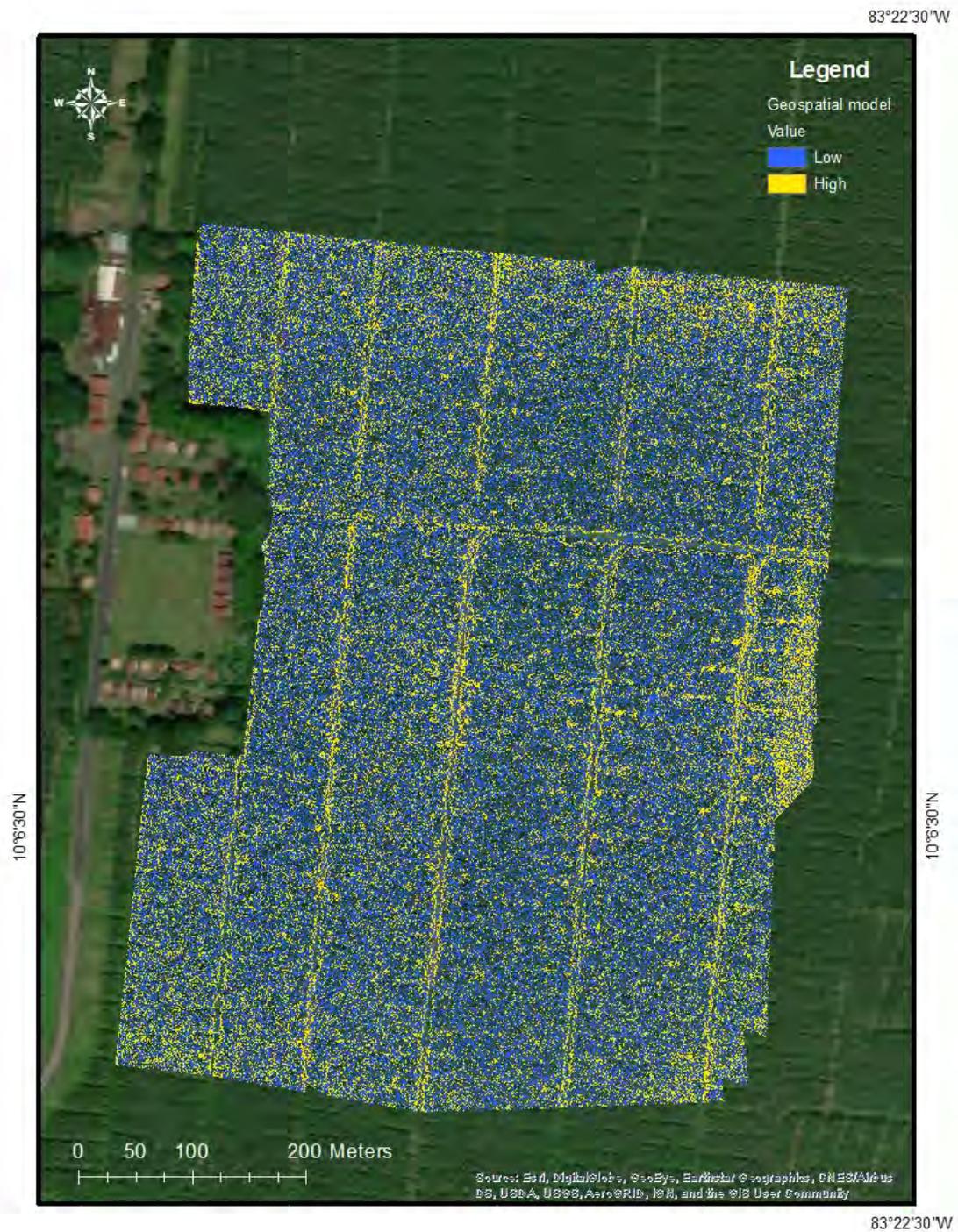
Figura D6

Ráster normalizado de 0-1000 de acumulación de flujo (FA) de la zona de estudio.



Figura D7

Ráster del modelo geoespacial, producto de la superposición de capas de variables geomorfológicas.



Apéndice E

Resumen de resultados muestreo de agua superficial y suelo

Tabla E1

Resumen de resultados sin procesar de concentración de ion nitrato en agua superficial.

Tratamiento	Punto de muestreo	Ion Nitrato (mg/L)				
		1	2	3	4	5
Alta probabilidad	004	2,34	1,56	1,81	13,90	4,79
Alta probabilidad	009	3,24	1,38	5,44	7,55	10,80
Alta probabilidad	010	7,87	3,94	-	23,90	7,62
Alta probabilidad	024	8,07	2,29	30,4	15,30	11,90
Alta probabilidad	025	6,13	2,13	14,8	17,40	2,83
Baja probabilidad	006	2,7	2	3,82	4,10	2,78
Baja probabilidad	007	4,7	8,74	1,71	2,21	6,48
Baja probabilidad	012	8,7	5,51	16	18,90	6,42
Baja probabilidad	021	4,74	2,83	12,4	19,80	53,50
Baja probabilidad	026	8,68	11,8	7,28	37,00	29,30
Sin cobertura	013	7,63	7,34	33,1	23,60	40,10
Sin cobertura	014	11,2	2,96	20,3	5,45	4,18
Sin cobertura	015	4,75	4,36	3,88	5,40	24,40
Con cobertura	016	3,33	2,9	1,8	1,24	0,72
Con cobertura	017	7,63	1,72	12,9	3,79	1,16
Con cobertura	018	3,55	1,62	5,76	1,10	0,97
Convencional	001	7,05	-	2,47	2,40	0,83
Convencional	002	5,22	4,03	4,16	7,14	3,02
Convencional	003	3,24	5,18	5,02	5,41	2,52
Convencional	005	9,24	1,66	5,25	5,26	-
Convencional	008	16,7	8,72	6,67	7,94	54,30
Convencional	011	6,68	3,97	15,4	6,16	27,30
Convencional	019	5,81	1,37	2,9	10,40	6,89
Convencional	020	8,17	5	2,8	6,10	18,40
Convencional	022	3,64	2,09	2,55	5,43	1,92
Convencional	023	6,92	4,74	4,11	-	6,74
Convencional	027	4,76	4,36	3,48	5,52	4,64
Convencional	028	4,21	24,7	3,69	21,00	12,00

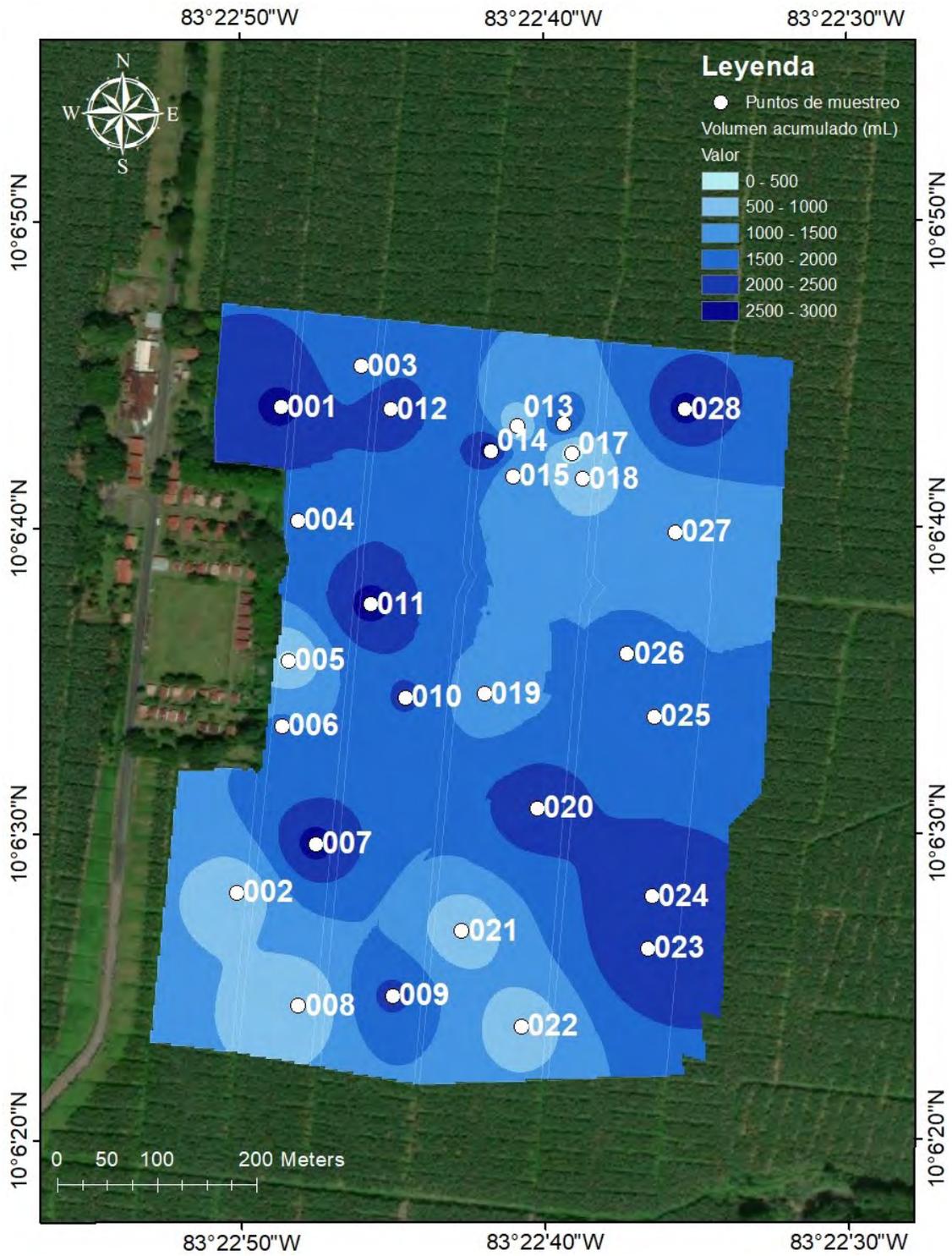
Tabla E2

Resumen de resultados sin procesar de concentración de ión nitrato en suelo.

Tratamiento	Punto de muestreo	Concentración ión nitrato (mg/kg)				
		1	2	3	4	5
Sin cobertura	013	71,94	111,00	104,00	46,00	76,00
Sin cobertura	014	92,34	73,10	73,00	33,00	53,00
Sin cobertura	015	77,85	77,20	39,00	22,00	27,00
Con cobertura	016	116,38	59,00	51,00	42,00	116,00
Con cobertura	017	85,60	66,90	46,00	19,00	29,00
Con cobertura	018	139,00	88,20	78,00	41,00	77,00

Figura E1

Volumen promedio de las trampas de escorrentía superficial en los muestreos realizados.



MONITOREO AMBIENTAL DE NITRATO EN AGUAS SUPERFICIALES Y SUELOS DE FINCA BANANERA

María Angélica Zamora-Espinoza, Veda Obando-Bustos, Adolfo Quesada-Román, Juan Chin-Pampillo

I. Introducción

El nitrógeno (N) es absorbido por las plantas como ion nitrato (NO_3^-), el cual, por su movilidad, se puede perder por procesos de lixiviación y escorrentía superficial [1]. Debido a factores antropogénicos, la acumulación de nitrato, tanto en el suelo como en el agua, tiene impactos en el cambio climático ya que se asocia con la emisión de gases de efecto invernadero; además, puede causar eutrofización y proliferación de algas tóxicas en aguas receptoras [2].

Es necesario mantener identificadas y monitoreadas las zonas con mayor riesgo de acumulación de nitrato. Avances en la tecnología actual como la agricultura de precisión y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten gestionar el territorio y la agricultura con la finalidad de disminuir los impactos negativos que puedan tener los minerales y los compuestos químicos en el ambiente [3]. Esta metodología de monitoreo ambiental permitió cuantificar la concentración de nitrato tanto en el suelo como en el agua superficial de una finca cultivada con banano.

II. Materiales y métodos

Para establecer la metodología se realizó un estudio en una parcela de 40 hectáreas, parte de una finca bananera con cultivar Grande Naine (Musa AAA, Subgrupo Cavendish) ubicada en Siquirres, Limón, Costa Rica (Fig.1). Durante el periodo de la investigación (agosto 2021- agosto 2022), se registró una precipitación media mensual de 186 mm. La temperatura media del aire fue de 25,7°C y la humedad relativa fue de 86%.

Se realizó un modelo geoespacial en el programa ArcGIS versión 10.6 superponiendo capas de datos geomorfológicos e índices calculados a partir de imágenes tomadas previamente (19 de junio del 2018) por un vehículo aéreo no tripulado (VANT). Las capas geomorfométricas desarrolladas tuvieron una resolución de 9 cm: pendiente (S), factor de longitud de la pendiente (LS factor), índice de rugosidad del terreno (TRI), índice topográfico de humedad (TWI) y acumulación del flujo (FA).

Posteriormente, se estableció un programa de muestreo químico para validar la información. Se tomaron muestras de agua superficial y de suelo, según los resultados del modelo geoespacial, así como el criterio de comparar zonas de la plantación que presentan cobertura vegetal y zonas sin cobertura vegetal. El monitoreo se realizó en las 96 horas posteriores a cinco eventos de precipitación mayores a 50 mm. Para el muestreo de agua superficial, se tomaron 100 mL de muestra de trampas de escorrentía. Las trampas consistieron en envases de plástico de 3785 mL, los cuales se enterraron aproximadamente 14,5 cm y con las aperturas en los costados se permitió el ingreso del agua superficial o bien, el desbordamiento del excedente (Fig.2).

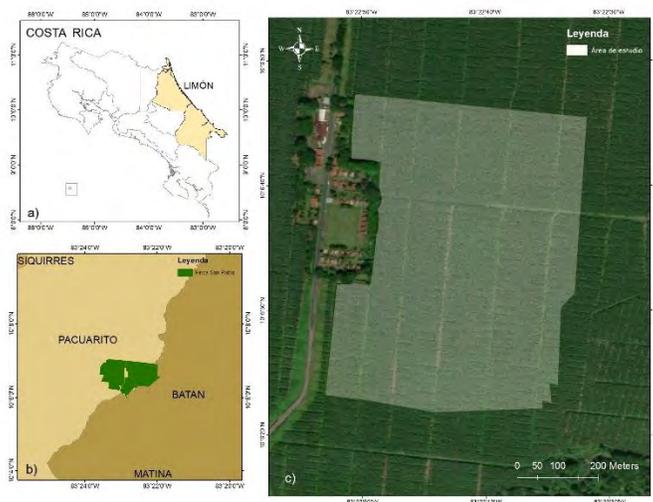


Fig. 1. Sitio de estudio de la investigación ubicado en Pacuarito, Siquirres, Limón, Costa Rica.



a) Representación gráfica de la trampa

b) Colocación de la trampa en la zona de estudio

Fig. 2. Diseño de trampas para recolectar escorrentía superficial.

En el muestreo de suelo, las muestras se recolectaron de 0 a 30 cm de profundidad con un barreno tubular tipo Lord Soil de 1 pulgada de diámetro interno y se colocaron en bolsas plásticas. La muestra de suelo se tomó a 30 cm de la trampa de escorrentía superficial. Posteriormente, las muestras obtenidas se trasladaron al Centro de Investigación de CORBANA. Para cuantificar la concentración de nitrato, se utilizó un electrodo de ion selectivo (EIS) Oakton, Cole-Parmerr. Posteriormente, se realizó un análisis estadístico, así como un Modelo Lineal Generalizado (GLM).

III. Resultados y discusión

El modelo geoespacial indicó que en las zonas de la plantación (centro de los domos) hay una menor probabilidad de concentrar humedad y, por lo tanto, nitrato. Por el contrario, en los drenajes puede que la concentración aumente debido a la acumulación de agua (Fig.3). Sin embargo, los resultados obtenidos en el muestreo indican que no hay diferencia estadísticamente significativa ($p > 0,05$) entre la concentración de ion nitrato en ambos sitios de análisis, por lo tanto, para replicar

la metodología se puede tomar la muestra tanto en el centro de los domos como al inicio de los canales.

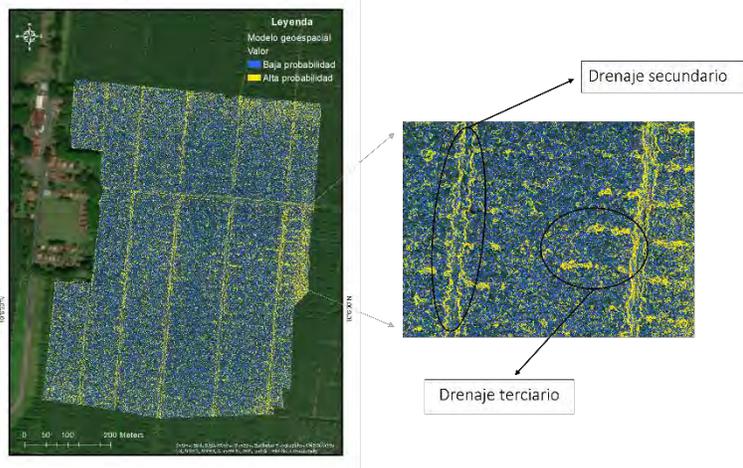


Fig. 3. Modelo geoespacial obtenido a partir de las variables geomorfométricas en estudio. En amarillo las zonas con mayor probabilidad de concentrar humedad y en azul las zonas con menor probabilidad.

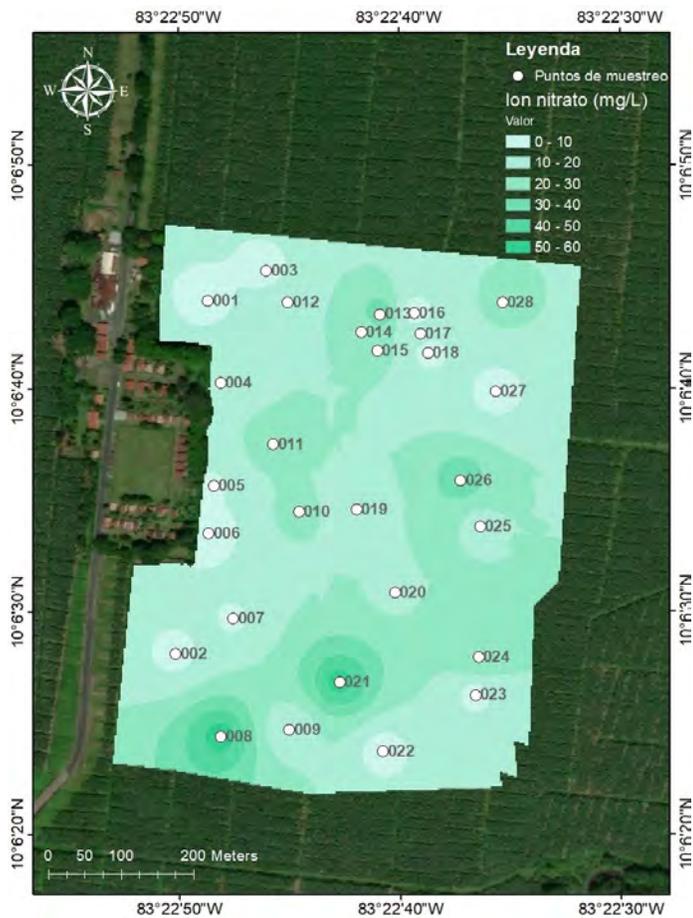


Fig. 4. Concentración máxima de ion nitrato en agua superficial en los diferentes puntos de muestreo.

Por otra parte, se obtuvo que sí hay diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$), en la concentración de ion nitrato en áreas de la plantación con cobertura vegetal (promedio $3,35 \pm 0,85$ mg/L) con respecto a zonas con suelo descubierto (promedio $13,25 \pm 3,10$ mg/L). La concentración es

casi tres veces mayor en suelo sin cobertura entre plantas causado por fenómenos de erosión [4].

Al contrario, en la comparación de concentración de ion nitrato en suelo se obtuvo que la concentración en tratamiento con cobertura (promedio $70,26 \pm 8,91$ mg/kg) es mayor con respecto a sin cobertura (promedio $65,10 \pm 0,01$ mg/kg) debido a que la cobertura en el suelo contribuye a mejorar la infiltración del agua y la retención de humedad en el suelo [5], sin embargo, la diferencia no es estadísticamente significativa ($p > 0,05$).

Asimismo, al realizar un monitoreo convencional, es decir, con un muestreo aleatorio, se obtuvo que no hay diferencia estadísticamente significativa ($p > 0,05$) entre los puntos de muestreo, por lo tanto, para replicar este procedimiento, se puede utilizar la misma cantidad propuesta o bien menos. Por último, el GLM indicó que las variables de pendiente (S) e índice topográfico de humedad (TWI) son las que más aportan a la concentración de ion nitrato en agua superficial.

Se obtuvo que el 7% de las concentraciones máximas de ion nitrato en agua superficial (Fig.4) se clasificaban dentro de la clase 1 (< 5 mg/L) del decreto de “Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales” N° 33903-MINAE-S [6]. El 36% clase 2 (5 mg/L a 10 mg/L), 14% clase 3 (10 mg/L a 15 mg/L), 11% clase 4 (15 mg/L a 20 mg/L) y 32% clase 5 (> 20 mg/L).

IV. Conclusiones

Se pueden tomar las muestras de agua superficial tanto en los puntos de muestreo ubicados a la entrada de los canales terciarios como en el área de plantación (centro de los domos). La concentración de ion nitrato en agua superficial de las áreas con suelo descubierto entre plantas, triplicó la concentración obtenida en las zonas con cobertura vegetal. Por último, según el GLM realizado, se puede replicar la metodología propuesta realizando el modelo geoespacial con la variable de pendiente (S) e índice topográfico de humedad (TWI), ya que evidenciaron relación con la concentración de ion nitrato obtenida en el muestreo.

V. Referencias bibliográficas

- [1] A. López, J. Espinosa, “Manual de Nutrición y fertilización del banano”, International Plant Nutrition Institute.
- [2] H. R. Nodeh, H. Sereshti, E. Z. Afsharian, N. Nouri, “Enhanced removal of phosphate and nitrate ions from aqueous media using nanosized lanthanum hydrous doped on magnetic graphene nanocomposite”, Journal of Environmental Management, vol. 197, pp. 265–274, 2017.
- [3] T. Brase, “Basics of a geographic information system”, Precision Agriculture Basics, pp. 37–62, 2018, doi:10.2134/precisionagbasics.2016.0119.
- [4] J. Murillo, V. H. Méndez-Estrada, S. Brenes Prendas, “Efecto de Geophila macropoda (Rubiaceae) como arvense de cobertura en la erosión hídrica en bananales de Guápiles, Limón, Costa Rica”, Cuadernos de Investigación UNED, vol. 8, no. 2, pp. 217–223, 2016.
- [5] F. Muñoz, “Costo control de malezas en finca Teresa 05”, Pococí, Costa Rica Administrador de Compañía Bananera La Teresa SA finca, vol. 5, 2012.
- [6] Ministerio de Ambiente y Energía [MINAE], Decreto N 33903 MINAE S Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales., 2007.