



**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL  
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**Modelación de la erosión y sedimentación en la presa de Pinalito, municipio Constanza,  
provincia La Vega, República Dominicana**

**Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de Posgrado  
como requisito para optar al grado de**

***MAGISTER SCIENTIAE***

**en MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

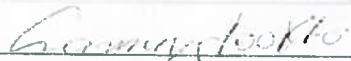
**Samuel Aybar Batista**

**Turrialba, Costa Rica  
2021**

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL  
DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

**FIRMANTES:**



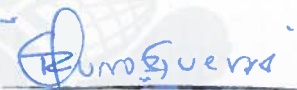
José Ney Ríos Ramírez, M.Sc.  
**Director de tesis**



Christian Birkel, Ph.D.  
**Miembro Comité Consejero**



Dorian Carvajal Vanegas, M.Sc.  
**Miembro Comité Consejero**



Roberto Quiroz Guerra, Ph.D.  
**Decano, Escuela de Posgrado**



Samuel Aybar Batista  
**Candidato**

## DEDICATORIA

A la persona más sacrificada en todo el proceso de realización de esta Maestría, mi amada esposa Rodys Esteffany Pérez (My Honey), “me quedo como estaba a tu lado y a tus pies, me quedo con los sueños que tuve y no logré”.

A la otra mujer que sacrificó su juventud para criarme y hacerme un hombre de bien, “la que con el peso de las cosas que aconseja, de su don universal de perdonar” mi adorada madre Antonia Batista.

A de quien “quiero donar su sonrisa a la luna así que, de noche, quien la mire, pueda pensar en ti” mi regalo más grande, mi primogénito Bayron Samir Aybar Pérez.

A la personita que “encontré en la luz que se me esconde tras el alma, el amor de mi vida, Marcos Engel Aybar Perez”.

A tí, aunque no te tengo en mis brazos todavía, “te pedí con mi fuerza al universo, te escribí en un par de versos que mandé volando al cielo, te pedí, soy aquel que desde siempre te esperaba, en mi corazón tu espacio yo guardaba” Edrys Aybar Pérez

## AGRADECIMIENTOS

A Dios Todopoderoso, el cual intercedió de la mejor manera para la obtención de la beca que me permitió poder llevar a cabo mis estudios de maestría.

A mi familia nuclear, Rodys, Samir, Engel, Edrys, y, con ellos, a Antonia y Amanda. Cada día doy gracias a Dios por tenerlos en mi vida.

Al CATIE y a todo su personal, que me brindó la oportunidad de estudiar por segunda vez, ahora en su programa de posgrado.

Al MESCYT, entidad financiera que patrocinó mi formación y la de tantos dominicanos necesitados de educación de calidad.

Al MARENA, por el otorgamiento del permiso correspondiente para la finalización del posgrado, con ello a Yendy Taveras, mi hermano de otra madre.

A mi director de tesis Ney Ríos, que con su paciencia y empeño me dio una lección de vida, la paciencia al realizar modelación hidrológica; siempre tendré presente las palabras “suave, suave, suave”.

A mi comité consejero Ney Ríos, Christian Birkel y Dorian Carvajal, por sus correcciones, aportes y exigencias, las cuales fueron determinantes para la elaboración del trabajo final de tesis.

A mis profesores y a la coordinadora de maestría Laura Benegas, por sus consejos sabios y enseñanzas dentro y fuera del campo de la ciencia.

A mis compañeros de maestría Madeline, Juan, Cecilia, Nelson “Querubín” y Venuz, por compartir experiencias culturales, académicas y personales.

A la promoción 2020-2021, pues no solo se aprende estudiando, sino compartiendo las vivencias de la vida cotidiana.

A mi familia que es esencial en el logro de las metas propuestas!!!

## CONTENIDO

DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTOS .....	IV
ÍNDICE DE CUADROS.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ACRÓNIMOS.....	X
Artículo: Modelación de la erosión y sedimentación en la presa de Pinalito, Municipio Constanza, provincia La Vega, República Dominicana .....	XI
1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Revisión de literatura .....	2
1.2 Cuenca hidrográfica .....	2
1.2.1 Manejo de cuencas hidrográficas .....	3
1.3 Erosión hídrica .....	4
1.3.1 Áreas susceptibles a erosión en República Dominicana .....	5
1.4 Sedimentación .....	5
1.5 Modelación hidrológica .....	5
1.5.1 Modelo hidrológico SWAT.....	6
1.5.1.1 Requerimientos de SWAT .....	6
1.5.1.1.1 Clima .....	6
1.5.1.1.2 Hidrología .....	6
1.5.1.1.2.1 Evapotranspiración.....	7
1.5.1.1.2.2 Evapotranspiración potencial .....	7
1.5.1.1.2.2.1 Método Penman-Moteith.....	7
1.5.1.1.2.2.2 Método Priestley-Taylor .....	8
1.5.1.1.2.2.3 Método Hargreaves .....	8
1.5.1.1.2.3 Evapotranspiración actual .....	8
1.5.1.1.2.4 Relación de los cálculos de ETP y los caudales .....	9
1.5.2 Cobertura de tierra.....	9
1.5.3 Erosión .....	10
1.5.4 Sedimentación.....	10
1.5.5 Incertidumbre del modelo hidrológico.....	11
1.5.5.1 Calibración del modelo hidrológico.....	11
1.5.6 Escenarios de clima futuro .....	12
1.5.6.1 Periodo de calentamiento y otras variables .....	13

1.5.7	Programas complementarios .....	13
2	METODOLOGÍA .....	14
2.1	Área de estudio.....	14
2.1.1	Ubicación .....	14
2.1.2	Características del área de estudio .....	14
2.1.2.1	Zona de vida.....	15
2.1.2.2	Cobertura.....	16
2.1.2.3	Suelo.....	17
2.1.2.3.1	Asociación Baiguate, Hondo, Auyamas, Jimenoa .....	17
2.1.2.3.2	Asociación Terreno Escabroso no Calizo y Calizo .....	17
2.1.2.3.3	Asociación Constanza .....	18
2.1.3	Procedimiento metodológico .....	19
2.1.4	Estimación de la erosión y sedimentación en la cuenca del río Tireo .....	19
2.1.4.1	Delimitación de la cuenca .....	19
2.1.4.2	Definición de HRU's.....	20
2.1.4.3	Corrida del modelo.....	20
2.1.5	Datos utilizados en la corrida del modelo .....	20
2.1.5.1	Cobertura.....	20
2.1.5.2	Suelo.....	20
2.1.5.3	Clima.....	22
2.1.6	Áreas críticas de la cuenca .....	24
2.1.7	Calibración de SWAT .....	24
2.1.7.1	Periodo de calentamiento y otras variables .....	26
3	RESULTADOS Y DISCUSION.....	27
3.1	Calibración .....	27
3.2	Erosión .....	31
3.3	Sedimentación.....	33
	Fuente Jiménez <i>et al.</i> (2005).....	35
3.4	Comportamiento de los fenómenos de erosión y sedimentación .....	35
3.5	Escenarios de cambio climático con el aumento y disminución del 20% de la precipitación promedio anual y el aumento de 1,5°C .....	36
3.6	Acciones propuestas.....	37
3.6.1	Restauración asistida.....	37
3.6.2	Recuperación franja de protección.....	37

3.6.3	Educación y comunicación .....	38
3.6.4	Promover acuerdos comunitarios .....	38
3.6.5	Prácticas eficientes de conservación del suelo .....	38
3.6.5.1	Sedimentación .....	39
3.6.5.2	Reforestación.....	39
3.6.5.3	Agricultura .....	39
3.6.5.4	Construcción de presa de retención de sedimentos .....	39
3.6.6	Prácticas de conservación .....	40
4	CONCLUSIONES .....	41
5	RECOMENDACIONES .....	41
6	BIBLIOGRAFÍA .....	42

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Escala de valoración de áreas críticas en cuencas hidrográficas .....	5
Cuadro 2. Tipo y porcentaje de cobertura de la cuenca del río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana .....	16
Cuadro 3. Suelos y áreas cubiertas presentes en la cuenca del río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana .....	18
Cuadro 4. Leyenda del ráster del modelo hidrológico SWAT .....	20
Cuadro 5. Leyenda de los suelos en formato ráster del modelo hidrológico SWAT .....	21
Cuadro 6. Datos para la creación de la tabla usersoil.....	21
Cuadro 7. Archivos para la macro WGN .....	22
Cuadro 8. Resultado de la macro WGN.....	23
Cuadro 9. Insumos y descripción de datos y fuentes de obtención .....	24
Cuadro 10. Estadísticos de la calibración del modelo hidrológico SWAT .....	25
Cuadro 11. Parámetros iniciales y rangos para la calibración del modelo hidrológico SWAT-CUP, cuenca del río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana .....	25
Cuadro 12. Estadísticos antes y después de la calibración del modelo hidrológico SWAT .....	28
Cuadro 13. Parámetros calibrados del modelo hidrológico en SWAT-CUP .....	28
Cuadro 14. Estadísticos hidrológicos calibrados.....	29
Cuadro 15. Comparación de estadísticos de los modelos hidrológicos de Rodríguez (2019) y los de este estudio .....	30
Cuadro 16. Porcentaje de suelo que se erosiona en la cuenca del río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana .....	31
Cuadro 17. Erosión por cobertura estimada en la cuenca del río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana .....	32
Cuadro 18. Caudales de sedimentación por subcuencas, río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana .....	34
Cuadro 19. Porcentaje y aporte de sedimentación en la cuenca del río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana .....	34
Cuadro 20. Caudales y sedimentos en embalses de República Dominicana.....	35
Cuadro 21. Escenarios de cambio climático considerados .....	36
Cuadro 22. Resumen de las alternativas de gestión de sedimentos utilizadas en RESCON 2 .....	40



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana .....	14
Figura 2. Red hídrica de la cuenca del río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana .....	15
Figura 3. Embalse y casa de máquina de la Hidroeléctrica Pinalto, Constanza, La Vega, República Dominicana .....	15
Figura 4. Zonas de vida de la cuenca río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana .....	16
Figura 5. Cobertura vegetal de la cuenca río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana .....	17
Figura 6. Suelos de la cuenca del río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana .....	18
Figura 7. Información requerida por el modelo SWAT .....	19
Figura 8. Resumen metodológico de la modelación de la erosión y sedimentación en la presa de Pinalito, Constanza, La Vega, República Dominicana .....	26
Figura 9. Componentes del balance hidrológico en la cuenca del río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana .....	27
Figura 10. Diagrama de dispersión de los parámetros calibrados .....	29
Figura 11. Caudal observado, simulado y banda de predicción del modelo hidrológico .....	30
Figura 12. Mapa de erosión por subcuencas en la cuenca del río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana .....	31
Figura 13. Mapa de erosión por HRU's de la cuenca río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana .....	32
Figura 14. Caudales de sedimentación del río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana .....	33
Figura 15. Aporte de sedimentos del río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana .....	34
Figura 16. Comparación de los flujos de caudal-sedimentos de la cuenca del río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana .....	35
Figura 17. Buffer de 30 m .....	38

## ACRÓNIMOS

ARS	Servicio de Investigación Agrícola, República Dominicana
ASDS	Asociación de Subgrupos Dominantes de Suelos, República Dominicana
BH-MB	bosque húmedo montano bajo
BMH-MB	Bosque muy húmedo montano bajo
ET	Evapotranspiración
ETP	Evapotranspiración potencial
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GEI	Gases de efecto invernadero
HRU's	Unidades de respuesta hidrológica
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
MARENA	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, República Dominicana
Msnm	Metros sobre el nivel del mar
MUSLE	Ecuación universal de pérdida de suelo modificada
PCP mm	Precipitación anual en milímetros
RCP	Trayectorias de concentración representativas
SPE	Swat Parameter Estimator
SUFI-2	Sequential Uncertainty Fitting version 2
SWAT	Soil and Water Assessment Tools
SWAT-CUP	Calibration and Uncertainty Procedures
TMP	Temperatura en grados Celsius
URP	Unidades de recursos de planificación
USDA	United State Department of Agriculture
USLE	Ecuación universal de pérdida de suelo

Artículo: Modelación de la erosión y sedimentación en la presa de Pinalito, Municipio Constanza, provincia La Vega, República Dominicana

Samuel Aybar Batista

José Ney Ríos

Christian Birkel

Dorian Carvajal Vanegas

[Samuel.aybar@catie.ac.cr](mailto:Samuel.aybar@catie.ac.cr)

[ney.rios@catie.ac.cr](mailto:ney.rios@catie.ac.cr)

[christian.birkel@ucr.ac.cr](mailto:christian.birkel@ucr.ac.cr)

[dcarvajal@itcr.ac.cr](mailto:dcarvajal@itcr.ac.cr)

## Resumen

La cuenca del río Tireo, ubicada en el municipio Constanza, provincia La Vega, República Dominicana, tiene un área de 60,3 km<sup>2</sup>. Su río principal es de una longitud de 15 km, presenta un gradiente altitudinal entre 1180 a 1840 msnm y desemboca en el embalse de la hidroeléctrica Pinalito. En los últimos años se vienen presentando procesos serios de degradación y erosión en la cuenca que han afectado la presa. La presente investigación evaluó los efectos de la erosión hídrica en la cuenca y la sedimentación en la presa con la aplicación de sistemas de información geográfica y *softwares* aplicados en la modelación hidrológica. Se explica la erosión hídrica, se determina la sedimentación en la presa y se analiza el comportamiento de la erosión. Con la utilización del programa QGIS 3.16, el modelo hidrológico QSWAT (versión 1.1.1) y el programa SWAT-CUP, se determinó que en la cuenca se erosionan 31,35ton/ha/año de suelo; 5,67 ton se mueven en un caudal promedio al año de 0,95m<sup>3</sup>/s/, resultando que a la presa llegan en promedio 34 033,79 ton anualmente. Dos escenarios de cambio climático indican que, de seguir aumentando la precipitación y la temperatura a nivel global, resultará un grave problema para la sostenibilidad de la cuenca.

Palabras claves: manejo de cuencas, sistema de información geográfica, zonas vulnerables, prácticas de conservación.

## Summary

The Tireo river basin located in the Constanza municipality, La Vega province, Dominican Republic, has an area of 60.3 km<sup>2</sup>. Its main river has a length of 15 km, and an altitudinal gradient between 1180 and 1840 meters above sea level. It flows into the Pinalito hydroelectric reservoir. In the Last years this river has presented serious processes of degradation and erosion. The present investigation evaluated the effects of water erosion in the basin and sedimentation in the Pinalito Dam. With the application of geographic information systems and software applied in hydrological modeling water erosion is explained, sedimentation in the Pinalito hydroelectric plan dam is determined, and the erosion behavior is analyzed. With the use of the QGIS 3.16 program, the hydrological QSWAT model (version 1.1.1) and the SWAT-CUP program, it was determined that 31.35ton / ha / soil year are eroded in the basin and 5.67 tons are moved at an average flow per year of 0.95m<sup>3</sup> / s /, reaching the dam, on average 34,033.79 ton per year. Two climate change scenarios showed that, if the precipitation and global temperature continue to rise, there will be a serious problem for the sustainability of the basin.

Keywords: watershed management, geographic information system, vulnerable areas, conservation practices.

## 1 INTRODUCCIÓN

En República Dominicana los desequilibrios ambientales provocados por la erosión y la sedimentación de acuíferos superficiales están muy asociados al mal uso de la tierra, sobre todo en las partes altas de las cuencas, debido a la poca injerencia de las autoridades competentes y, a veces, a la falta de recursos del personal que está destinado a su vigilancia y protección. La cuenca del río Tireo, ubicada en el municipio de Constanza, provincia La Vega, alimenta la represa hidroeléctrica Pinalito, presenta una grave afectación debido al establecimiento y expansión de la frontera agrícola que incluso se desarrolla dentro de la franja de protección de 30 metros a ambos lados de las márgenes del río. La hidroeléctrica de Pinalito provee 50 megavatios de energía al sistema eléctrico nacional, el cual es un soporte importante al desarrollo del país. A la fecha, no se han encontrado estudios que arrojen datos sobre la cantidad de erosión producida en esta cuenca; sin embargo, a nivel nacional existen datos como el de la FAO (2016) que indica que “un 19.7% del territorio nacional está afectado por la degradación y la sequía, mientras que el 70% está potencialmente amenazado por fenómenos de degradación ambiental como son la erosión y la desertificación” Rodríguez (2019) y Figuereo (2020) encontraron una erosión de 32,36 y 30,0 ton/ha/año, respectivamente, en la cuenca del río Yaque del Norte, que afectan de manera negativa la producción de agua y energía eléctrica que sale de la cuenca.

García (2016) realizó una investigación en la parte alta de la cuenca, que abarca los parajes de Los Bermúdez, Cruz de Cuaba, El Paragua, La Culata, Suriel, Josafá, hasta El Naranja y la Presa de Pinalito, así como la parte baja, incluyendo los valles intramontanos de Constanza y Tireo, donde nacen los principales ríos del país. Los resultados indicaron el daño irreversible y la perturbación que se está causando al sistema hídrico local, regional y nacional, por la gran demanda de agua para riego agrícola, lo que provoca una fuerte presión sobre el recurso hídrico (Ministerio de Medio Ambiente 2016).

Las tierras de esta cuenca están en su mayoría ocupadas por pequeños productores de cultivos de ciclo corto como la papa, cebolla, ajo, repollo, lechuga, entre otros, los cuales, debido a la intensidad de las labores agrícolas, han ocasionado graves daños a la ecología de la zona. Es por esto que, este proceso investigativo se utilizará para dar una respuesta a la problemática ambiental de la zona. Debido a lo anterior, debe incluir a toda la sociedad, según lo recomienda Sibilia (1988), quien considera el uso de la tierra como un sistema de la cuenca, donde hacen sinergias los actores que hacen vida en el río a estudiar, considerando aspectos biofísicos, sociales y económicos.

Las investigaciones en temas medioambientales se auxilian de los sistemas de información geográficas, ya que estas son herramientas tecnológicas que permiten la evaluación de todos los procesos ecológicos dentro de una cuenca (Cuello 2003).

La presente investigación busca evaluar los efectos de la erosión hídrica en la cuenca y la sedimentación en la presa de Pinalito, mediante la aplicación de sistemas de información geográfica y *software* aplicados en la modelación hidrológica, lo que permitirá explicar la erosión hídrica, determinar la sedimentación en la presa hidroeléctrica Pinalito y analizar el comportamiento de los fenómenos erosivos. Se espera que los resultados obtenidos contribuyan al desarrollo de la zona ya que, por la gran degradación a que está siendo sometida la cuenca, la herramienta de modelaje utilizada permitirá evaluar los efectos negativos de la erosión de los suelos y la acumulación de sedimento en el embalse. En República Dominicana se precipitan anualmente en promedio 1500 mm de agua de lluvia, que por lo general son lluvias cortas de alta intensidad (Bonilla 2000).

### 1.1 Revisión de literatura

### 1.2 Cuenca hidrográfica

La erosión como fenómeno natural a nivel mundial, es una de las principales problemáticas de degradación en suelos bajo uso agrícola (Bocel 2016). La pérdida de suelo por la erosión es la acumulación de sedimentos en un punto específico de la cuenca. La erosión con el tiempo provoca la reducción de la productividad y pone en riesgo los aspectos ambientales, sociales y económicos de las cuencas (Prada *et al.* 2008). Este fenómeno que, como se mencionó anteriormente es natural, provoca gran inestabilidad ecológica (Morales 2014).

Según Palacios y Escobar (2016), el sobreuso de las fuentes acuíferas para el riego agrícola es uno de los problemas graves que se deben resolver para alcanzar el desarrollo sostenible en las cuencas hidrográficas, ya que esto asegurará poder satisfacer la demanda de las generaciones venideras. De acuerdo a Moral y Hernandez (2016), en los últimos años ha resurgido la idea de que, las cuencas hidrográficas forman parte indiscutible en la gestión integrada y sostenible del agua. Para este tipo de gestión, se ha evidenciado que existe poca planificación por parte de los sectores que conforman una cuenca.

Como lo establece Rodríguez (1989), la degradación de los suelos puede estar influida por la alteración del ciclo del agua. Esta degradación puede ocurrir a través de diversos mecanismos erosivos, los cuales transportan y depositan los sedimentos en los cauces de ríos, embalses o represas. Situación que contribuye con la degradación de los suelos a través de diversos mecanismos erosivos y que termina con el transporte y depósitos de sedimentos en cauces de ríos, embalses o represas.

Ante este contexto, es necesario evaluar los procesos del ciclo hidrológico en las diferentes zonas de la cuenca con la finalidad de predecir con base en datos confiables, escenarios futuros del comportamiento de la erosión y, por consiguiente, la acumulación de sedimento; insumos necesarios para orientar el desarrollo de actividades encaminadas a un uso y explotación racional de recursos naturales de la cuenca. Bermúdez (1980), indica que el uso inadecuado de los

caudales de las cuencas hidrográficas provoca inestabilidades fuertes en los ecosistemas hídricos.

Según Ríos *et al.* (2013), la cuenca hidrográfica es una unidad geográfica natural, cuyos límites físicos son definidos por la divisoria superficial de las aguas (“parteaguas”). De acuerdo a Ordóñez (2011), en una cuenca interactúan varios sistemas que son de interés para todas las comunidades. Entre estos sistemas de interés podemos mencionar que, debe existir un ambiente sano y debe organizarse de tal manera que cumpla con los objetivos comunitarios. De esta premisa toma importancia relevante el estudio de las cuencas hidrográficas, ya que las acciones que se realicen en la cuenca deben estar organizadas, manejadas y planificadas Davie (2008) establece que la hidrología es la base del estudio en las cuencas hidrográficas.

Para Faustino y Jimenez (2000), las cuencas son espacios físicos de tierras que están delimitados por montañas, laderas y colinas donde se forman cursos de aguas naturales que van desde las partes altas hacia las bajas de manera superficial, y pueden infiltrarse en todo su recorrido hasta llegar a un punto definido que puede ser un río más grande, lago o mar.

Becerra (2018), sostiene que el depósito de sedimentos en los embalses de represas hidroeléctricas es una de las principales problemáticas que intervienen en el buen funcionamiento de estas obras de ingeniería civil; los sedimentos aparte de disminuir el espacio disponible de depósito de agua, obstruyen el paso del líquido hacia las turbinas generadoras de energía.

### 1.2.1 Manejo de cuencas hidrográficas

La caracterización de una cuenca hidrográfica representa el punto central de la organización de territorios rurales ya que se focaliza en los aspectos erosivos de los suelos, la deposición de los sedimentos resultantes de los arrastres ocasionados por las luvias u otras fuentes de escorrentías, y la disminución de los embalses de las presas que son destinadas a proyectos hidroeléctricos (Saborío 1996). El depósito final de los sedimentos producidos en la cuenca del río Tireo van a parar al embalse de la hidroeléctrica Pinalito, así que con esta investigación y el uso del *software* SWAT se busca modelar y lograr predecir lo que ocurrirá en un futuro no muy lejano, si no se implementan medidas mitigantes para subsanar los efectos negativos a los que está siendo sometida por el mal uso de las tierras agrícolas. La afectación por el fenómeno de erosión en la subcuenca hace urgente adoptar prácticas de manejo integral de cuencas hidrográficas.

La gran expansión demográfica mundial demanda el establecimiento de más tierras para la producción alimentaria (Faustino y Jiménez 2000). Gaspari *et al.* (2013), muestran un enfoque integral y de conocimiento sistémico del hombre y la naturaleza que permite establecer que un buen manejo de cuencas proporciona un marco de referencia para proyectar el desarrollo sustentable de las comunidades.

### 1.3 Erosión hídrica

Según Gitas *et al.* (2009), el proceso de erosión es propio de la naturaleza, producto del movimiento de las partículas de suelo arrastradas por el agua o el viento, que son llevadas a lugares tan distantes como lo permita el factor que las muevas, y depositadas en un lugar determinado siempre más bajo de donde se produce el efecto erosivo. Los humanos están contribuyendo al incremento progresivo de las tasas de erosión con prácticas agrícolas no amigable con el medio ambiente. Añó *et al.* (2009) señalan que, en España la erosión hídrica es tratada como un proceso degradativo del suelo y como proceso directamente ligado a la desertificación. La degradación de los suelos es un mal que afecta directamente las tierras agrícolas de las cuencas, no importa el lugar del mundo en donde se encuentre. En esta investigación se abarca la provocada por las aguas de lluvias y las aguas utilizadas por los diferentes sistemas de riego agrícola.

Itzel (2013), define la erosividad como la facilidad que poseen las partículas de suelo de ser arrastradas por las lluvias. De ahí que las lluvias toman gran importancia a la hora de evaluar la erosión como un fenómeno que ocurre de manera natural, aunque tiene mayor impacto en suelos desprovistos de vegetación Fortuny *et al.* (2010), establecen que los suelos son en esencia el eje central de la sostenibilidad ecológica en ambientes naturales o intervenidos por la mano del hombre pues sirven de anclaje a la vegetación y le proporcionan el agua y los nutrientes que necesitan, constituyendo así un reservorio temporal en el ciclo del agua; son de vital importancia al actuar de filtro para componentes nocivos para los ecosistemas. Por otra parte, la vegetación retiene al suelo entre sus raíces frenando su movilidad en superficies inclinadas y lo protege del impacto directo de las lluvias.

Según García-Fayós (2004), la forma de la tierra en las cuencas es determinante para el valor del ángulo de pendiente, el cual es característico para cada tipo de roca, regolito o suelo. La presión que ejerce la gravedad es tal que supera a la fuerza de cohesión, lo que provoca deslizamientos o simplemente que se produzcan derrumbes cuyos materiales caen pendiente abajo. Lo contrario sucede cuando las pendientes van disminuyendo de manera progresiva, pues ocurren menos derrumbes o deslizamientos de tierras. La situación erosiva en la cuenca del río Tireo está mayoritariamente dada por la producción agrícola en tierras de pendientes altas y la poca o casi nula implementación de prácticas de conservación de suelos.



### 1.3.1 Áreas susceptibles a erosión en República Dominicana

La NDT (2017), clasifica las áreas críticas con base a la clasificación de Bergsma *et al.* (1996), quienes establecen la escala de categorización de áreas críticas de erosión en las cuencas del país presentada en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Escala de valoración de áreas críticas en cuencas hidrográficas

Clase	Rango de erosión (ton/ha /año)
Muy baja	0-5
Baja	5 a 12
Moderada	12 a 25
Alta	25-60
Muy alta	60-150
Extremadamente alta	>150

### 1.4 Sedimentación

La sedimentación es el depósito de partículas de suelos en un punto dado en las cuencas hidrográficas. Entender los procesos de depósitos de sedimentos desde los ríos y quebradas hacia cuencas de mayor tamaño, o hacia un punto de aforo, es uno de los principales propósitos de las ciencias de la tierra. Por esto es importante estudiar los procesos que intervienen en la exportación de sedimentos, tales como el régimen del caudal, el clima y las actividades antrópicas (Arroyave-Rincón *et al.* 2012).

En el momento en que los cursos de agua entran en los embalses finales se produce una disminución brusca de su velocidad, deteniendo de esta manera su recorrido río abajo formando grandes depósitos de sedimentos y evitando que sigan su camino a partir de los grandes depósitos. En el vaso del embalse decanta todo el sedimento producto de los procesos erosivos en las cuencas formando en ocasiones "delta de presa" (Cobo 2008).

### 1.5 Modelación hidrológica

Para Jorquera *et al.* (2012), los modelos hidrológicos representan diferentes procesos responsables de la distribución de precipitaciones y formación de caudales en las cuencas hidrográficas. Desde comienzos del siglo XIX se utilizan para facilitar los trabajos de obras hidráulicas y a mediados del siglo pasado, con la llegada de la tecnología y los sistemas de información geográfica, se potenció su uso en aspectos tales como la predicción de escenarios respecto al ciclo hidrológico en las cuencas.

La modelación hidrológica es una herramienta vital en el estudio de desbordamientos en ríos y, a través de los años, ha dado respuesta satisfactoria a estos problemas, fundamentalmente en países desarrollados. Hoy en día, no es posible hacer modelación hidrológica sin la intervención de estos *softwares* que predicen comportamientos futuros de estos fenómenos y pueden prevenir

inundaciones (Estrada y Pacheco 2012). En este sentido, modelar se define como el pronóstico de lo que va a ocurrir en una cuenca, cuánto se erosiona y a dónde va el resultado de ese fenómeno, que es la sedimentación de un punto medio o bajo de la cuenca.

### 1.5.1 Modelo hidrológico SWAT

SWAT (Soil and Water Assessment Tool), es un modelo a escala de cuenca hidrográfica desarrollado por el Dr. Jeff Arnold para el Servicio de Investigación Agrícola (ARS) del USDA. SWAT fue concebido con el objetivo de pronosticar qué ocurre con la implementación de prácticas en la gestión de la tierra, rendimiento de agua, movimiento de sedimentos y productos químicos agrícolas en cuencas hidrográficas. Por lo tanto, SWAT es un modelo integrado que incluye componentes tales como el clima, la hidrología, suelo, nutrientes, pesticidas, manejo de la tierra, bacterias y agentes patógenos. El modelo es un simulador computacionalmente eficiente de hidrología y calidad del agua a varias escalas que se ha utilizado en muchas aplicaciones internacionales (Neitsch *et al.* 2011).

Fernández de Villarán (2017), precisa que SWAT destaca entre los modelos de simulación por su sencillez y aplicabilidad ya que hace integral la cuenca, permitiendo conocer los procesos hídricos en varios escenarios actuales y futuros, dando opciones de cómo manejar la cuenca de manera efectiva. Cely (2014), asevera que en las cuencas grandes y complejas el *software* es capaz de simular escenarios predictores de impactos causados por diferentes intervenciones antropogénicas.

#### 1.5.1.1 Requerimientos de SWAT

##### 1.5.1.1.1 Clima

Los datos climáticos requeridos por SWAT corresponden a la precipitación, temperatura máxima y mínima, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Estos datos de históricos diarios pueden ser observados o simulados de estaciones climáticas digitales (Neitsch *et al.* 2005).

##### 1.5.1.1.2 Hidrología

Las diferentes formas, lluvia, nieve o granizo, en la que el agua llega a la superficie terrestre son conocidas como precipitación. Cuando ocurre la precipitación, una parte se infiltra al subsuelo y otra corre superficialmente en forma de escorrentía; cada una de estas formas puede evapotranspirarse cuando las condiciones así lo permitan. En SWAT los movimientos de agua son simulados por las unidades de respuesta hidrológica o HRUs (Neitsch 2011).

#### 1.5.1.1.2.1 Evapotranspiración

La evapotranspiración es el paso de agua líquida a estado gaseoso y su difusión a la atmósfera. Para que ocurra este fenómeno debe existir una gran cantidad de energía que permita el cambio de estado del agua (Davie 2008).

#### 1.5.1.1.2.2 Evapotranspiración potencial

Es la cantidad de agua que podría evaporarse sin límite de disponibilidad del recurso, desde la cobertura vegetal, suelo, superficie terrestre y vegetación en condiciones óptimas de suministro (Villón 2005, Neitsch *et al.* 2005, Mapama 2005). Penman (1956), de fine la ETP como "la cantidad de agua transpirada por una cosecha verde corta, sombreando completamente el suelo, de altura uniforme y nunca sin agua".

De acuerdo a Ortiz y Chile (2020), se han desarrollado diferentes metodologías para calcular la evapotranspiración. El *software* SWAT emplea tres métodos que, dependiendo de los datos climáticos de entrada disponibles, se utilizará el más adecuado a la investigación; estos son: el método Penman-Monteith, que requiere datos de radiación solar, temperatura aérea y velocidad relativa de humedad y viento; el método Priestley-Taylor, que requiere radiación solar, temperatura aérea y humedad relativa y el método Hargreaves, que sólo requiere temperatura aérea (Neitsch *et al.* 2005).

##### 1.5.1.1.2.2.1 Método Penman-Moteith

Este método combina la transferencia de masa y el balance de energía de una superficie (Neitsch *et al.* 2005).

$$\lambda E = \frac{\Delta(H_{net} - G) + \rho_{air} * c_p * \frac{e_z^o - e_z}{r_a}}{\Delta + \gamma * \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)}$$

Fuente: Barquero (2015)

**Donde:**

$\lambda E$  la densidad latente del flujo de calor (MJ/Md),

E es la evaporación de la tasa de profundidad (mm/d),

$\Delta$  es la pendiente de la curva de saturación de presión de vapor-temperatura (kPa/°C)

$H_{net}$  es la radiación neta (MJ/Md), G es la densidad de flujo de calor al suelo (MJ/Md),

$\rho_{air}$  es la densidad aérea (kg/m<sup>3</sup>),

$C_p$  es el calor específico en presión constante (MJ/kg c),

$e_z^o$  es la saturación de la presión de vapor de aire en altura Z (kPa),

$e_z$  es la presión del vapor del agua del aire en altura Z (kPa),

$\gamma$  es la constante psicométrica (kPa/°C),

rc: resistencia de dosel forestal (s/m) y  
ra: resistencia aerodinámica (s/m).

#### 1.5.1.1.2.2.2 Método Priestley-Taylor

Este método simplifica el descrito anteriormente, removiendo el componente aerodinámico y la energía, multiplicado por el coeficiente  $\alpha_{pet}=1,28$  en condiciones húmedas (Barquero 2015)

$$\lambda E_o = \alpha_{pet} * \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * (H_{net} - G)$$

**Fuente:** Barquero (2015)

Donde:

$\Lambda$  es el calor latente de evaporización (MJ/kg),

$E_o$  es la evapotranspiración potencial (mm/d),

$\alpha_{pet}$  es un coeficiente,

$\Delta$  es la pendiente de la curva de saturación de la presión de vapor-temperatura (kPa/°C),

$\gamma$  es la constante psicrométrica (kPa/°C),

$H_{net}$  es la radiación neta (MJ/m d) y

$G$  es la densidad del flujo de calor al suelo (MJ/m\*d)

#### 1.5.1.1.2.2.3 Método Hargreaves

Después de varias mejoras, este método fue publicado en 1985. La ecuación a utilizar por el *software* SWAT es la siguiente:

$$\lambda E = 0.0023 * H_o * (T_{mx} - T_{mn}) * 0.5 * (T_{av} + 17.8)$$

**Fuente:** Barquero (2015)

Donde:

$\lambda$  representa el calor latente de vaporización (MJ/kg),

$E_o$  es la evapotranspiración potencial (mm/d),

$H_o$  es la radiación extraterrestre (MJ/M d),

$T_{mx}$  es la temperatura aérea máxima por un día (°C),

$T_{mn}$  es la temperatura aérea mínima por un día (°C), y

$T_{av}$  es promedio en el día (°C).

#### 1.5.1.1.2.3 Evapotranspiración actual

Se define como el cálculo de la cantidad máxima de agua que se evapora del dosel de las plantas más el agua transpirada y la que se sublima de la tierra (Ritchie 1972, Neitsch *et al.* 2005, Olmedo *et al.* 2016). Su cálculo depende del método empleado; si se utiliza el de Penman-

Moteith, se usarán todas las ecuaciones que el método emplea. Si se utiliza el de Hargreaves (como en esta investigación), la ecuación es:

$$E_t = \frac{E_0 * LAI}{3} \quad \text{cuando } 0 \leq LAI \leq 3.0$$

$$E_t = E'_0 \quad \text{cuando } LAI > 3.0$$

Fuente: Barquero (2015)

Donde:

$E_t$  representa la transpiración máxima (mm),

$E'_0$  es la evapotranspiración potencial ajustada a la evaporación de agua libre en el dosel (mm) y LAI es el índice de área de hoja.

La máxima cantidad de sublimación y evaporación del suelo es dada por la ecuación:

$$E_s = E'_0 * COV_{sol}$$

Fuente: (Barquero (2015)

Es la máxima sublimación/evaporación del suelo en un día (mm),

$E'_0$  es la evapotranspiración potencial ajustada para la evaporación de agua libre en el dosel (mm) y  $COV_{sol}$  es el índice de cobertura de la tierra, el cual es calculado de la siguiente forma:

$$COV_{sol} = \exp(-5.0 \times 10^{-5} * CV)$$

Fuente: Barquero (2015)

Donde CV índice de cobertura del suelo

#### 1.5.1.1.2.4 Relación de los cálculos de ETP y los caudales

Según Cabezas (2016), mientras más ETP exista, los caudales se ven afectados y, por ende, varía la humedad de la superficie terrestre, la cual desciende a medida que se evapora el vapor agua, en tanto que cuando la ETP disminuye o es inferior al régimen de lluvia, los caudales aumentan, al igual que la deposición de sedimentos en cuerpos de agua, ríos, lagos, presas, mares y océanos.

#### 1.5.2 Cobertura de tierra

SWAT, con un solo modelo de crecimiento de las plantas, simula gran parte de coberturas del suelo, diferenciando coberturas anuales y perennes. La cobertura se utiliza para valorar la pérdida de agua de la superficie terrestre (Neitsch *et al.* 2005).

### 1.5.3 Erosión

Las ecuaciones de cálculo de pérdida de suelo se empezaron a desarrollar a partir de 1940, cuando a la estimación de la erosión se le llamó en un principio, método de práctica de pendiente (Wischmeier y Smith 1965).

La ecuación universal de pérdida de suelo ha sido utilizada en estudios de casos basados en la evaluación de procesos erosivos en diferentes partes del mundo (Carvajal 2017). Neitsch *et al.* (2011) y Carvajal (2017) definen matemáticamente la USLE de la siguiente manera:

$$A = R * K * LS * C * P$$

Dónde:

A= pérdidas de suelo por unidad de área.

R= factor de erosividad de la lluvia.

K= factor de erodabilidad del suelo.

LS= factor combinado de largo e inclinación de la pendiente.

C= factor de cobertura y manejo.

P=factor de prácticas de conservación de suelo.

Según Leander *et al.* (2007), SWAT divide las cuencas en subcuencas y microcuencas para ser más útil la modelación con áreas más pequeñas, sobre todo cuando esas áreas tienen diferentes usos de suelos que impactan la hidrología de la zona. De esta forma, cada división que realiza el *software*, la subdivide en HRU's que son las combinaciones que se pueden dar de acuerdo con el tipo de cobertura, suelo y pendiente de la subcuenca. Estas subdivisiones potencian las predicciones de la modelación de cada subdivisión.

Un componente importante en SWAT es el uso de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE), desarrollada por Wischmeier y Smith en 1965 y que según Gitas (2009), es un modelo muy utilizado para determinar tasas de erosión, teniendo en consideración diferentes factores como son la erosión del suelo, la intensidad de las lluvias, longitud, grado o porcentaje de inclinación de la pendiente, la cobertura y las prácticas de control de erosión.

### 1.5.4 Sedimentación

SWAT imprime las cargas de sedimentos calculadas con MUSLE que es una modificación de la USLE y las compara (Williams y Berndt 1976). La ecuación universal de pérdida de suelo modificada es:

$$Y = 11.8(Qxqp)^{0.56} K * LS * C * P$$

Dónde

Y = la producción de sedimentos de una tormenta individual en toneladas métricas

Q = el volumen de escorrentía de la tormenta en m<sup>3</sup>,

qp = la tasa máxima de escorrentía en m<sup>3</sup>/seg,  
K = el factor de erosionabilidad del suelo,  
LS = la longitud de la pendiente y el factor de pendiente,  
C = el factor de manejo del cultivo, y  
P = factor de práctica de control de erosión

Las diferencias dadas entre USLE y MUSLE indican que la segunda sustituye el factor R de la primera, por los valores de Q y qp que se obtienen de la escorrentía modelo. Estos dos factores están estrechamente relacionados, Q está más relacionado con el proceso de desprendimiento y qp define el transporte de sedimentos (Williams y Berndt 1976).

Otra diferencia es que la USLE predice la erosión bruta anual promedio en función de las lluvias acaecidas en un lugar objeto de estudio, mientras que en la MUSLE, el factor de energía de lluvia se reemplaza por un factor de escorrentía, haciendo predicciones más exactas en cuanto al tiempo ya que pueden ser diarias, semanales, mensuales, anuales o por eventos de precipitaciones específicos (Neitsch *et al.* 2011).

#### 1.5.5 Incertidumbre del modelo hidrológico

Para Engeland *et al.* (2016), la incertidumbre en los modelos hidrológicos pueden darse por los procesos propios del modelo y los datos utilizados, por lo que la calidad de la observación y las predicciones de estos modelos están estrechamente relacionadas. Por varios años se ha utilizado la cuantificación de incertidumbre en las modelaciones hidrológicas. Según Knoche *et al.* (2014), la falta de información de estaciones meteorológicas se puede sustituir por datos de plataformas digitales globales, pero en ocasiones una y otra puede diferir, por lo que se hace necesario la calibración de los modelos y recrear escenarios de precipitación y temperatura. En zonas áridas y semiáridas, SWAT resulta ser una herramienta efectiva de simulación si se cuenta con datos confiables y de calidad al momento de la calibración (Gomariz-Castillo y Alonso-Sarría 2018).

Como escenario posible esta investigación tomará como base el incremento y disminución del 20% de la precipitación media anual y 1,5°C en el escenario de 6.0 de RCP del IPCC.

##### 1.5.5.1 Calibración del modelo hidrológico

Las limitaciones en la obtención de datos reales u observados en los procesos de modelación hidrológica hacen necesario la calibración y ajustes de diversos parámetros, que, aunque no son fáciles de realizar, son de vital importancia ya que esta fase otorga mucha credibilidad a la investigación. Para Singh y Bárdossy (2012), la calibración tiene éxito cuando las observaciones son representativas del periodo modelado; en la mayoría de los casos es difícil precisar la cantidad exacta de datos requeridos para un parámetro específico.

Según Abbaspour *et al.* (2015), con SWAT-CUP se procede a la calibración del modelado hidrológico. Este es un programa que trabaja de manera independiente, donde los procedimientos internos que poseía GLUE, PSO, Parasol y MCMC (Carvajal 2017), fueron removidos y el SUFI2 fue reemplazado por SPE, el cual valida y analiza la sensibilidad del parámetro que se ajuste para calibrar. Estas simulaciones se realizan mediante iteraciones, que corresponden al tiempo que se necesita para ejecutar dicha simulaciones (Abbaspour 2007, Leander *et al.* 2007, Rouholahnejad *et al.* 2012).

En la evaluación de la eficiencia del modelo, el coeficiente de eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE), debe estar en un rango de  $-\infty$  a 1. Entre los valores de 0.0 y 1.0, el modelo se considera aceptable, siendo 1 el valor óptimo; si los valores son inferiores a cero, quiere decir que el predictor es mejor valor observado que el simulado (Nash y Sutcliffe 1970, Carvajal 2017, Zapana 2019, Arnold *et al.* 2012).

La eficiencia Kling Gupta, proporciona un indicador para los problemas del modelamiento hidrológico, pues facilita un análisis global basado en diferentes componentes como: correlación, BIAS y variabilidad. El valor de KGE varía de 0.0 a 1.0, siendo 0.0 la mejor representación del modelo (Gupta, Kling, Yilmaz, & Martinez, 2009, citado por Zapana 2019).

La validación de los modelos hidrológicos toma en cuenta diversos factores. Entre los más utilizados y eficientes están el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el coeficiente de Kling-Gupta (KGE) y el porcentaje de sesgo (PBIAS) (Carvajal 2017, Singh y Bárdossy 2012, Zapana 2019, Abbaspour 2007, Abbaspour *et al.* 2015, Gupta *et al.* 2009).

#### 1.5.6 Escenarios de clima futuro

Según Rodríguez *et al.* (2014), el quinto informe del IPCC establece cuatro escenarios de cambio climático: un escenario en el que los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2.6), dos escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI (RCP8.5) (OSCC 2021).

El IPCC sostiene que la temperatura media en el planeta registra un incremento de 0,85°C en el primer escenario, desde 1880 hasta el 2012, y las precipitaciones también se han incrementado desde la década de los años 50 hasta la actualidad (IPCC 2014, Ministerio de Agricultura et al. 2016, Gaviria-Montoya 2016, IPCC 2019).

De acuerdo con García-González *et al.* (2007), la vida en la tierra solo es posible con la integración del recurso hídrico en la planificación de un sistema de manejo y gestión efectiva de las cuencas hidrográficas. Por esto es necesario estudiar el ciclo hidrológico desde la perspectiva del cambio climático. Estos cambios podrán verse reflejados a nivel mundial y en todas las formas en las que se puede encontrar el agua en la tierra.



#### 1.5.6.1 Periodo de calentamiento y otras variables

Arnold *et al.* (2012), citados por Carvajal (2017), afirman que SWAT necesita un periodo de calentamiento o equilibrio (NYSKIP), necesario para cortos periodos de simulación. Por defecto SWAT calcula la evapotranspiración por el método Penman-Monteith. Si solo se cuenta con datos de precipitación y temperatura, el método a utilizar es el de Hargreaves (Neitsch *et al.* 2005, Neitsch *et al.* 2011). De un rango de 0 a 1 para el almacenamiento inicial de agua en el suelo (FFCB), donde 0 representa un suelo completamente seco y 1 un suelo anegado, debe elegirse 0.5 como valor intermedio (Arnold *et al.* 2012, Carvajal 2017).

#### 1.5.7 Programas complementarios

Si no se cuenta con datos de análisis de suelos realizados en calicatas, se pueden utilizar otros programas en la modelación hidrológica, como el NumCur, para determinar los grupos hidrológicos (Martínez *et al.* 2003), con datos de textura de suelo. Igualmente, el programa SPAW (Saxton 2002), determina la densidad aparente, conductividad hidráulica y disponibilidad de agua con datos de textura y contenido de materia orgánica.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Área de estudio

#### 2.1.1 Ubicación

El área de estudio corresponde a la cuenca del río Tireo (Figura 1), ubicada en el municipio Constanza, provincia La Vega, República Dominicana; que le brinda un aporte importante al caudal de río Yuna. Como tributarios principales están el río Tireo, al que a su vez le tributan el río Sonador y los arroyos Madre Vieja, Palero, El Café, Suriel y la Cañada de Loma Grande (Figura 2). Esta parte de la cuenca es el principal tributario de río Blanco, ubicada entre las coordenadas geográficas 18.92 y 18.97 latitud Norte y -70.63 y -70.71 longitud Oeste.

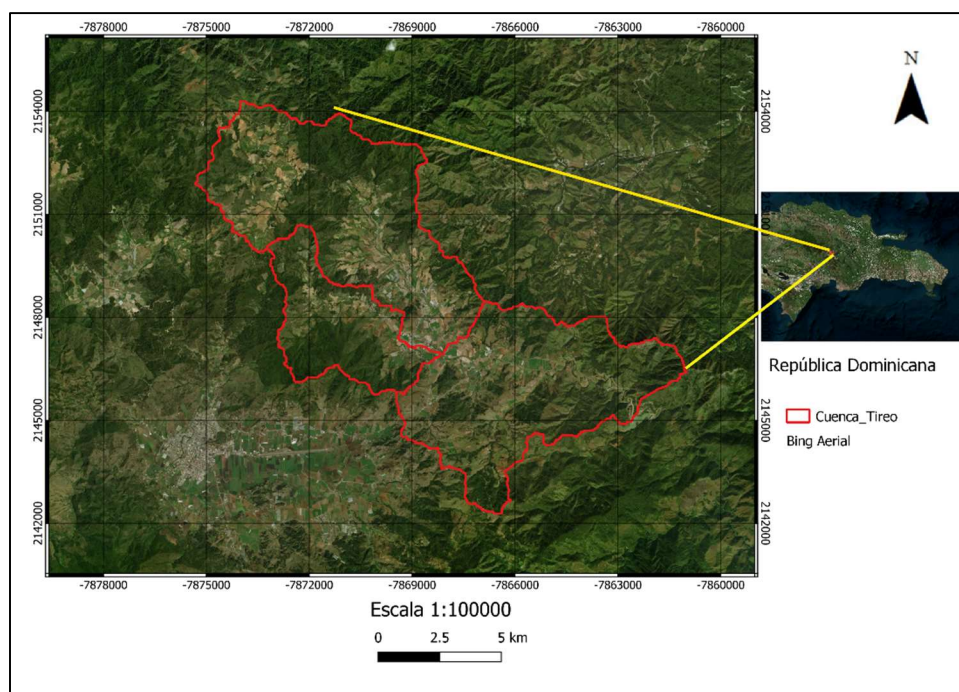


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana

#### 2.1.2 Características del área de estudio

La cuenca estudiada tiene un área de 60,3 km<sup>2</sup>; su red hídrica está determinada por su principal cuerpo acuífero, el río Tireo con una extensión de 15 km de longitud, una gradiente altitudinal entre 1180 a 1840 msnm y cuyo río principal desemboca en el embalse de la hidroeléctrica Pinalito (Figura 3), que aporta energía al sistema eléctrico nacional.

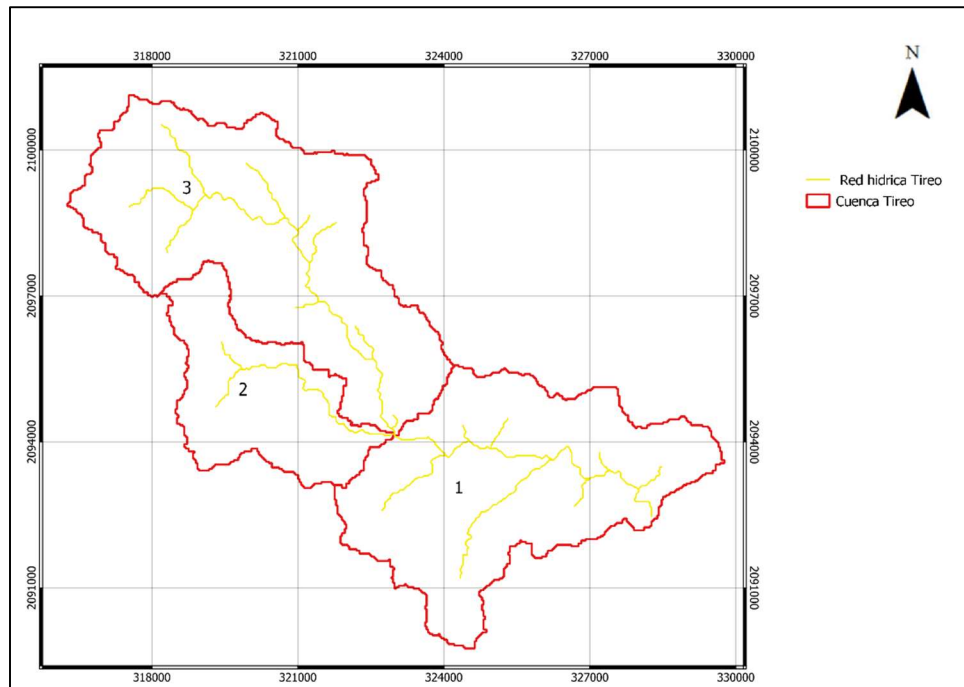


Figura 2. Red hídrica de la cuenca del río Tiro, Constanza, La Vega, República Dominicana



Figura 3. Embalse y casa de máquina de la Hidroeléctrica Pinalto, Constanza, La Vega, República Dominicana

#### 2.1.2.1 Zona de vida

La cuenca del río Tiro se encuentra mayoritariamente en bosque húmedo montano bajo (bh-mb), y una porción más pequeña en bosque muy húmedo montano bajo (bmh-mb) (Figura 4). De acuerdo a Marcano (2021), en estas zonas de vida ocurren las precipitaciones más intensas desde abril hasta noviembre; el rango de la precipitación anual va desde los 900 hasta los 2000

mm. Las temperaturas registradas en estas zonas de vida van de 12° - 18°C, no sobrepasando los 30°C (Marcano 2021).

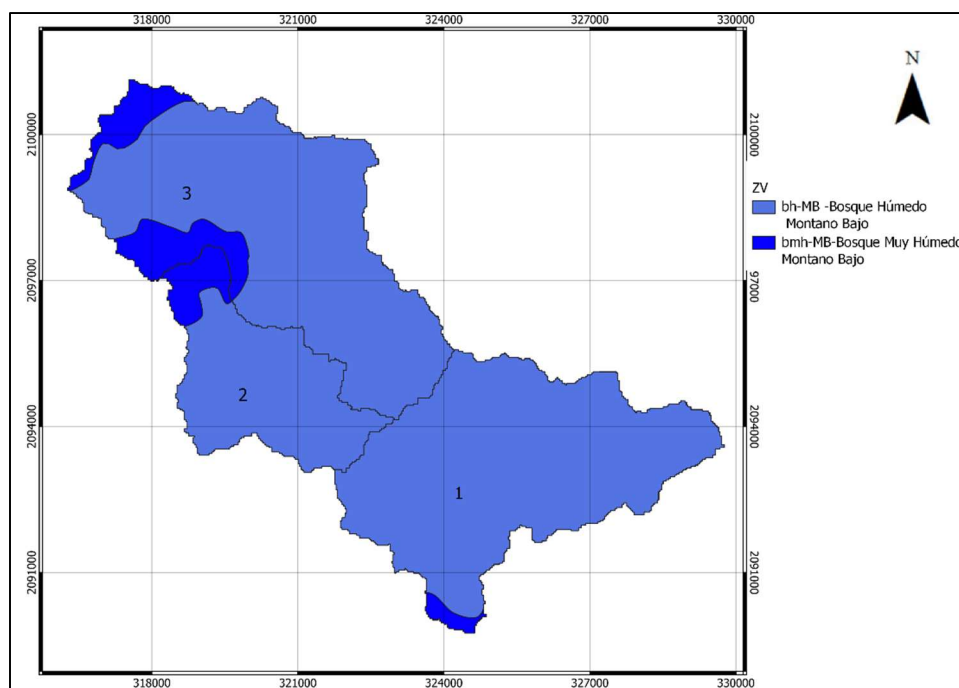


Figura 4. Zonas de vida de la cuenca río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana

#### 2.1.2.2 Cobertura

La vegetación primaria de la cuenca del río Tireo es de pino criollo (*Pinus occidentalis*) (Marcano 2021). Esta cobertura arbórea ha ido desapareciendo con el tiempo, pues el mayor porcentaje del área de la cuenca está ocupada por agricultura y/o ganadería (Cuadro 2 y Figura 5).

Cuadro 2. Tipo y porcentaje de cobertura de la cuenca del río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana

ID cobertura	Tipo de cobertura	Area (ha)	Area (km <sup>2</sup> )	Cobertura (%)
1	Pasto/ cultivos	3228,3	32,28	53,65
2	Bosque latifoliado	876,92	8,77	14,57
3	Bosque de pino	865,95	8,66	14,39
4	Suelo desnudo	609,14	6,09	10,12
5	Matorral latifoliado	419,97	4,2	6,98
6	Zona urbana	15,86	0,16	0,26
7	Lagos y lagunas	1,74	0,02	0,03
<b>Total</b>		<b>6017,87</b>	<b>60,18</b>	<b>100</b>

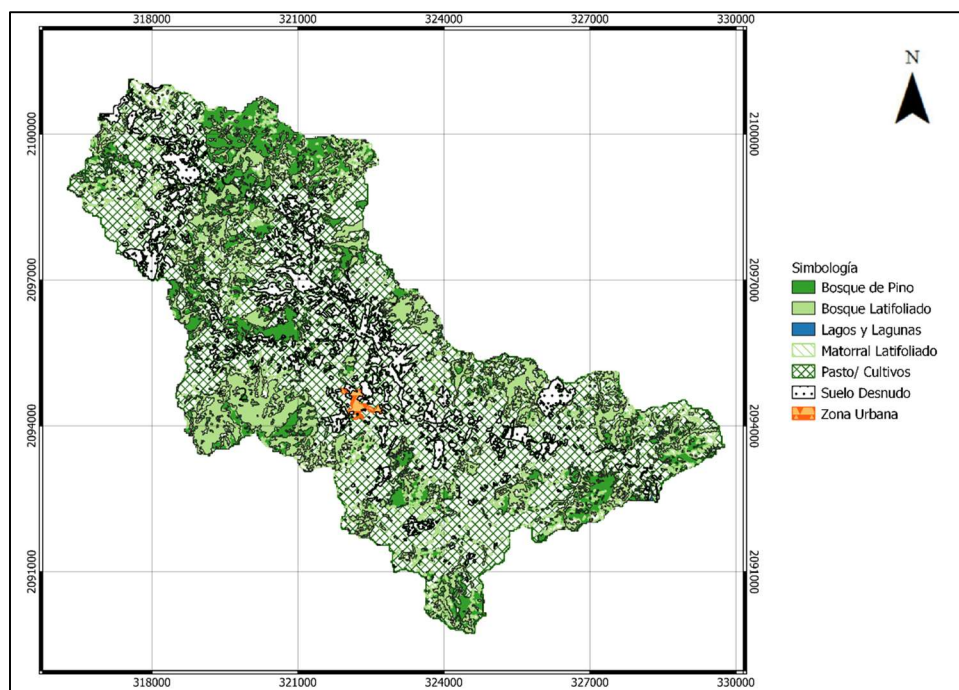


Figura 5. Cobertura vegetal de la cuenca río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana

### 2.1.2.3 Suelo

De acuerdo a la SEA (1985), los suelos de República Dominicana pertenecen a los órdenes Entisoles o Inceptisoles; tienen un pH ácido, son bien drenados, de permeabilidad lenta y de muy baja disponibilidad de agua. Esta entidad clasifica los suelos en unidades de recursos de planificación (URP), y estas a su vez, se clasifican en asociación de subgrupos dominantes de suelos (ASDS). El IDIAF (2010) agrupa los tipos de suelos presentes en la cuenca del río Tireo en tres asociaciones, con las siguientes características:

#### 2.1.2.3.1 Asociación Baiguate, Hondo, Auyamas, Jimenoa

En esta asociación se reúnen suelos que se caracterizan por su topografía accidentada, la poca profundidad del material originario y muy especialmente, por su bajo nivel de fertilidad. El material originario está formado, por lo general, por rocas que contienen cuarzo y feldespatos en proporciones variables y que dan lugar a suelos de características semejantes.

#### 2.1.2.3.2 Asociación Terreno Escabroso no Calizo y Calizo

Los suelos pertenecientes a esta asociación presentan topografía muy accidentada, en ocasiones pendientes superior al 100%. El material original cambia de rocas volcánicas metamórficas en la parte sur a altas concentraciones de cuarzo diorita en la parte central y granitos y dioritas en el extremo occidental.

### 2.1.2.3.3 Asociación Constanza

Esta asociación de suelo debe su nombre al municipio que lo alberga. Las rocas que los forman son de origen ígneo, volcánico y metamórfico, teniendo, además, alguna estratificación de rocas sedimentarias. Estas calizas afloran también en algunas lomas bajas situadas en el centro del valle intramontano que está formado por una faja de suelos aluviales, desarrollado a expensas de materiales de deposición de origen volcánico. Este suelo está representado por una arcilla de color negro rojizo a los 15 cm, pasa a color rojo sombreado con alguna gravilla fina de origen ígneo.

En el Cuadro 3 y Figura 6 se detallan los suelos y áreas cubiertas de la cuenca del río Tireo.

Cuadro 3. Suelos y áreas cubiertas presentes en la cuenca del río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana

Nombre	Área (ha)	Área (km <sup>2</sup> )	%
Asociación Baiguate Hondo-Auyamas -Jimenoa	161,95	1,62	2,69
Asociación Constanza	112,55	1,13	1,87
Asociación Terreno Escabroso no Calizo y Calizo	5743,61	57,44	95,44
Total	6018,11	60,18	100

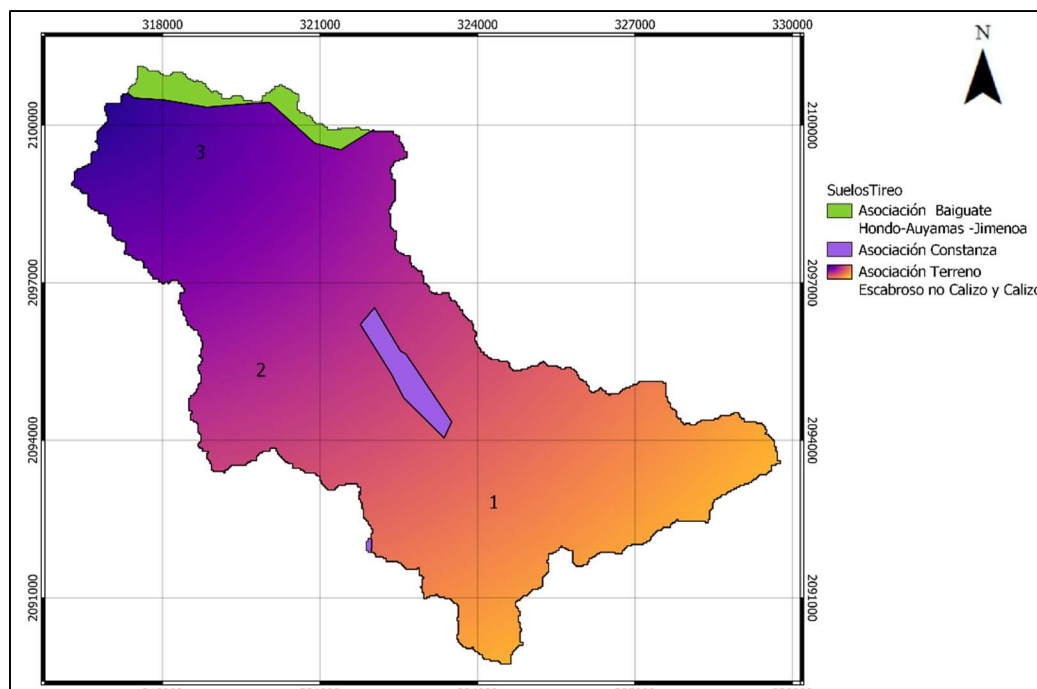


Figura 6. Suelos de la cuenca del río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana

### 2.1.3 Procedimiento metodológico

Debido a la facilidad que brinda el modelo hidrológico SWAT para hacer simulaciones de escenarios y tener cualidades como las de ser un modelo con base física, eficiente a nivel computacional, que emplea registros de entrada reales y sencillos y tener una amplia aplicación dentro de la comunidad científica, se ha convertido en uno de los modelos más útiles en la simulación hidrológica (Fernández de Villarán 2017). La versión empleada en este trabajo fue QSWAT3 versión: 1.1.1 en QGIS versión: 3. De acuerdo con Carvajal (2017), SWAT hace la modelación hidrológica básicamente en tres pasos, indicados a continuación.

En la Figura 7 se presenta la información requerida por SWAT.

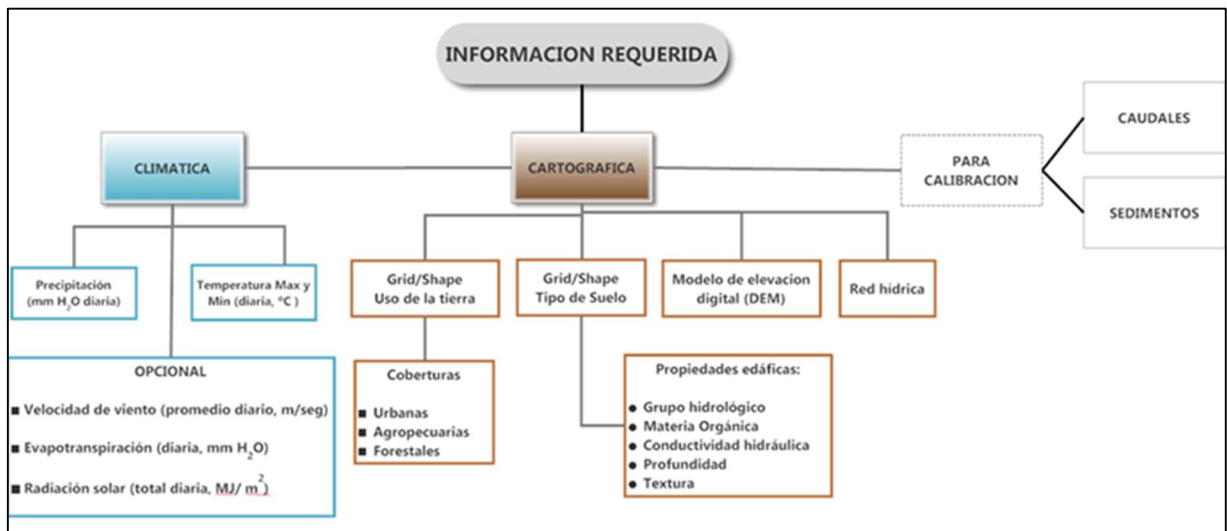


Figura 7. Información requerida por el modelo SWAT  
Fuente: Ríos (2018)

### 2.1.4 Estimación de la erosión y sedimentación en la cuenca del río Tireo

#### 2.1.4.1 Delimitación de la cuenca

El primer paso consistió en la delimitación de la cuenca. Para ello se utilizó el modelo de elevación digital (DEM), obtenido de la plataforma digital Google Earth Engine, para determinar la red hídrica de la cuenca, definida en el mismo *software* y se procedió a elegir el punto de aforo o salida, justo antes del embalse de la presa.



#### 2.1.4.2 Definición de HRU's

El siguiente paso consistió en la definición de los HRU's, con la incorporación de datos en formato .tiff del tipo de cobertura y suelo presentes en la cuenca, así como con archivos en formato .txt con la nomenclatura de cada tipo de cobertura y suelo.

#### 2.1.4.3 Corrida del modelo

El tercer paso de la modelación fue la corrida del *software* con la incorporación de los datos climáticos de precipitación y temperatura diarios del período 2010 al 2020. En esta investigación se contó con datos oficiales obtenidos de dos estaciones meteorológicas de la ONAMET.

#### 2.1.5 Datos utilizados en la corrida del modelo

##### 2.1.5.1 Cobertura

Si la información del tipo de cobertura presente en la cuenca se tiene en un archivo con formato *shapefile*, se deber convertir a *ráster* y ser reclasificada dentro de la clasificación/nomenclatura existente en la base de datos de SWAT, según se observa en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Leyenda del *ráster* del modelo hidrológico SWAT

<b>LANDUSE_ID</b>	<b>SWAT_CODE</b>
1	AGRL
2	FOEB
3	PINE
4	BARR
5	SHRB
6	URLD
7	WATR

##### 2.1.5.2 Suelo

Al archivo de suelos presentes en la cuenca con formato *ráster* se le asigna un ID con el nombre de cada tipo de suelo. En el caso de este estudio, los nombres se abreviaron con la primera letra de cada palabra.



Cuadro 5. Leyenda de los suelos en formato *ráster* del modelo hidrológico SWAT

SOIL_ID	SNAM
1	ABHAJ
2	AC
3	ATCC

La tabla usersoil con nomenclatura y datos es un archivo complementario de suelos es para procesar en SWAT. Para elaborar esta tabla, y como no se tenía información por cada horizonte de suelo, se procedió a buscar información secundaria y procesarla como lo establece Saxton (2002), según se muestra en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Datos para la creación de la tabla usersoil

Parámetro SWAT	Descripción
HYDGRP	Grupo hidrológico de suelo
SOL_ZMX	Profundidad máxima del suelo con presencia de raíces
ANION_EXCL	Fracción de porosidad desde donde los aniones son excluidos potencial o máximo rompimiento del perfil de suelo expresado como
SOL_CRK	Fracción del total de volumen de suelo
SOL_Z	Profundidad de cada horizonte desde la superficie
SOL_BD	Densidad aparente de cada horizonte
SOL_AWC	Capacidad de disponibilidad de agua en cada horizonte
SOL_K	Conductividad hidráulica en cada horizonte
SOL_CBN	Contenido de carbono orgánico en cada horizonte
SOL_ALB	Albedo del suelo húmedo en cada horizonte
SOL_EC	Conductividad eléctrica en cada horizonte
USLE_K	Factor de erodabilidad del suelo para cada horizonte
CLAY	Porcentaje de arcilla por horizonte
SILT	Porcentaje de limo por horizonte
SAND	Porcentaje de arena por horizonte
ROCK	Porcentaje de rocas por horizonte
SOL_CAL	Contenido de carbonato de calcio por horizonte
SOL_PH	pH para cada horizonte

Esta tabla se completó con la información obtenida de los suelos de República Dominicana. En el programa SPAW, con datos de textura y contenido de materia orgánica, se determinó la densidad aparente, conductividad hidráulica y disponibilidad de agua. El grupo hidrológico se determinó con datos de textura en el programa NumCur.

El albedo del suelo se determinó con datos de textura y materia orgánica por medio de la siguiente ecuación:

$$Albedo = 0,069 * color\ value - 0,0114$$

Fuente: Carvajal (2017)

El factor K de erodabilidad del suelo se estimó con la siguiente ecuación:

$$K_{usle} = \frac{0,00021 * M^{1,14} * (12 - OM) + 3,25 * (C_{soilstr} - 2) + 2,5 * (C_{perm} - 3)}{100}$$

Fuente: Carvajal (2017)

Donde:

$K_{usle}$  = factor de erodabilidad del suelo

$M$  = parámetro del tamaño de las partículas

$OM$  = porcentaje de materia orgánica

$C_{soilstr}$  = código de la estructura de suelo en la clasificación del suelo

$C_{perm}$  = perfil de las clases de permeabilidad

### 2.1.5.3 Clima

La incorporación de los datos climáticos para SWAT se realizó conforme a los requerimientos del *software*. Para ello se ejecutó un archivo en la macro WGN (SWAT 2021), con los datos diarios de precipitación y temperatura. Se elaboraron archivos generales, individuales y wage\_id, que es un archivo de identificación de la estación meteorológica, en formato .txt, según se indica en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Archivos para la macro WGN

Archivos generales	Archivos individuales	Wage id
ID = número de identificación de la estación;		ID = número de identificación de la estación;
NAME= nombre del archivo con registros/datos de la variable;		NAME= nombre del archivo con registros/datos de la variable;
LAT= coordenadas geográficas de ubicación/latitud;	Contiene los registros de las variables precipitación y temperatura. Su encabezado es la fecha de inicio de los datos registrados. Fecha en formato inglés	LAT= coordenadas geográficas de ubicación/latitud;
LONG= coordenadas geográficas de ubicación/longitud y latitud		LONG= coordenadas geográficas de ubicación/longitud y latitud
ELEVATION= altura en msnm de la estación meteorológica		

Se editaron los archivos de precipitación y temperatura; el *software* indica los demás parámetros climáticos con valores de cero. Se procedió a vincular los archivos en formato .txt al archivo WGNmaker4.1.xls y empezar la corrida. Los resultados se muestran en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Resultado de la macro WGN

Parámetros	Descripción
TMPMX	Promedio mensual de la temperatura máxima diaria (2C)
TMPMN	Promedio mensual de la temperatura mínima diaria (2C)
TMPSTDMX	Desviación estándar mensual de la temperatura máxima diaria (2C)
TMPSTDMN	Desviación estándar mensual de la temperatura mínima diaria (2C)
PCPMM	Promedio mensual de la precipitación diaria (mm H <sub>2</sub> O)
PCPSTD	Desviación estándar mensual de la precipitación diaria (mm H <sub>2</sub> O/día)
PCPSKW	Coefficiente de asimetría mensual de la precipitación diaria
PR_W1	Probabilidad mensual de ocurrencia de un día húmedo luego de un día seco
PR_W2	Probabilidad mensual de ocurrencia de un día húmedo luego de un día húmedo
PCPD	Promedio mensual del número de días de lluvia
RAINHHMX	Máxima lluvia de media hora por mes (mm H <sub>2</sub> O)
SOLARAV	Promedio mensual de la radiación solar diaria (MJ/m <sup>2</sup> /día)
DEWPT	Promedio mensual de la temperatura del punto de rocío (MJ/m <sup>2</sup> /día)
WNDV	Promedio mensual de la velocidad de viento diaria (m/s)

Cuadro 9. Insumos y descripción de datos y fuentes de obtención

<b>Insumo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Fuente</b>
Clima (Precipitación $\pm 20\%$ ) (Temperatura $+1,5^{\circ}\text{C}$ )	Datos de precipitación y temperaturas a nivel diario del periodo 2010-2020	Oficina Nacional de Meteorología (ONAMET)
Relieve	<i>Ráster</i> de elevación en formato TIFF de la subcuenca Resolución: 30*30 m	Google Earth Engine
Suelo	<i>Ráster</i> de tipos de suelo presentes en la subcuenca en formato TIFF. Resolución: 30*30 m Descripción de suelos presentes en la cuenca con la apertura de calicatas	Elaboración propia, con base en datos de la FAO
Cobertura	<i>Ráster</i> de tipos de cobertura presentes en la subcuenca en formato TIFF Resolución: 30*30 m	Elaboración propia, con base en datos de MARENA

#### 2.1.6 Áreas críticas de la cuenca

Las áreas críticas se determinaron con los resultados de la modelación hidrológica, a nivel de cuenca, subcuenca y a nivel mínimo de detalle de los HRU's.

#### 2.1.7 Calibración de SWAT

Mediante SWAT-CUP, con el algoritmo estadístico de hipercubo latino se calibró, analizó la sensibilidad y se validó la incertidumbre de la modelación. Para ello se utilizaron datos de caudales observados en la estación de medición, en el embalse de la presa de Pinalito. Los parámetros iniciales se eligieron con el fin de verificar el mejor ajuste de los caudales observados con los obtenidos en la modelación.

Cuadro 10. Estadísticos de la calibración del modelo hidrológico SWAT

Estadístico	Descripción	Rango
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	Mide la correlación entre los datos observados y los simulados; también se denomina R cuadrado	0-1
Porcentaje de BIAS (PBIAS)	Mide la tendencia de los datos simulados para ser mayor o menor que su contraparte (datos observados) en la que valores negativos indican tendencia a la sobreestimación y positivos a la subestimación	1.0
Kling-Gupta Efficiency (KGE)	Considerado como una mejora del índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe ya que corrige el sesgo generado por el modelo entre series observadas y simuladas, con caudales punta por lo que proporciona un mejor ajuste del modelo en caso de disponer de mediciones con numerosos picos	0-1
Nash-Sutcliffe (NSE)	Es uno de los estadísticos de <i>performance</i> más usado en procesos de modelación hidrológica. Determina cuánto de la variabilidad de las observaciones (datos medidos) es explicada por la simulación.	$-\infty$ -1

En el Cuadro 11 se presentan los parámetros iniciales de la simulación. La letra que se antepone al nombre del parámetro indica el proceso de ajuste, V equivale a reemplazar y R implica (1 + valor de cambio sugerido). Una vez que se incorporaron los ajustes dentro del modelo hidrológico, se procedió a correr nuevamente el modelo.

Cuadro 11. Parámetros iniciales y rangos para la calibración del modelo hidrológico SWAT-CUP, cuenca del río Tiro, Constanza, La Vega, República Dominicana

Parámetro	Definición	Rango	
1: R__CN2.mgt	Número de curva para condición de humedad II	-0.2	0.2
2: V__GWQMN.gw	Profundidad umbral de agua en el acuífero poco profundo requerida para que ocurra el flujo de retorno	350	4000
3: R__CH_N2.rte	Valor N de <i>Manning</i> para el canal principal	-0.01	0.3
4: R__OV_N.hru	Valor N de <i>Manning</i> para el flujo terrestre	0.01	4
5: R__CH_N1.sub	Valor "n" de <i>Manning</i> para los canales tributarios requerido	0.01	30
6: R__SLSUBBSN.hru	Longitud media de la pendiente	10	150

### 2.1.7.1 Período de calentamiento y otras variables

Para el período de calentamiento o equilibrio (NYSKIP), en esta investigación se utilizó un período de información de tres años, de los 11 disponibles. Se eligió y modificó el método Hargreaves. De un rango de 0 a 1 para el almacenamiento inicial de agua en el suelo (FFCB), se eligió 0.5.

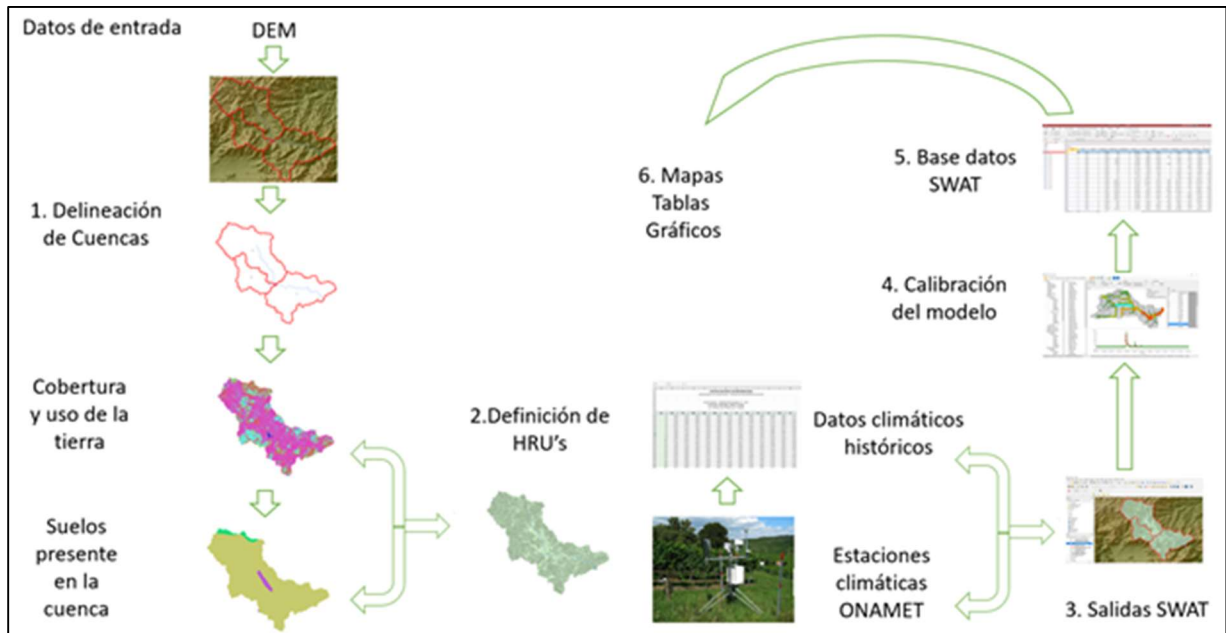


Figura 8. Resumen metodológico de la modelación de la erosión y sedimentación en la presa de Pinalito, Constanza, La Vega, República Dominicana

### 3 RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados obtenidos de la modelación hidrológica en la cuenca del río Tireo muestra que, en el balance hidrológico antes de la calibración, la cantidad de agua precipitada era de 1483,8 mm/año, la escorrentía superficial 360,04 mm/año, el flujo lateral 12,4 mm/año, el flujo de retorno 12,4 mm/año, la evapotranspiración real 794,1 mm/año, la percolación 205,22 mm/año y la evapotranspiración potencial 1713 mm/año (Figura 9).

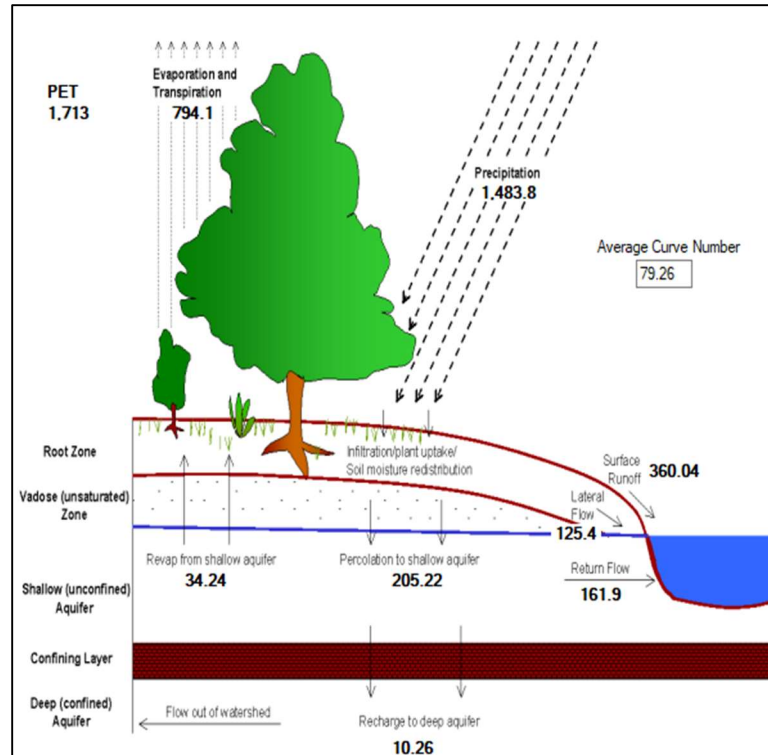


Figura 9. Componentes del balance hidrológico en la cuenca del río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana

#### 3.1 Calibración

Para calibrar la modelación se seleccionó la subcuenca 1, ya que en ella se encuentra el punto de observación de caudales. Los parámetros calibrados fueron los que más ajustaron el caudal simulado al observado, y ser los más sensibles. Para llegar a un resultado óptimo, se realizó varias iteraciones. Cada iteración requirió de 300 a 800 simulaciones, dependiendo de la velocidad de la máquina; se realizó un máximo de 1000 simulaciones por cada iteración. En el Cuadro 12 se observan los estadísticos obtenidos antes y después de la calibración.

Cuadro 12. Estadísticos antes y después de la calibración del modelo hidrológico SWAT

Estadístico	No calibrado	Calibrado
R	0,4	0,6
R <sup>2</sup>	0,1	0,3
NSE	-8,5	-0,15
PBIAS	60	32
KGE	0,1	0,5

El Cuadro 13 presenta los parámetros calibrados en SWAT-CUP. Como se observa, se presentan los valores mínimos y máximos de la sensibilidad, los valores de ajuste y de cambio para lograr el mejor estadístico hidrológico; entre más cercano sea el valor a 1 es mayor la sensibilidad. En la Figura 10 se muestra el análisis de sensibilidad; se observa que a mayor pendiente en las nubes de puntos, mayor es el grado de sensibilidad del parámetro. En el cálculo de los estadísticos en la calibración del modelo para los caudales, se obtuvo un R<sup>2</sup> de 0,32, para una correlación entre los datos observados y los simulados de un 32%. El PBIAS subestimó los caudales simulados sobre los observados en un 32%, cuyo valor deseado sería 0; si se obtiene valores negativos los caudales simulados respecto a los observados se sobreestiman y si el valor obtenido es positivo los caudales simulados se subestiman, respecto a los observados. El KGE representa una menor subestimación de los picos en los caudales que el NSE; el valor obtenido fue de 0,46, por lo que el modelo se ajusta mejor con este estadístico que al NSE que mostró un valor negativo.

Cuadro 13. Parámetros calibrados del modelo hidrológico en SWAT-CUP

Parámetro	Valor mínimo	Valor Máximo	Sensibilidad	Valor de ajuste sugerido	Valor de cambio
V__GWQMN.gw	350	4000	1	621.92	621.92
R__CN2.mgt	-0.2	0.2	2	0.19	1.19
R__OV_N.hru	0.01	4	3	3.73	4.73
R__CH_N1.sub	0.01	30	4	26.51	27.51
R__SLSUBBSN.hru 10		150	5	133.13	134.13
R__CH_N2.rte	-0.01	0.3	6	0.11	1.11



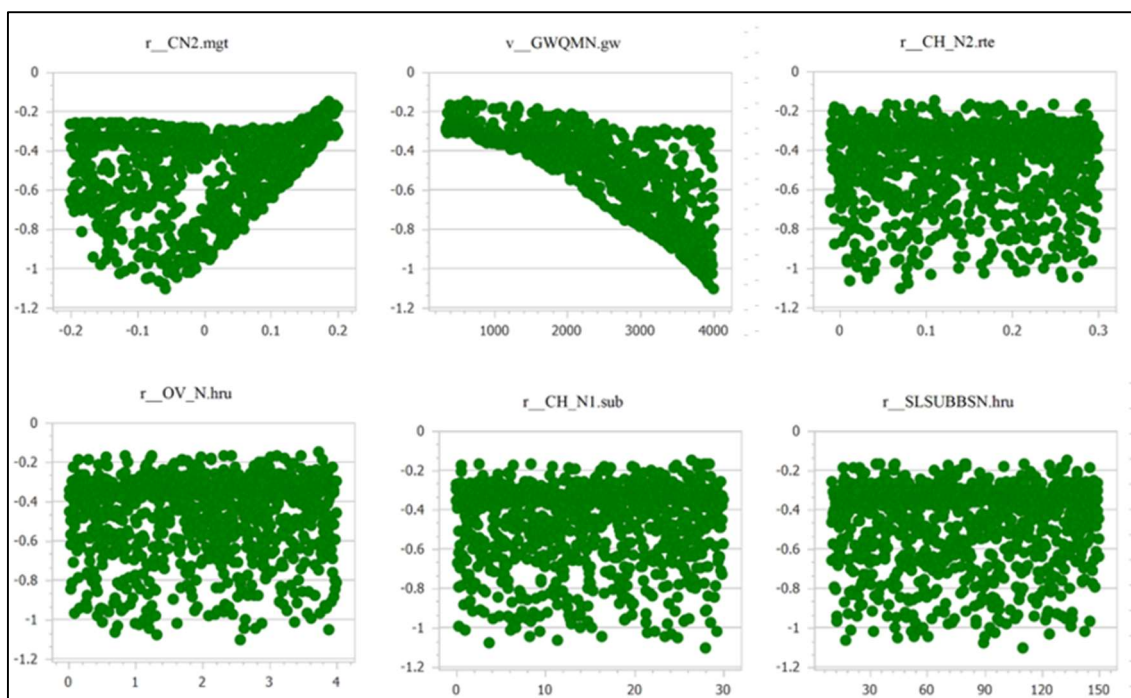


Figura 10. Diagrama de dispersión de los parámetros calibrados

El Cuadro 14 muestra los estadísticos parametrizados y el valor obtenido para cada uno; no se obtuvieron resultados adecuados para NSE, por lo que no se consideró para el ajuste del modelo. En este sentido, sólo se consideraron los estadísticos  $R^2$ , P-BIAS y KGE.

Cuadro 14. Estadísticos hidrológicos calibrados

Estadístico	Rango	Valor obtenido
R	0-1	0,6
$R^2$	0-1	0,3
KGE	0-1	0,5
PBIAS	0	32
NSE	$-\infty$ -1	-0,15

El mejor ajuste se evaluó por la banda de predicción (Figura 11), donde la mejor estimación corresponde a los caudales simulados que estén en esta franja. Los caudales observados deben estar dentro de la franja verde y, según se muestra en la figura, los picos de los caudales observados están, en su mayoría, por encima de esta banda por lo que hay sobreestimación de los mismos.

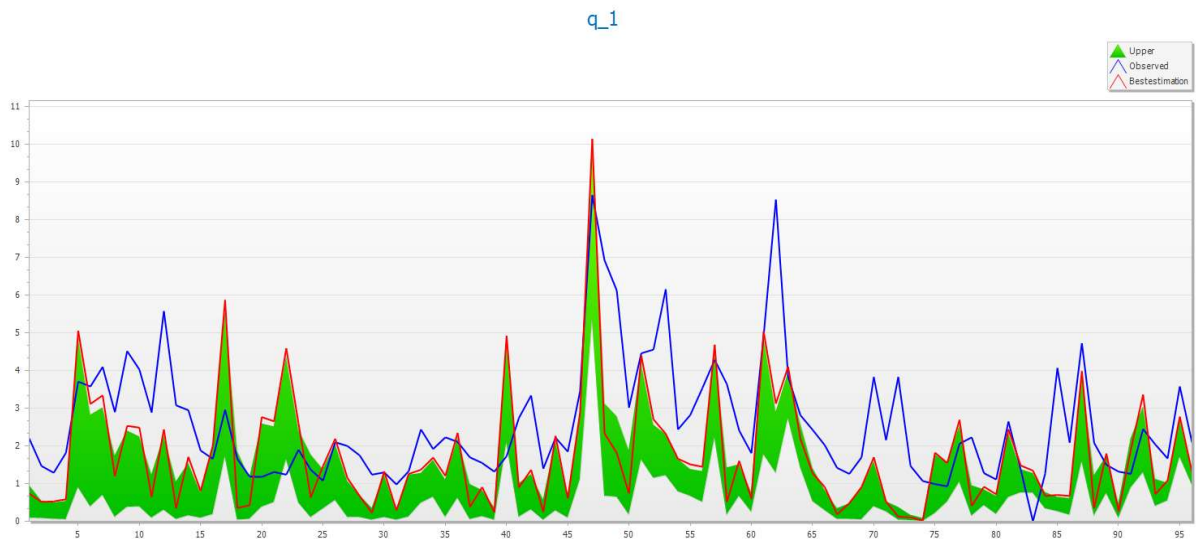


Figura 11. Caudal observado, simulado y banda de predicción del modelo hidrológico

No se tiene registro de simulaciones hidrológicas en esta cuenca. En la cuenca adyacente del Yaque del Norte se han realizado varias investigaciones como la de Rodríguez (2019), que utilizó los mismos criterios estadísticos que Carvajal (2017) para evaluar la eficiencia del modelo. Ambos evaluaron los factores  $p$  y  $r$ , el coeficiente de eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE), el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el porcentaje de sesgo (PBIAS) y el coeficiente de Kling-Gupta (KGE), coincidiendo con cuatro factores de esta investigación. Según los resultados del Cuadro 15, se obtuvieron mejores resultados en el  $R$ ,  $R^2$ , PBIAS y KGE, lo cual puede ser explicado por la calidad de los datos observados ya que Rodríguez (2019), utilizó estaciones climáticas virtuales.

Cuello (2003), en su investigación en la cuenca del Yaque del Norte reporta el un valor de 0,91 para el estadístico  $R^2$ . Este autor indica que los caudales observados corresponden muy bien con los simulados y afirma que la calidad de los datos observados es determinante para la validación de los modelos hidrológicos.

Cuadro 15. Comparación de estadísticos de los modelos hidrológicos de Rodríguez (2019) y los de este estudio

Estadístico	Rodríguez (2019)	Esta investigación
p-factor	0.29	-
R	4.28	60
$R^2$	0.03	0.3
NSE	-8.49	-
PBIAS	-71	32
KGE	-0.91	0.5

### 3.2 Erosión

El proceso de modelación con SWAT dividió la cuenca del río Tireo en tres subcuencas y 120 HRUs. En la cuenca se erosionan 31,35 ton/ha/año; el mayor porcentaje lo aporta la subcuenca 1, con un monto anual de 38,25ton/ha (Figura 12, Cuadro 16).

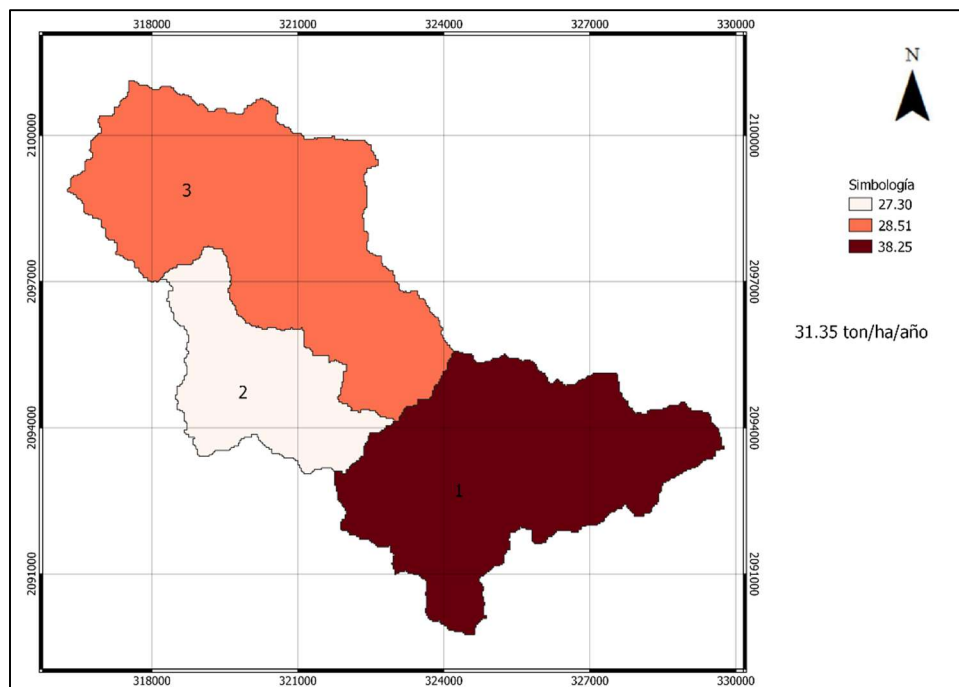


Figura 12. Mapa de erosión por subcuencas en la cuenca del río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana

Cuadro 16. Porcentaje de suelo que se erosiona en la cuenca del río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana

Subcuenca	Area (ha)	Erosión de suelo (ton/ha/año)	%
1	2300	38,25	122,00
2	1100	27,30	87,06
3	2600	28,51	90,94
<b>Total</b>	<b>6000</b>		<b>100</b>

El tipo de cobertura presente en la cuenca es determinante para la erosión. En el Cuadro 17 se muestra la erosión por tipo de cobertura. Como se observa, la agricultura intensiva y las pasturas combinadas constituyen los usos del suelo con mayor erosión.

Cuadro 17. Erosión por cobertura estimada en la cuenca del río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana

Landuse_Id	Swat_Code	Tipo de cobertura	Superficie (ha)	Erosión (ton <sup>3</sup> /ha/año)	%
1	FOEB	Bosque latifoliado	1018	179,58	12
2	AGRL	Agricultura/pastos	3376	513,48	36
3	SHRB	Matorrales	365	212,67	15
4	URLD	Zona urbana	16	5,57	0
5	PINE	Bosque de pino	729	235,94	16
6	WATR	Agua	1	0	0
7	BARR	Suelo desnudo	521	294,74	20
			6026	1,441,98	100

Los 120 HRU's permitieron obtener las áreas más críticas de erosión que, en concordancia con el mapa anterior, corresponden a la subcuenca 1 (Figura 13).

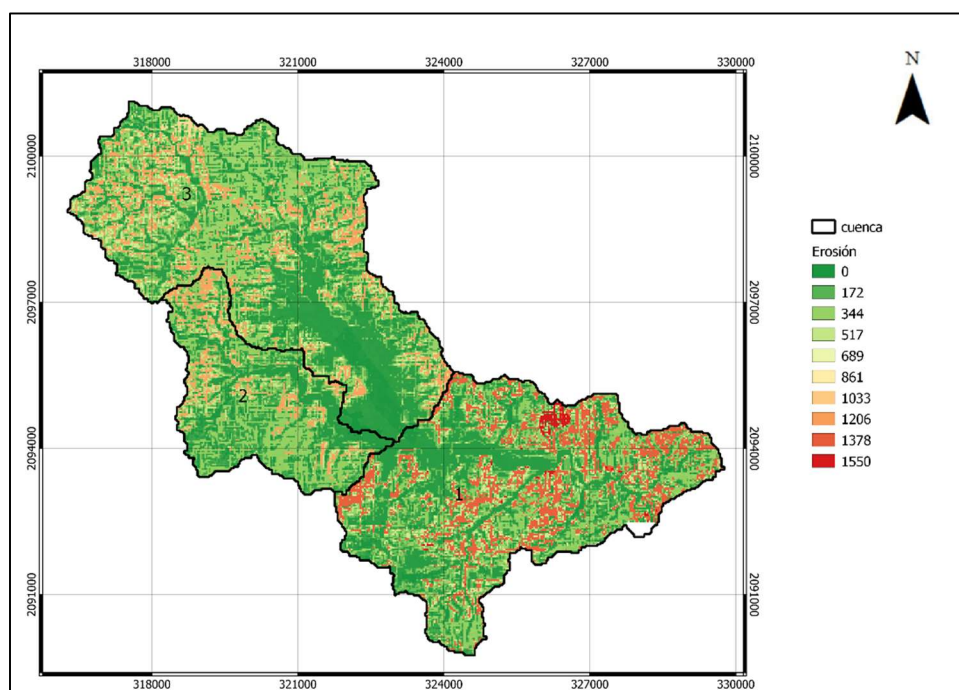


Figura 13. Mapa de erosión por HRU's de la cuenca río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana

Para la cuenca no se encontraron registros de erosión. Los resultados registrados por el presente estudio (31,35 ton/ha/año) son similares a los indicados por Figueroa (2020) y Rodríguez (2019) en simulaciones realizadas en la cuenca vecina del río Yaque del Norte, y que corresponden a 32,36ton/ha y 30 ton/ha respectivamente. Jiménez *et al.* (2005), por su parte, reportó una erosión de 36,6 ton/ha en los suelos de las cuencas aguas arribas de los embalses del país. Jiménez y Farias (2003) citando a Nagle (1997), señalan que en la cuenca del río Nizao se erosionan 27,5 ton/ha/año de suelo, el cual corresponde a un valor muy cercano a la erosión en la cuenca del río Tireo.

### 3.3 Sedimentación

La simulación realizada en la cuenca del río Tireo indicó que el nivel de flujo de sedimentos alcanzó 5,67 ton, con un caudal al año de 0,95 m<sup>3</sup>/s (Figura 14 y Cuadro 18). La relación caudal-sedimentación depende muy estrechamente una de la otra ya que al aumentar el caudal aumenta la suspensión de sólidos (sedimentación) en el agua y viceversa, cuando aumenta la disposición de sedimentos, aumenta el caudal del río.

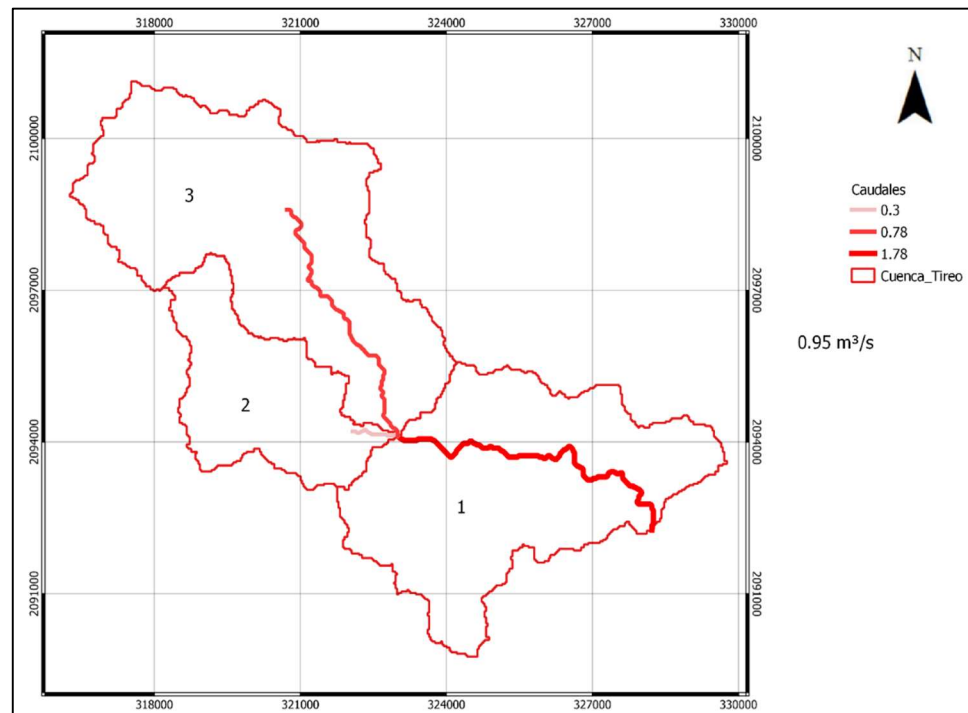


Figura 14. Caudales de sedimentación del río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana

Cuadro 18. Caudales de sedimentación por subcuencas, río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana

Subcuenca	Área (ha)	Caudales (m <sup>3</sup> /s)	%
1	2300	1,78	187,03
2	1100	0,30	31,18
3	2600	0,78	81,79
<b>Total</b>	<b>6000</b>		<b>100</b>

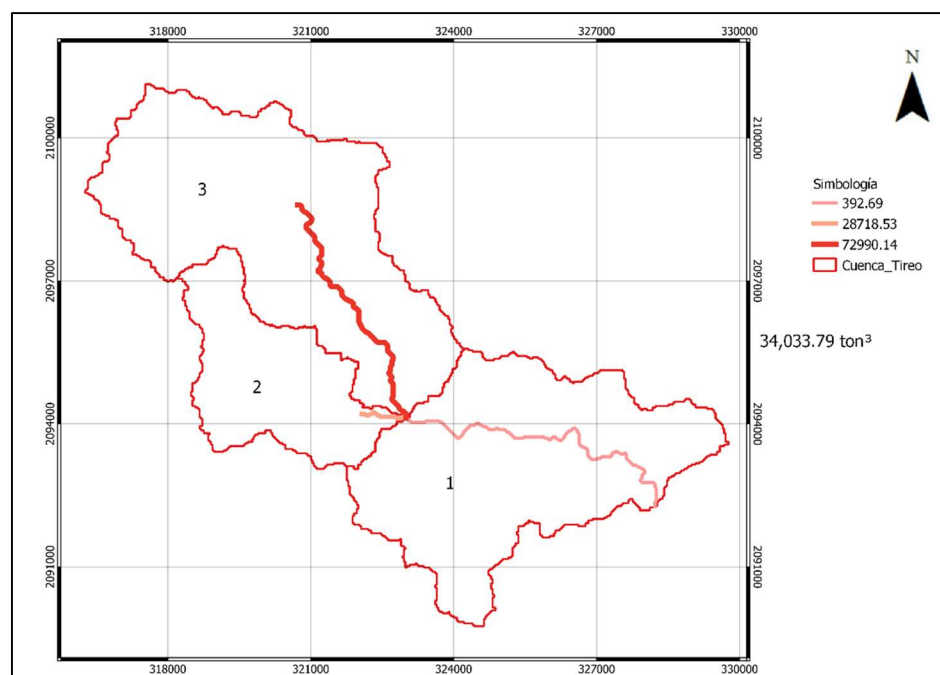


Figura 15. Aporte de sedimentos del río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana

Cuadro 19. Porcentaje y aporte de sedimentación en la cuenca del río Tireo, Constanza, La Vega, República Dominicana

Subcuenca	Area (ha)	Erosión de suelo (ton <sup>3</sup> )	%
1	2300	392,69	1,15
2	1100	28718,53	84,38
3	2600	72990,14	214,46
<b>Total</b>	<b>6000</b>	<b>34033,79</b>	<b>100</b>

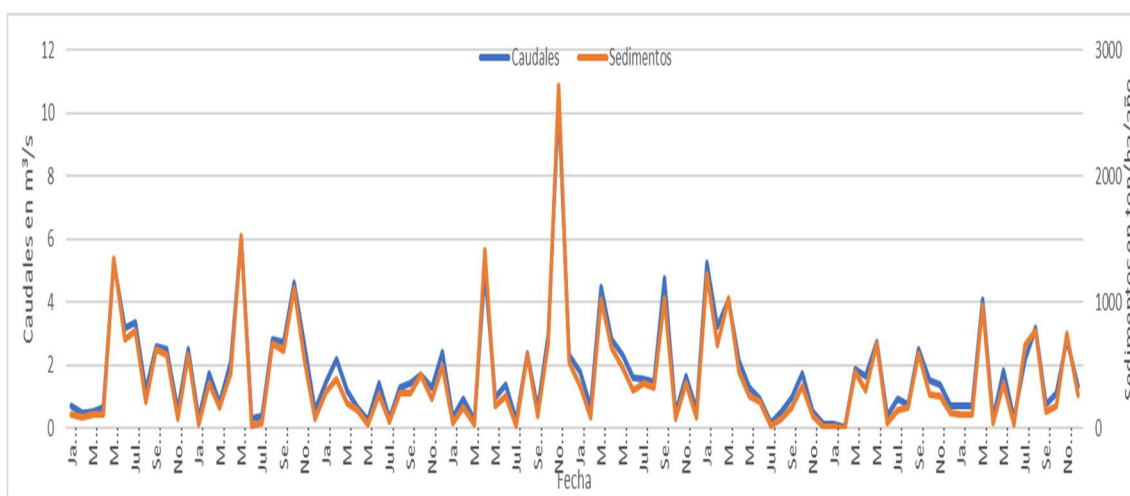


Figura 16. Comparación de los flujos de caudal-sedimentos de la cuenca del río Tiro, Constanza, La Vega, República Dominicana

Los caudales y sedimentos en embalses de República Dominicana, presentados en el Cuadro 20, muestran diferencias en relación a los encontrados en la simulación hidrológica de la cuenca del río Pinalito. Estas diferencias pueden deberse a que el área de la cuenca de las presas estudiadas son más grandes territorialmente y los caudales y sedimentos están influenciados por el área total de la cuenca a estudiar.

Cuadro 20. Caudales y sedimentos en embalses de República Dominicana

Embalse	Año inicio operación	Area de cuenca (km <sup>2</sup> )	Caudal medio (m <sup>3</sup> /s)	Producción de sedimentos (ton/ha/año)
Tavera	1973	785	28,3	22,87
Valdesia	1976	887	21,4	34,17
Rincón	1978	178	10	50,56
Sabana Yegua	1979	1676	18	26,44
Sabaneta	1980	464	7,7	15,2
Hatillo	1980	1190	43,6	39,44
Jigüey	1992	537	11	27
Aguacate	1992	747	15,1	26,64

Fuente Jiménez *et al.* (2005)

### 3.4 Comportamiento de los fenómenos de erosión y sedimentación

Los mapas de erosión elaborados evidencian un mayor índice de arrastre de partículas de suelos en la subcuenca 1, o parte baja que, aunque no es la zona con mayor porcentaje de pendiente, es la zona agrícola más intensivamente cultivada, aportando 38,25 ton/ha/año que corresponden al 40,67% del total erosionado.

Un fenómeno que se presenta en la cuenca relacionado al sedimento que es transportado en el caudal del río, es que la mayor cantidad de partículas suspendidas que se transportan (72 950 ton<sup>3</sup>/ha/año), ocurre en la subcuenca 3; mientras que en la subcuenca 1, es donde se erosiona la menor cantidad, lo cual puede ser explicado por la pendiente del terreno y a que a lo largo del río existen depósitos de sedimentos que impiden que estos lleguen a la presa.

### 3.5 Escenarios de cambio climático con el aumento y disminución del 20% de la precipitación promedio anual y el aumento de 1,5°C

El Cuadro 21 presenta tres escenarios elaborados por la modelación; el actual proviene de datos de estaciones meteorológicas locales y caudales observados en el embalse de la presa de Pinalito, que posteriormente fueron calibrados para una mayor confiabilidad de los datos; el segundo escenario se elaboró considerando una disminución del 20% de la precipitación y un aumento de 1,5°C de temperatura y el tercero consideró un aumento del 20% de la precipitación y 1,5°C de temperatura. Según los resultados obtenidos, de seguir el curso del cambio climático, su acción sobre el planeta (escenario 3), representa un grave problema en los diferentes parámetros estudiados.

Cuadro 21. Escenarios de cambio climático considerados

Parámetros	Escenario actual	Escenario -20% pcp 1,5tmp	Escenario +20% pcp 1,5tmp
Precipitación (mm anuales)	1438,80	1187,00	1780,50
Evapotranspiración real (mm anuales)	546,9	511,80	578,60
Evapotranspiración potencial (mm anuales)	1713	1773,30	1773,30
Escorrentía superficial (mm anuales)	836,31	601,77	1078,54
Erosión (ton/ha/año)	31,35	23,18	41,97
Sedimentos (ton/ha/año)	5,67	4,15	7,63
Caudales (m <sup>3</sup> /s)	0,95	0,68	1,22

El estudio de Medina (2021), presenta una modelación hidrológica bajo escenarios climáticos en Bolivia. En los diferentes escenarios obtuvo una disminución de las precipitaciones desde 1,1 a 4,1% y un aumento de temperatura desde 1,5 a 2,5°C. Amblar-Francés *et al.* (2016), establecen que en España las cuencas hidrográficas se verán seriamente afectadas por los efectos del cambio climático, con un aumento de temperatura de 1 hasta 6°C; en el caso de la precipitación, se registra una ligera tendencia a la disminución con un rango entre 5 y 45%. Estos estudios evidencian que los efectos del cambio climático son globales y que las cuencas hidrográficas, no importa su tamaño o ubicación en el planeta, serán gravemente afectadas.



### 3.6 Acciones propuestas

Para contrarrestar el deterioro de la cuenca del río Tireo, es preciso realizar acciones que vayan encaminadas a subsanar los daños a que ha sido sometida por largos años. Las acciones propuestas a continuación, funcionarán como herramienta útil para la toma de decisiones para un manejo y gestión efectiva de la cuenca, como en el caso de la cuenca del río Yaque del Norte, que cuenta con un plan de manejo y conservación de los recursos naturales que incluye un “Diagnóstico de Áreas Críticas” (DAC) (Melgar 2004).

Cuando en la cuenca se conservan los bosques, se producen agua en mayor cantidad y de mejor calidad, comparada con usos alternativos de los suelos como agricultura, industria, y asentamientos humanos. Los bosques contribuyen en gran medida a disminuir la acción de erosión en los suelos y contribuyen a reducir la carga de sedimentos que entran a los cuerpos de agua abajo (Yaque del Norte 2015).

#### 3.6.1 Restauración asistida

La restauración ecológica asistida como la reforestación, ha tenido un crecimiento significativo en el país a través de la implementación del programa nacional Quisqueya Verde, que ha permitido recuperar áreas desprovistas de vegetación boscosa, mediante la plantación de más de 20 millones de arbolitos en la última década (SEMARENA 2010, Ambiente 2011, Medio Ambiente 2012, FAO 2015). En el caso de la actividad ganadera, se promueve el establecimiento de sistemas silvopastoriles a partir de la conversión de áreas de pastizales en sistemas ganaderos más sostenibles y eficientes en el uso de los espacios (Yaque del Norte 2015).

#### 3.6.2 Recuperación franja de protección

En el país aún no se ha elaborado un plan nacional de ordenamiento forestal, por lo tanto no se han establecido áreas de protección de suelos y aguas, aunque la ley 64-00 establece una franja de protección a ambos márgenes de los cursos de aguas (FAO 2015).

Con la recuperación de la franja de protección de los 30 metros reglamentarios a ambos márgenes de la red hídrica (Congreso Nacional 2000), en la cuenca se recuperarían unas 258 ha que se podrían dedicar a la conservación y reforestación con especies endémicas y/o nativas de la zona. El mapa de la Figura 17 se realizó con un Buffer en toda la red hídrica.

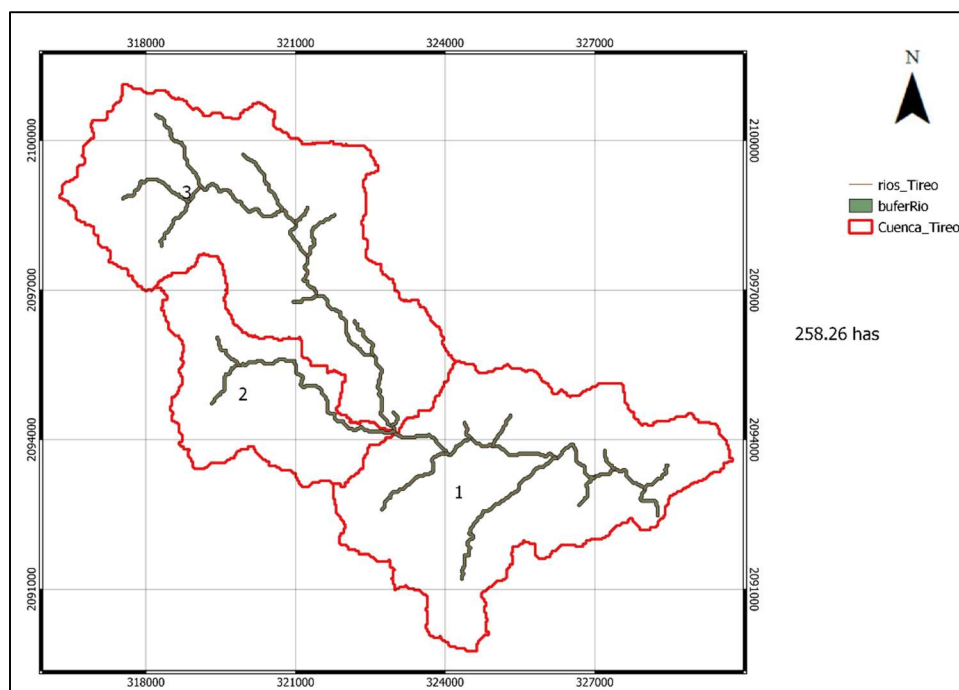


Figura 17. Buffer de 30 m

### 3.6.3 Educación y comunicación

En República Dominicana la educación en general y en temas relacionados con el medio ambiente, ha sido deficiente. En este contexto, las inversiones tanto del sector público como privado deberían ir encaminados a fomentar la conciencia ambiental y el buen uso de las tierras. Los beneficios de la capacitación y la asistencia técnica conllevan a una población más adaptada, instruida y con más iniciativa para el trabajo y la conservación de las cuencas altas.

### 3.6.4 Promover acuerdos comunitarios

Las acciones que se realicen en la cuenca, tanto para conservación de las áreas existentes como para la recuperación de las áreas más críticas, debe estar refrendada por acuerdos que se pacten con las comunidades que viven y obtienen sus medios de vida de la misma (GEF 2020).

### 3.6.5 Prácticas eficientes de conservación del suelo

Con la adopción de nuevas prácticas de conservación que mejoren la fertilidad de los suelos, se pueden disminuir los efectos negativos de la erosión; algunos ejemplos de estas prácticas son los cultivos intercalados, medidas de retención de aguas y establecimientos de terrazas (IAEA 2021). La diversificación y rotación de cultivos también preservan mejor los suelos agrícolas y permiten obtener más y mejores rendimientos al momento de la aplicación de abonos y fertilizantes, además de potenciar la materia orgánica presente en los suelos (Castilla 2013).

#### 3.6.5.1 Sedimentación

Según Polanco *et al.* (2020), existen tres acciones fundamentales para disminuir la sedimentación en una represa que están estrechamente relacionadas con la toma de decisiones de las autoridades competentes que están llamadas a reducir el impacto de este fenómeno:

#### 3.6.5.2 Reforestación

La recuperación de zonas críticas cercanas a ríos, arroyos y cañadas, así como el respeto de los 30 m de protección en ambos márgenes de los cuerpos acuíferos, se reduce significativamente la sedimentación en el embalse.

#### 3.6.5.3 Agricultura

Mejorar las malas prácticas agrícolas y adoptar buenas prácticas de la agricultura intensiva que se desarrolla en la cuenca, reducirá los efectos negativos de la sedimentación.

#### 3.6.5.4 Construcción de presa de retención de sedimentos

Consiste en la construcción de pequeños retenes de sedimentos con el objetivo de que al embalse llegue la menor cantidad posible de sedimentos.

Para el control de la sedimentación en el embalse Efthymiou *et al.* (2017), citado por García (2019) indican que con el establecimiento de la herramienta Modelo de conservación de yacimientos Rescon 2 Beta, se puede iniciar un plan para mantener la vida útil del embalse y de esta manera evitar que la represa se llene de sedimento antes de lo estipulado en el proyecto inicial de construcción (Cuadro 22).

Cuadro 22. Resumen de las alternativas de gestión de sedimentos utilizadas en RESCON 2

Práctica de manejo de sedimentos	Descripción
Sin acción	No se ha aplicado un plan de gestión de sedimentos
Gestión de cuencas hidrográficas	Reducir la entrada de sedimentos en el embalse El volumen del embalse se reduce parcialmente durante la temporada de inundaciones, lo que aumenta la velocidad del flujo
Escurrimiento	Desviación de flujos cargados de sedimentos antes de que la carga de sedimentos transportada se deposite dentro del embalse
Túnel de derivación de sedimentos	La turbidez transportada en los embalses mediante corrientes densas
Ventilación de corriente de densidad	Removilización de sedimentos depositados aumentando la velocidad del flujo en el reservorio
Enrojecimiento	La energía para la operación de dragado es suministrada por el cabezal hidrostático de la presa
Sistemas de remoción de sedimentos por hidrosucción	Elimina el sedimento bombeando el sedimento arrastrado por el agua del lecho del depósito
Dragado	La remoción de sedimento acumulado de un reservorio drenado usando equipo pesado
Camiones	

### 3.6.6 Prácticas de conservación

Las prácticas de conservación propuestas, tales como la reforestación y/o restauración natural de las zonas más vulnerables, consideran varias acciones que van a mejorar las condiciones ecológicas de la cuenca. Según Salas (2019), este proceso se logra a mediano y largo plazo, y contribuye a combatir el avance de los efectos del cambio climático y calentamiento global.

Para la recuperación de las áreas degradadas y de acuerdo a PMAA-INDRHI (2017), la delimitación de las áreas a explotar agrícola es muy acción muy positiva para las cuencas pues establecer límites claros y definidos permitirá un mejor aprovechamiento de recursos como el agua, los suelos y la cobertura vegetal. Otra recomendación propuesta por Castilla (2013), es la secuencia de cultivos que incluyan gramíneas pues mejoran el amortiguamiento de los impactos de la mecanización agrícola.

#### 4 CONCLUSIONES

- El 36% de la erosión en la cuenca es dada por la agricultura, la cual es tres veces mayor que en los bosques.
- La sedimentación actual en la presa, aunque está en los parámetros normales para el país, es alta (34 033 ton<sup>3</sup>).
- Los escenarios de cambio climático de disminución y aumento de precipitación y temperatura predicen grandes desequilibrios ambientales.
- La subcuenca clasificada como área crítica es la número 1, donde existe mayor agricultura intensiva.
- Las prácticas de manejo recomendadas son de origen antrópico, ya que la gran afectación de la cuenca no permite su recuperación en el corto plazo de manera natural.
- Los usos de suelo son los indicadores para calificar las áreas críticas.

#### 5 RECOMENDACIONES

- Se recomienda actualización de datos de caudales del río Tireo. Hay una estación meteorológica que podría ser de utilidad para tal fin, pero no tiene disponibles datos recientes para la calibración de modelos hidrológicos.
- Realización de calicatas para obtención de datos de suelos por horizontes.
- Tomar decisiones oportunas y considerando la gobernanza del país para el rescate de la cuenca.
- Dragado anual del embalse de la presa.
- Adoptar las prácticas propuestas en este trabajo de investigación.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- Abbaspour, K. 2007. "SWAT-CUP, SWAT Calibration and Uncertainty Programs". s.l., Eawag.
- Abbaspour, KC; Rouholahnejad, E; Vaghefi, S; Srinivasan, R; Yang, H; Kløve, B. 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model (en línea). *Journal of Hydrology* 524:733-752. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>.
- Ambiente (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, República Dominicana). 2011. Estrategia Nacional de Conservación y Uso Sostenible de la Biodiversidad y Plan de Acción 2011-2020 (ENBPA). 2020. Santo Domingo, República Dominicana. 112 p.
- Amblar-Francés, P; Ramos-Calzado, P; Casado-Calle, M; Pastor-Saavedra, M; Rodriguez-Camino, E. 2016. Estudio de las proyecciones regionalizadas de cambio climático para las cuencas hidrográficas de España. *In XXXIV Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española*. Teruel, España, Asociación Meteorológica Española. 10 p.
- Año Vidal, C; Peris Mendoza, M; Sánchez Díaz, J.. 2009. El estudio de la erosión hídrica en España (1980-2004). *Análisis bibliométrico. Cuaternario y Geomorfología* 23(1-2):141-151.
- Arnold, J; Moriasi, D; Gassman, P; Abbaspour, K; White, M; Srinivasan, R; Santhi, C; Harmel, R; van Griensven, A; Van Liew, M; Kannan, N; Jha, M. 2012. SWAT: model use, calibration, and validation. *ASABE* 55(4):1491-1508.
- Arroyave-Rincón, A; Blanco, JF; Taborda, A. 2012. Exportación de sedimentos desde cuencas hidrográficas de la vertiente oriental del golfo de urabá: influencias climáticas y antrópicas. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* 11(20):13-30.
- Barquero, A. 2015. Modelación hidrológica en las cuencas San Jerónimo-Piedras, Río Blanco y Tenorio usando SWAT. Tesis Ing. Agrícola. San José, Costa Rica,, Universidad de Costa Rica. 109 p.
- Becerra, G. 2018. Plan para el adecuado manejo de sedimentos, que permite incrementar la vida útil del embalse La Esmeralda. *Ingenio Magno* 9(1):71-82.
- Bergsma, E; Charman, P; Hurni, H; Moldenhauer, WC; Panichapong, S. 1996. Terminology for soil erosion and conservation. Wageningen, ITC/Enschede. 322 p.
- Bermúdez, M. 1980. Erosión hídrica en la cuenca piloto La Suiza, Costa Rica. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 31 p.
- Bocel, J. 2016. Modelación hidrológica para evaluar los niveles de erosión hídrica y producción de sedimentos en diferentes usos y coberturas de la tierra y su efecto en la calidad del agua en la subcuenca del río San Francisco, cuenca del lago de Atitlán, Guatemala. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 113 p.
- Bonilla, S. 2000. Costos defensivos derivados de la contaminación del agua rural, cuenca media río Yaque del Norte República Dominicana. Thesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 113 p.
- Cabezas, F. 2016. Análisis estructural de modelos hidrológicos y de sistemas de recursos hídricos en zonas semiáridas. Tesis doctoral. Murcia, España, Universidad de Murcia. 290 p.
- Carvajal, D. 2017. Dinámica hídrica bajo condiciones climáticas cambiantes en la subcuenca del río Tempisque, cuenca del Tempisque, Guanacaste, Costa Rica (en línea). Thesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 88 p. Disponible en <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A2242E/A2242E.PDF>.

- Castilla, F. 2013. La elegida para conservar el suelo. Una decisión agronómica que combina rotación de cultivos, fertilizantes y agricultura de precisión para aumentar la producción y preservar los recursos naturales. Adoptada en forma masiva en la Argentina, es una de las claves para evitar pérdidas del suelo por erosión. *RIA: Revista de Investigaciones Agropecuarias* 39(2):118-123.
- Cely, O. 2014. Utilización de modelos hidrológicos para la determinación de cuencas en ecosistemas de Páramo. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo* 4(2):56-65.
- Cobo, R. 2008. Los sedimentos de los embalses españoles. *Ingeniería del Agua* 15(4):231-241.
- Congreso Nacional. 2000. Ley General sobre Medio Ambiente y Recursos Naturales (en línea). Santo Domingo, República Dominicana s.e. 119. p. Disponible en <http://www.indrhi.gob.do/index.php/transparencia/item/ley-no-64-00>.
- Cuello, M. 2003. Estimación de la producción y transporte de sedimentos en la cuenca alta del río Yaque del Norte y del río Guanajuma, República Dominicana (en línea). Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 83 p.
- Davie, T. 2008. *Fundamentals of Hydrology, Second Edition* (en línea). Routledge (ed.). New York, British Library Cataloguing in Publication Data, vol.298. 221 p. Disponible en <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=x0HfA6HJvogC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Fundamentals+of+Hydrology&ots=fi3rcmkBRZ&sig=xXLEc2AGr243RS1Iqr6q66rbyFM>.
- Efthymiou, N; Palt, S; Annandale, G; Karki, P. 2017. Reservoir Conservation Model Rescon 2 Beta. Economic and Engineering Evaluation of Alternative Sediment Management Strategies (en línea). Washington, D. C., United States of America, The World Bank. Disponible en internet: [www.worldbank.org](http://www.worldbank.org).
- Engeland, K; Steinsland, I; Johansen, SS; Petersen-Øverleir, A; Kolberg, S. 2016. Effects of uncertainties in hydrological modelling. A case study of a mountainous catchment in Southern Norway (en línea). *Journal of Hydrology* 536:147-160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.036>.
- Estrada Sifontes, V; Pacheco Moya, R. 2012. Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental* 33(1):71-80.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2016. FAO en República Dominicana (en línea, sitio web). Consultado 5 may 2020. Disponible en <https://www.fao.org/republica-dominicana/noticias/detail-events/es/c/459166/>.
- Faustino, J; Jiménez, F. 2000. Manejo de cuencas hidrográficas (en línea). Turrialba, Costa Rica, CATIE. 35 p.. Disponible en [https://www.infocuenas.com/img/kcfinder/files/manejo de cuencas hidrograficas.PDF](https://www.infocuenas.com/img/kcfinder/files/manejo%20de%20cuencas%20hidrograficas.PDF).
- Fernández de Villarán, R. 2017. Utilización del programa SWAT para la estimación de la emisión de sedimentos en cuencas (en línea). *Trim* 12(2017):21-32. Disponible en [http://www5.uva.es/trim/TRIM/TRIM12\\_files/RFernandez.pdf](http://www5.uva.es/trim/TRIM/TRIM12_files/RFernandez.pdf).
- Figuerero, B. 2020. Valoración económica de la producción de agua y sedimentos en la parte alta de la cuenca del río Yaque del Norte, República Dominicana. Thesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 45 p.
- Fortuny, J; Rabbachin, A; Cano-Pons, E; Fuehrer, D; Almorox, P. 2010. A quantitative assessment of the compatibility of ultra wideband with radiolocation services. *Proceedings of the 2010 7th International Symposium on Wireless Communication Systems, ISWCS'10* :16-20. DOI:

<https://doi.org/10.1109/ISWCS.2010.5624528>.

- García-Fayos, P. 2004. Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica. In Valladares, F. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Madrid, España, EGRAF. p. 309-334.
- García, C. 2016. Academia de Ciencias. p. 1-2.
- García-González, ML; Carvajal-Escobar, Y; Jiménez-escobar, H. 2007. La gestión integrada de los recursos hídricos como estrategia de adaptación al cambio climático. Ingeniería y Competitividad 9(1):19-29. DOI: <https://doi.org/10.25100/iyc.v9i1.2492>.
- García, JC. 2019. Management of Global Reservoir Sedimentation: Evaluating RESCON 2 for Sediment Management Alternatives (en línea). Thesis MS. s.l., Brigham Young University. Disponible en <https://scholarsarchive.byu.edu/etd BYU>.
- Gaspari, F; Rodríguez Vagría, A; Senisterra, G; Delgado, MI; Besteiro, SI. 2013. Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas (en línea). La Plata, Argentina, EDULP. 191 p. Disponible en <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/27877>.
- Gaviria-Montoya, L; Soto-Córdoba, S; Pino-Gómez, M. 2016. Evaluación del saneamiento ambiental sostenible en las zonas atendidas por ASADAS en el cantón de Turrialba. Cartago, TEC. 68 p. (Serie de documentos de divulgación ambiental No DARS-006).
- GEF, P. 2020. Gestión integrada de paisajes en cuencas seleccionadas de República Dominicana (en línea). República Dominicana, s.e. 34. p. Disponible en [http://www.birdlife.org/datazone/userfiles/file/IBAs/AmCntryPDFs/Dominican\\_Republic\\_es.pdf](http://www.birdlife.org/datazone/userfiles/file/IBAs/AmCntryPDFs/Dominican_Republic_es.pdf) [http://www.grupojaragua.org.do/documents/RD\\_AICAs\\_Americas.pdf](http://www.grupojaragua.org.do/documents/RD_AICAs_Americas.pdf).
- Gitas, IZ; Douros, K; Minakou, C; Silleos, GN; Karydas, CG. 2009. Multi-temporal soil erosion risk assessment in N. Chalkidiki using a modified USLE raster model. EARSeL eProceedings 8:40-52.
- Gomariz-Castillo, F; Alonso-Sarría, F. 2018. Efecto de la subdivisión de cuencas y la estimación de variables climáticas en la simulación hidrológica con el modelo SWAT en cuencas semiáridas Mediterráneas. Papeles de Geografía 64:114-133. DOI: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.6018/geografia/2018/331531> ISSN:
- Ríos, E; Cotler Ávalos, H; González-Mora, I; Pineda, R. 2013. Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. México D. F., México, SERMARNAT.
- Gupta, HV; Kling, H; Yilmaz, KK; Martínez, GF. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling (en línea). Journal of Hydrology 377(1-2):80-91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>.
- IAEA. 2021. Control de la erosión del suelo (en línea, sitio web). Consultado 22 ago. 2021. Disponible en <https://www.iaea.org/es/temas/control-de-la-erosion-del-suelo>.
- IDIAF (Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales). 2010. Caracterización de suelos en zonas cafetaleras de la República Dominicana. Santo Domingo, Republica Dominicana. 125 p.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático). 2014. Resumen para responsables de políticas. En: Cambio climático 2014: Mitigación del cambio climático. Contribución del Grupo de trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, Reino Unido,



Cambridge University Press, . 152 p.

- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático). 2019. Informe especial sobre el océano y la criosfera en un clima cambiante (SROCC) (en línea, sitio web). Consultado 9 ago. 2021. Disponible en <https://archive.ipcc.ch/index.htm>.
- Itzel, CM. 2013. Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica en microcuenca de presa Madín, México Soil loss estimate by hydric erosion at Madin dam watershed , state of Mexico , Mexico. *Ingeniería Hidráulica Y Ambiental* XXXIV(2):3-16.
- Jiménez, O; Farias, H. 2003. Problemática de la Sedimentación del Embalse de Valdesia, República Dominicana. Primer Simposio regional sobre hidráulica de ríos (Buenos Aires, Argentina). 29 p.
- Jiménez, O; Farias, HD; Rodríguez, C. 2005. Procesos de sedimentación en embalses en ambientes tropicales. Estudios de casos en Costa Rica y República Dominicana. *Ingeniería del Agua* 12(3):16. DOI: <https://doi.org/10.4995/ia.2005.2561>.
- Jorquera, E; Weber, JF; Reyna, SM. 2012. Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada. 1º Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos (October 2014):18.
- Knoche, M; Fischer, C; Pohl, E; Krause, P; Merz, R. 2014. Combined uncertainty of hydrological model complexity and satellite-based forcing data evaluated in two data-scarce semi-arid catchments in Ethiopia (en línea). *Journal of Hydrology* 519(PB):2049-2066. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.003>.
- Leander, F; Eleutério, J; Nascimento, N. 2007. Calibração Manual E Automática De Parâmetros Hidrológicos Utilizando O Modelo Swat. :8.
- Mapama. 2005. Evapotranspiración Potencial ( Etp ) Media Anual. Madrid, España.
- Marcano, J. 2021. Zonas de Vida de República Dominicana (en línea, sitio web). Consultado 11 jun. 2021. Disponible en <https://ecohis.jmarcano.com/zonas-vida/>.
- Martínez, A; Mongil, J; del Río, J. 2003. Pequeña guía de uso del modelo MODIPÉ. s. n. t. 28 p.
- Medina, C. 2021. Modelación hidrológica bajo escenarios de cambio climático para un embalse de abastecimiento de agua en La Paz, Bolivia. *Investigacion & Desarrollo* 21(1):63-78. DOI: <https://doi.org/10.23881/idupbo.021.1-5i>.
- Medio Ambiente. 2012. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Memoria Institucional. Santo Domingo, República Dominicana.
- Melgar, M. 2004. Manejo y conservación de los recursos naturales de la cuenca alta del río Yaque del Norte «PROCARYN». Jarabacoa, República Dominicana, GITEC/SERCITEC. 124 p.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 2016. Cambio Climático : Informe de síntesis, guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC. Madrid, España 52 p.
- Ministerio de Medio Ambiente. 2016. Plan estratégico para la gestión efectiva de los recursos naturales del municipio de Constanza, provincia La Vega. Santo Domingo, República Dominicana. DOI: <https://doi.org/10.3989/arbor.2000.i653.1000>.
- Moral Ituarte, L; Hernandez-Mora, N. 2016. Nuevos debates sobre escalas en política de aguas: Estado, cuencas hidrográficas y comunidades autónomas en España. *Ciudad y territorio. Estudios territoriales* 190:563-583.
- Morales, M. 2014. Estimación de la erosión laminar y sedimentación con modelos hidrológicos para la

- selección de prácticas de conservación de suelos y cambios de cobertura en la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint-Louis Du Sud- Haití (en línea). Thesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 94 p. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1016/j.biochi.2015.03.025><http://dx.doi.org/10.1038/nature10402><http://dx.doi.org/10.1038/nature21059><http://journal.stainkudus.ac.id/index.php/equilibrium/article/view/1268/1127><http://dx.doi.org/10.1038/nrmicro2577>
- Nagle, GN. 1997. The use of cesium-137 in the study of hillslope erosion in a tropical watershed. (en línea). In Dissertation presented to the Faculty of the graduate school of Cornell University. Dissertation Information Service (ed.). Michigan, United States of America, Cornell University. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaci.2012.05.050>.
- Nash, J; Sutcliffe, J. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Journal of Hydrology 10(3):282-290. DOI: <https://doi.org/10.1080/00750770109555783>.
- NDT, M de N de la D de las T (PEM. (2017). Programa de Establecimiento de Metas de Neutralidad de la Degradación de las Tierras. Santo Domingo, Republica Dominicana, s.e.
- Neitsch, S; Arnold, J; Kiniry, J. 2005. Herramienta de evaluación de suelo y agua documentación teórica (en línea). Texas, Estados Unidos, s.e. Disponible en <http://swatmodel.tamu.edu/media/46964/swat2005-theo-doc-spanish.pdf>.
- Neitsch, SL; Arnold, JG; Kiniry, JR; Williams, JR.. 2011. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. Texas, United States of America, Texas Water Resources Institute. 618 p.. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.063>.
- Olmedo, GF; Ortega-Farías, S; de la Fuente-Sáiz, D; Fonseca-Luengo, D; Fuentes-Peñailillo, F. 2016. Water: Tools and functions to estimate actual evapotranspiration using land surface energy balance models in r. R Journal 8(2):352-370. DOI: <https://doi.org/10.32614/rj-2016-051>.
- Ordóñez, J. 2011. ¿ Qué es cuenca hidrológica ? (en línea). Sociedad Geológica de Lima 1:1-44. Disponible en [http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm\\_Files/Publicaciones/Varios/Cuenca\\_hidrologica.pdf](http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm_Files/Publicaciones/Varios/Cuenca_hidrologica.pdf).
- Ortiz, R; Chile, M. 2020. Métodos de cálculo para estimar la evapotranspiración de referencia para el Valle de Tumbaco. Siembra 7(1):070-079. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.29166/siembra.v7i1.1450>.
- OSCC (Observatorio de Salud y Cambio Climático). 2021. Nuevos escenarios de emisión:RCPs (en línea, sitio web). Consultado 9 jul. 2021. Disponible en [http://www.oscc.gob.es/es/general/salud\\_cambio\\_climatico/Nuevos\\_escenarios\\_emision\\_RCPs.htm](http://www.oscc.gob.es/es/general/salud_cambio_climatico/Nuevos_escenarios_emision_RCPs.htm).
- Palacios-Vélez, OL; Escobar-Villagrán, BS. 2016. La sustentabilidad de la agricultura de riego ante la sobreexplotación de acuíferos. Tecnología y Ciencias del Agua 7(2):5-16.
- Penman, HL. 1956. Evaporation: an introductory survey. Netherlands Journal of Agricultural Science 4(1):9-29. DOI: <https://doi.org/10.18174/njas.v4i1.17768>.
- PMAA-INDRHI (Plan de Manejo y Adecuación Ambiental- Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos). 2017. Proyecto Agricultura Resiliente y Gestión Integral de los Recursos Naturales en las Cuencas de río Yaque del Norte y Ozama-Isabela (P163260). Santo Domingo, República Dominicana. 118 p.
- Polanco , JA,; J; Ramírez-Atehortúa, FH; Montes-Gómez, LF; Botero-Hernández, BA; Otálvaro Barco, M. 2020. Effect of sediment management decision on a hydropower plant value. Revista DYNA

87(213):232-240.

- Prada, JD de; Lee, T-C; Angeli, AR; Cisneros, JM; Alberto Cantero G. 2008. Análisis multicriterio de la conservación de suelo: Aplicación a una cuenca representativa del centro argentino. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica (REVIBEC)* 9(9):45-59.
- Ríos, N. 2018. Introducción al modelo SWAT. Turrialba, Costa Rica, CATIE.
- Ritchie, JT. 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research* 8(5):1204-1213. DOI: <https://doi.org/10.1029/WR008i005p01204>.
- Rodriguez, E. 2019. Análisis de sensibilidad en producción de agua y erosión hídrica bajo escenarios de cobertura vegetal y clima en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte, República Dominicana. Thesis Mag. SC. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 102 p.
- Rodríguez, E; Picatoste, J; Heras Hernández, F. 2014. Quinto informe de evaluación del IPCC. *Tiempo y Clima* 5(43):36-40.
- Rodriguez, R. 1989. Impactos del uso de la tierra en la alteracion del regimen de caudales, la erosion y sedimentacion de la cuenca superior del río Reventazón y los efectos económicos en el proyecto hidroelectrico de Cachí. Thesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 155 p.
- Rouholahnejad, E; Abbaspour, KC; Vejdani, M; Srinivasan, R; Schulin, R; Lehmann, A. 2012. Environmental Modelling & Software A parallelization framework for calibration of hydrological models (en línea). *Environmental Modelling and Software* 31:28-36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.12.001>.
- Saborío, J. 1996. Evaluación del transporte de sedimentos en el río Pacuare, cuenca tropical húmeda en Costa Rica. Thesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 168 p.
- Salas, M. 2019. Estimación de la carga de sedimentos en la cuenca del río Pitumarca mediante el uso del modelo SWAT. Tesis Ing. Civil. Lima, Perú, Pontificia Universidad Católica del Perú. 119 p.
- Saxton, K. 2002. SPAW (en línea). Pullman, Washington, United States of America. Disponible en [http://swat.tamu.edu/media/69365/ch22\\_input\\_sol.pdf](http://swat.tamu.edu/media/69365/ch22_input_sol.pdf).
- SEA. 1985. Características de los suelos de la República Dominicana por URP y ASDS. Santo Domingo, República Dominicana.
- SEMARENA (Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Republica Dominicana). 2010) Memoria Institucional 2010 - Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales (en línea). Santo Domingo, República Dominicana. Disponible en <http://www.ambiente.gob.do/ambienterd/wp-content/uploads/2015/09/memoria-2010.pdf%5Cnhttp://www.ambiente.gob.do/ambienterd/sobre-nosotros/memorias/>.
- Sibilia, T. 1988. Análisis de la dinámica del uso de la tierra en las áreas marginales de la cuenca alta del río Nizao de la República Dominicana para definir acciones de manejo apropiado de sus recursos naturales. Thesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 240 p.
- Singh, SK; Bárdossy, A. 2012. Calibration of hydrological models on hydrologically unusual events (en línea). *Advances in Water Resources* 38:81-91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.12.006>.
- SWAT . (2021). WGNmaker4.xlsm. 3. s.l., s.e.
- Villón, M. 2005. Hidrología (en línea, sitio web). Consultado 24 jul. 2021. Disponible en

<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=-JjGDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=hidrología+maximo+villon+&ots=IiFEpQj600&sig=W73Ml0w-Kk-n6YndZAlFWskiDKc#v=onepage&q=hidrología+maximo+villon&f=false>.

- Williams, JR; Berndt, HD. 1976. Sediment Yield Prediction Based on Watershed Hydrology. Paper - American Society of Agricultural Engineers:1100-1104.
- Wischmeier, W; Smith, D. 1965. Rainfall. erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. Washington, D. C., United States of America, USDA. 48 p.
- Yaque del Norte, F. 2015. Fondoagua Yaque del Norte (sitio Web). Santiago, República Dominicana, s.e.
- Zapana, J. 2019. Incidencia de precipitación grillada en la respuesta hidrológica semidistribuida de la cuenca Huancané. Tesis Ing. Agr. Puno, Perú, Universidad Nacional del Altiplano de Puno. 112 p.

ANEXOS

Anexo 1. Datos de medición de caudales de la estación Pinalito

DATOS DE OPERACION DEL EMBALSE													ENERO 2010	
DIA	NIVELES			ENTRADA DE AGUA		VOLUMEN DE AGUA SACADA								
	MAX.	MIN.	PROM.	CAUDAL	VOLUMEN	VIERTE	C. FONDO	COMP.	TURBINA 1	TURBINA 2	TOTALES			
	M S N M	M S N M	M S N M	M <sup>3</sup> /SEG	M <sup>3</sup>				M <sup>3</sup>	M <sup>3</sup>	M <sup>3</sup>			
01	1,173.12	1,172.54	1172.86	1,172.52	1,172.70	1.29	111,513.00				85,844.00	0.00	85,844.00	
02	1,173.26	1,172.74	1173.04	1,172.70	1,173.00	1.28	111,004.00				67,673.00	0.00	67,673.00	
03	1,173.94	1,173.00	1173.49	1,173.00	1,173.94	1.62	140,334.00				0.00	0.00	0.00	
04	1,174.08	1,173.54	1173.92	1,173.94	1,173.54	1.52	131,631.00				113,801.00	78,399.00	192,200.00	
05	1,173.82	1,172.32	1173.59	1,173.54	1,173.40	1.38	119,182.00				140,083.00	0.00	140,083.00	
06	1,173.80	1,173.06	1173.52	1,173.40	1,173.06	1.38	119,625.00				163,740.00	0.00	163,740.00	
07	1,173.36	1,172.90	1173.14	1,173.06	1,172.90	1.61	139,216.00				115,947.00	0.00	115,947.00	
08	1,173.18	1,172.52	1172.93	1,172.90	1,172.52	1.97	170,149.00				115,668.00	0.00	115,668.00	
09	1,173.16	1,172.56	1172.85	1,172.50	1,172.56	1.34	115,583.00				121,266.00	0.00	121,266.00	
10	1,173.14	1,172.58	1172.58	1,172.56	1,172.84	1.35	116,719.00				76,597.00	0.00	76,597.00	
11	1,173.30	1,172.68	1173.06	1,172.84	1,172.68	1.32	114,082.00				98,347.00	38,736.00	137,083.00	
12	1,173.04	1,172.62	1172.82	1,172.68	1,172.66	1.50	129,688.00				15,126.00	117,423.00	132,549.00	
13	1,173.06	1,172.58	1172.85	1,172.66	1,172.58	1.59	137,665.00				0.00	149.08	149.08	
14	1,172.96	1,172.50	1172.78	1,172.58	1,172.50	1.65	142,959.00				0.00	154,325.00	154,325.00	
15	1,173.08	1,172.54	1172.85	1,172.50	1,172.96	1.51	130,492.00				64,132.00	339.00	64,471.00	
16	1,174.14	1,173.00	1173.52	1,172.96	1,174.14	2.05	176,934.00				0.00	0.00	0.00	
17	1,175.20	1,174.22	1174.80	1,174.14	1,174.84	2.39	206,735.00				95,713.00	0.00	95,713.00	
18	1,175.04	1,174.46	1174.83	1,174.84	1,174.46	1.75	151,492.00				199,411.00	12,385.00	212,396.00	
19	1,174.74	1,174.24	1174.48	1,174.46	1,174.32	1.52	131,045.00				122,146.00	30,956.00	153,102.00	
20	1,174.66	1,173.70	1174.28	1,174.32	1,173.70	1.48	127,856.00				106,142.00	117,049.00	223,191.00	
21	1,174.00	1,173.40	1173.77	1,173.70	1,173.40	1.46	125,789.00				170,766.00	0.00	170,766.00	
22	1,174.00	1,173.40	1173.71	1,173.40	1,173.48	1.35	116,581.00				5,905.00	98,752.00	104,657.00	
23	1,173.74	1,173.46	1173.59	1,173.48	1,173.72	1.16	100,248.00				64,172.00	0.00	64,172.00	
24	1,174.02	1,173.18	1173.70	1,173.72	1,173.18	1.29	111,069.00				102,744.00	88,857.00	191,601.00	
25	1,173.50	1,172.88	1173.25	1,173.18	1,172.88	1.22	105,011.00				2,647.00	146,111.00	148,758.00	
26	1,173.16	1,172.56	1172.90	1,172.88	1,172.60	1.23	106,575.00				146,783.00	0.00	146,783.00	
27	1,172.90	1,172.24	1172.57	1,172.60	1,172.28	1.25	107,932.00				0.00	153,151.00	153,151.00	
28	1,172.62	1,172.08	1172.37	1,172.28	1,172.08	1.28	110,259.00				138,125.00	0.00	138,125.00	
29	1,172.40	1,172.06	1172.20	1,172.08	1,172.10	1.24	107,025.00				0.00	104,252.00	104,252.00	
30	1,172.94	1,171.98	1172.25	1,172.10	1,171.98	1.19	102,642.00				119,234.00	0.00	119,234.00	
31	1,172.28	1,171.68	1171.89	1,171.98	1,171.70	1.17	100,812.00				139,109.00	0.00	139,109.00	
PVS	1,175.20	1,171.68	*****	1,172.52	1,171.70	1.46	3,917,947	0.00	0.00	0.00	*****	*****	*****	

Anexo 2. Datos climáticos obtenidos en la ONAMET

OFICINA NACIONAL DE METEOROLOGIA												
DEPARTAMENTO DE CLIMATOLOGIA - DIVISION DE PROCESAMIENTO DE DATOS												
DATOS DIARIOS PRECIPITACION (mm) 2010												
ESTACION: CONSTANZA (PROV.LA VEGA)												
LAT: 1854.0N LON: 7044.0W ALT: 1164.0M												
DIA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	4.5	0.7	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.0	0.0	0.0	0.0	28.8	6.8	0.0
3	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	5.0	11.7	1.3	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	3.3	0.0	0.0	0.0	4.3	8.6	1.1
5	0.0	0.0	14.3	0.0	0.0	16.5	0.8	0.0	0.0	0.0	24.1	0.0
6	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	18.6	19.5	6.2	0.1	0.0	17.3	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	14.5	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.5	0.0	0.0	6.3	6.8	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	11.2	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4
10	0.0	0.0	0.0	15.8	7.4	0.0	0.0	19.7	0.0	0.0	0.0	0.3
11	0.1	0.0	0.0	1.8	5.3	0.0	15.2	27.5	0.3	3.9	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	32.1	0.0	0.0	0.0	19.3	4.6	10.3	0.5	0.2
13	0.4	0.0	0.0	2.0	3.9	0.0	7.3	15.9	0.0	0.0	0.0	25.7
14	0.6	0.0	0.0	14.7	2.6	0.0	12.0	7.3	0.0	0.0	0.0	2.8
15	0.5	0.0	0.0	0.6	0.3	0.0	2.3	0.5	0.0	3.8	0.0	0.4
16	3.2	0.0	0.3	0.0	0.4	0.0	23.5	0.0	0.0	0.7	0.0	0.2
17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	4.6	3.1	47.2	0.0	0.0
18	0.0	0.0	0.0	0.0	16.0	0.0	0.8	0.0	4.7	12.6	0.0	0.0
19	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	8.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	2.3	0.0	0.0	16.7	16.7	0.0	4.3	0.0	6.5	0.0
21	0.0	25.8	0.0	0.0	6.5	2.6	1.7	0.0	7.8	0.0	6.4	0.0
22	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	20.4	0.0	0.0	0.0	0.0	10.2	0.0
23	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	1.3	8.6	0.0	0.4	0.0	2.7	0.0
24	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	4.8	0.8	0.0	25.7	1.7	2.5	0.0
25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.3	0.2	0.0	0.0
26	0.0	0.0	0.0	0.0	7.6	5.6	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0
27	0.0	0.0	3.5	0.0	0.0	6.9	0.0	0.0	0.7	7.5	0.0	0.0
28	0.0	1.5	0.0	11.6	5.6	8.5	5.5	0.0	5.3	13.9	0.0	0.0
29	0.0	-	0.0	0.0	1.0	0.0	6.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	0.0	-	0.0	0.0	6.0	4.0	0.0	0.0	0.5	2.5	0.0	0.0
31	0.0	-	0.2	-	14.5	-	1.1	7.5	-	0.1	-	0.0
TOTAL	6.4	27.3	21.4	79.3	101.5	200.9	137.5	108.6	69.3	159.4	81.6	31.1

### Anexo 3. Tabla usersoil

1	OBJECTID	MUID	SEQN	SNAM	SSID	CMPPCT	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXCL	SOL_CRK	TEXTURE	SOL_Z1	SOL_BD1	SOL_AWC1	SOL_K1	SOL_CBN1	CLAY1	SILT1	SAND1	ROCK1	SOL_ALB1	USLE_K1	SOL_EC1
2			10	ABHAJ			3	C	700	0.5	0.5	Fr-Ar	150	1.34	0.14	6.47	2.62	34	33	33	0	0.13	0.12	0
3			10	AC			5	B	900	0.5	0.5	Fr-Ar	50	1.05	0.13	91.92	11.02	10	25	65	0	0.0003	0.13	0
4			10	ATCC			3	C	400	0.5	0.5	Arc	160	1.15	0.15	14.85	4.64	34	33	33	0	0.024	0.12	0
5																								
6																								
7																								
8																								
9																								
10																								
11																								
12																								
13																								
14																								
15																								
16																								
17																								

### Anexo 4. Tabla WGEN

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
2	OBJECTID	STATION	WLATITUDE	VLONGITUDE	WELEV	RAIN_YRS	TMPMX1	TMPMX2	TMPMX3	TMPMX4	TMPMX5	TMPMX6	TMPMX7	TMPMX8	TMPMX9	TMPMX10	TMPMX11	TMPMX12	TMPMN1
3		e1wgn	18.54	-70.44	1164	11	23.39	23.93	24.47	25.86	26.27	26.72	26.58	27.15	27.30	26.47	24.44	23.12	10.60
4		e2wgn	19.13	-70.32	97	11	29.57	30.05	30.51	31.94	32.18	33.50	33.45	33.09	33.61	32.74	30.98	29.79	18.92
5																			
6																			
7																			
8																			
9																			
10																			
11																			
12																			
13																			
14																			
15																			
16																			