



“Por un Desarrollo Agrario
Integral y Sostenible”

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**Estimación de carga de sedimentos por erosión hídrica
mediante el uso del modelo SWAT en la microcuenca del río
La Carreta, San Juan de Cinco Pinos, Chinandega**

Autor:

Br. Maikol Mauricio Hernandez Vicente

Asesoras:

PhD. Ing. Martha Orozco Izaguirre

Ing. Mariann José Espinoza Acuña

Managua, Nicaragua

Febrero, 2022

HOJA DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL EXAMINADOR

Este trabajo de graduación fue evaluado y aprobado por el honorable comité designado por la decanatura de la Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente como requisito parcial para optar al título profesional de:

INGENIERO EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

Miembros del Honorable Comité evaluador:

MSc. Raquel Dolores Izabá Ruiz
Presidente

Ing. Luis Alberto Hernández
Secretario

Ing. Bayardo González Ñamendy
Vocal

DEDICATORIA

Este trabajo de graduación es una representación de esfuerzo, entrega y paciencia, lo quiero dedicar de manera muy especial a:

A Dios sobre todas las cosas, por brindarme protección, sabiduría, fuerza y ser mi guía en todo momento para que yo pueda alcanzar mi meta y poder cumplir uno de mis sueños.

A mi madre, Rebeca Vicente Panting, por ser una mujer admirable y luchadora que, a pesar de dificultades personales y económicas, siempre estuvo ahí brindándome su amor, sacrificio, apoyo económico y moral, lo cual, hizo posible para poder culminar mi estudio universitario.

A mis abuelos, Ingracias Panting Wilson y Ponciano Vicente Asthin, por su apoyo moral e incondicional y estar siempre pendiente de mi bienestar en todo momento de mi vida.

AGRADECIMIENTO

De manera muy especial quiero agradecer a:

A aquellos docentes contribuyeron en mi formación profesional, por brindarme su conocimiento y motivación para mi superación personal.

A mis asesores, PhD. Ing. Martha Orozco Izaguirre e Ing. Mariann José Espinoza Acuña, por su paciencia, disposición en atenderme en las dudas que surgieron en la etapa metodológica y seguimiento constantes en el desarrollo de esta investigación.

Al Ing. Bayardo Alberto González Ñamendy e Ing. Sleydi Carolina López Moncada, cuyo apoyo fue esencial en la recopilación de datos.

A mis compañeros y colegas, por su apoyo en los cinco años en el que fomentaron conocimiento, solidaridad, trabajo en equipos y una buena amistad.

Los docentes, Ing. Cesar Aguirre e Ing. Eddy Maradiaga, por aclararme en algunas dudas relacionadas a la reclasificación de los tipos de suelo.

A mi madrina, Rosa Bob, por sus consejos y apoyo en todo momento.

A mis tías, Elizabeth Vicente, Ojilve Vicente, Omaira Panting, Dora Panting, por su apoyo incondicional durante los cinco años de estudio.

A mis hermanos (as), Esteban Vicente, Henry Vicente, Danixa Vicente, Franco Vicente, y Wisley Vicente, a mi prima: Rosy Barahona y Raíza Vicente, por formar parte de mi vida y motivarme a ser mejor cada día.

Y finalmente, agradezco a todos aquellos que de manera directa e indirecta me brindaron su apoyo moral y espiritual en la realización del trabajo investigativo.

INDICE DE CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	OBJETIVOS.....	3
2.1.	Objetivo general	3
2.2.	Objetivo específico	3
III.	MARCO DE REFERENCIA.....	4
3.1.	Modelo hidrológico: SWAT (Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua).....	4
3.2.	Antecedentes.....	5
IV.	MATERIALES Y MÉTODOS	8
4.1.	Descripción del área de estudio	8
4.1.1.	Localización	8
4.1.2.	Características biofísicas	8
4.2.	Metodología.....	10
4.2.1.	Modelo hidrológico SWAT.....	10
4.2.2.	Escenarios Climáticos	11
4.2.3.	Insumos requeridos por SWAT	13
4.3.	Proceso Metodológico.....	14
4.3.1.	Etapa I: Caracterización morfométrica	14
4.3.2.	Etapa II: Identificación de las unidades de respuesta hidrológica.....	15
4.3.3.	Etapa III: Proponer alternativas de uso de tierra	20
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	23
5.1.	Descripción morfométrica de la microcuenca	23
5.1.1.	Parámetros de forma	23
5.1.2.	Parámetros de relieve.....	24

5.1.3.	Parámetros de drenaje	24
5.2.	Balance hídrico	25
5.2.1.	Escenario histórico.....	25
5.2.2.	Escenario futuro pesimista (RCP 8.5).....	26
5.3.	Descripción biofísica de la microcuenca.....	29
5.3.1.	Reclasificación de la información utilizada	29
5.3.2.	Unidades de respuesta hidrológica	35
5.4.	Comportamiento del escurrimiento superficial	40
5.4.1.	Escenario histórico.....	40
5.4.2.	Escenario futuro pesimista (RCP 8.5).....	42
5.5.	Comportamiento de la producción de sedimento.	45
5.5.1.	Escenario histórico.....	45
5.5.2.	Escenario futuro pesimista (RCP 8.5).....	46
5.6.	Propuesta de manejo para disminuir la erosión hídrica	48
5.6.1.	Sistemas agroforestales	48
5.6.2.	Sistemas silvopastoriles	49
5.6.3.	Obras de conservación de suelo y agua	51
5.6.4.	Educación ambiental.....	54
VI.	CONCLUSIONES	55
VII.	LITERATURA CITADA	56
VIII.	ANEXOS	61

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Sendas representativas de concentración (RCP) según el informe del IPCC. ...	12
Cuadro 2. Distribución de las categorías de uso de la tierra en la microcuenca del río La Carreta. Fuente: González y López (2020)	15
Cuadro 3. Distribución de los subgrupos de suelos según USDA en la microcuenca del río La Carreta. Fuente: González y López (2020)	17
Cuadro 4. Información de las estaciones meteorológicas cercanas a la microcuenca del río La Carreta.	18
Cuadro 5. Base de datos y modelos climáticos utilizados para recopilar las variables climáticas.	18
Cuadro 6. Clases de pendientes según (FAO, 2009)	20
Cuadro 7. Clasificación de degradación por erosión hídrica	21
Cuadro 8. Información de la ubicación de los puntos de monitoreo de caudales en la red de drenaje de la microcuenca del río La Carreta.	22
Cuadro 9. Resumen de los parámetros morfométricos de la microcuenca del río La Carreta.	23
Cuadro 10. Resumen de la red de drenaje de la microcuenca del río La Carreta.	24
Cuadro 11. Reclasificación de las categorías de uso de la microcuenca del río La Carreta, según SWAT.....	29
Cuadro 12. Distribución del uso de la tierra de la microcuenca del río La Carreta, según la clasificación de SWAT.	31
Cuadro 13. Comparación de los subgrupos de suelo de la microcuenca del río La Carreta identificados por González y López (2020) con la Clasificación Mundial de suelos de la FAO-UNESCO.	32
Cuadro 14. Clases de pendiente en la microcuenca del río La Carreta	35
Cuadro 15. Comportamiento del escurrimiento superficial en mm por año en la microcuenca del río La Carreta, para el escenario histórico y futuro.	40
Cuadro 16. Carga de sedimentos en las subunidades hidrográficas de la microcuenca del río La Carreta para el escenario histórico y futuro.	45

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Línea de tiempo de los modelos hidrológicos antecesores de SWAT según Uribe (2010)	4
Figura 2. Información base para la aplicación del modelo SWAT. Fuente: Tapasco et al., 2015...	13
Figura 3. Mapa de uso del suelo de la microcuenca del río La Carreta. Fuente: González y López (2020).....	16
Figura 4. Mapa de subgrupos taxonómicos de la microcuenca del río La Carreta. Fuente: González y López (2020).....	17
Figura 5. Curva hipsométrica de la microcuenca La Carreta	24
Figura 6. Balance hídrico para el escenario climático histórico (1990-2019) de la microcuenca del río La Carreta.....	25
Figura 7. Balance hídrico para el escenario climático pesimista RCP 8.5 (2040-2069) de la microcuenca del río La Carreta.....	26
Figura 8. Temperaturas máximas, mínimas y medias del escenario histórico y el escenario pesimista en la microcuenca del río La Carreta	28
Figura 9. Mapa de clasificación del uso de la tierra de la microcuenca del río La Carreta, 2018. ..	30
Figura 10. Mapa de agrupación de subgrupos de suelo según USDA, de la microcuenca del río La Carreta, 2018.	33
Figura 11. Mapa de distribución de las clases de pendientes en la microcuenca del río La Carreta	34
Figura 12. Distribución de superficie ocupada según Unidades de respuestas hidrológicas de la microcuenca del río La Carreta.....	35
Figura 13. Mapa de las Unidades de respuestas hidrológicas (HRU) de la microcuenca del río La Carreta.	37
Figura 14. Mapa de Unidades de respuesta hidrológica dominante de la microcuenca del río La Carreta.	39
Figura 15. Mapa del escurrimiento superficial anual por subunidad hidrográfica para el periodo histórico y futuro (RCP 8.5) en la microcuenca del río La Carreta	43
Figura 16. Escurrimiento superficial del periodo histórico vs escenario futuro pesimista (RCP 8.5)	44
Figura 17. Mapa de carga de sedimentos de la microcuenca del río La Carreta con el escenario histórico y pesimista	47

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Balance hídrico de la microcuenca del río La Carreta (escenario histórico).....	61
Anexo 2. Balance hídrico de la microcuenca del río La Carreta (escenario histórico).....	61
Anexo 3. Resumen de la superficie ocupada por tipo de uso de la tierra, suelo y pendiente en la microcuenca del río La Carreta.....	61

RESUMEN

Esta investigación se realizó en la microcuenca La Carreta, localizada en San Juan de Cinco Pinos, Chinandega, con el objetivo de estimar el escurrimiento superficial y la generación de sedimentos por erosión hídrica, mediante el análisis de simulaciones de escenarios climáticos usando el modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) a fin de contribuir al desarrollo de estrategias y orientar la toma de decisiones en el manejo integral de la microcuenca. El proceso metodológico consistió en recopilar información sobre el relieve, propiedades fisicoquímicas de los suelos, variables climáticas y de uso de la tierra de la microcuenca; luego, organizarla y reestructurarla acorde a la clasificación de SWAT y; por último, modelar y analizar los resultados. Para ello se evaluó el escurrimiento superficial y la sedimentación en dos periodos, uno considerando los registros climáticos históricos (1990-2019) y otro bajo escenario pesimista “RCP 8.5” para un clima a futuro (2040-2069). La microcuenca se subdividió en 16 subunidades hidrográficas de menor dimensión, y se identificaron 99 Unidades de Respuesta Hidrológica. Las subunidades que presentan dominancia de suelos alfisoles, pendientes moderadamente escarpadas a muy escarpadas (mayores de 15%) y usos de la tierra agropecuarios, son los que reflejan los valores más altos en cuanto escurrimiento superficial y cargas de sedimentos para los escenarios con registros de clima histórico y futuro. Se concluye que debido a las características que presentan estas subunidades deben ser priorizadas en la gestión integral de la microcuenca que incluya propuestas de protección y restauración de los recursos naturales para favorecer la infiltración del agua y reducir la pérdida de suelo por erosión hídrica.

ABSTRACT

This research was carried out in the La Carreta watershed, located in San Juan de Cinco Pinos, Chinandega, with the objective of estimating surface runoff and the generation of sediments due to water erosion, through the analysis of climate scenario simulations using the hydrological model Soil and Water Assessment Tool (SWAT) in order to contribute to the development of strategies to guide the taking decision-making in the integral management of the watershed. The methodological process consisted of collecting information on the topographic relief, properties of the soils, climatic variables and land use of the watershed; then, organize and restructure it according to the SWAT classification and finally, model and analyze the results obtained. For this, Surface runoff sedimentation and was evaluated in two periods, one considering the historical climatic records (1990-2019) and a pessimistic scenario "RCP 8.5" for a future climate (2040-2069). The watershed was subdivided into 16 smaller hydrographic subunits, and 99 Hydrological Response Units were identified. The subunits that present dominance of alfisol soils, moderately steep to very steep slopes (greater than 15%) and agricultural land uses, are those that reflect the highest values in terms of surface runoff and sediment loads for the scenarios with records of historical and future climate. It is concluded that due to the biophysical characteristics that these subunits present, they should be prioritized in the integral management of the watershed that includes proposals for the protection and restoration of natural resources to stimulate water infiltration and reduce soil loss due to water erosion.

I. INTRODUCCIÓN

En Nicaragua, la erosión hídrica es percibida todos los años durante la estación de invierno, con las lluvias tropicales de alta intensidad y de corta duración que produce grandes volúmenes de agua que corre sobre la superficie del suelo en forma de escurrimiento de las partes altas hacia las partes bajas de la pendiente llevando materiales en suspensión aguas abajo. (Herrera Castro y Herrera López, 2009).

(Martínez, 2020) afirma que, Chinandega es una de las zonas en que el recurso suelo presenta excelentes aptitudes para las actividades agrícolas, pero también es una de las que se ha visto más afectadas por los cambios de usos de suelos y contaminación, lo que ha generado que, en las últimas décadas, más de 50 ríos se hayan secado. Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales (MARENA; 2000) expresa que, la agricultura es la principal actividad económica del municipio San Juan de Cinco Pinos.

Según González y López (2020), los problemas como la deforestación o sustitución de bosques por usos intensivos del suelo como ganadería intensiva y cultivos en zonas con pendiente muy escarpada, tendrán efectos negativos para las zonas de recarga a nivel de municipio y por ende, en las microcuencas que lo conforman.

Para afrontar el problema de la degradación del suelo es necesario planificar la sustentabilidad de los recursos naturales básicos de la cuenca (agua, suelo y vegetación), y con ello mejorar el comportamiento hidrológico. (Salgado y Güitron de los Reyes, 2018)

Una alternativa de bajo costo y precisión razonable para estimar la producción de sedimentos son los modelos de simulación de tipo hidrológico. Un modelo hidrológico es una representación simplificada de un sistema real complejo llamado prototipo, bajo forma física o matemática. La simulación hidrológica pretende reproducir con la ayuda de un computador, todos los procesos físicos que conforman el ciclo hidrológico en una cuenca hidrográfica, utilizando un modelo matemático que los represente adecuadamente.

Uno de los modelos hidrológicos para pronosticar el impacto de un uso de suelo es SWAT (Soil and Water Assessment Tool). SWAT se basa en un balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca. Para el modelamiento, la cuenca hidrográfica se divide en pequeñas subcuencas con el fin de mejorar la exactitud de los cálculos. (Ríos, Ibrahim, Faustino, y FONANIFO, 2019, pág. 3)

Conociendo la acelerada degradación de los suelos, se deriva el interés de realizar el estudio en la microcuenca del río La Carreta ubicado en San Juan de Cinco Pinos, Municipio de Chinandega, el cual tiene como objetivo estimar las cargas de sedimentos generado por erosión hídrica mediante la aplicación del modelo SWAT, para aportar informaciones básicas en los planes de manejo de cuencas y por ende, que contribuya en la conservación de suelo y agua.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Estimar la carga de sedimentos generado por erosión hídrica mediante simulaciones de escenarios climáticos, usando el modelo hidrológico SWAT, que contribuya en la toma de decisiones para la gestión integral de la microcuenca del río La Carreta, San Juan de Cinco Pinos, Chinandega.

2.2. Objetivo específico

1. Determinar el comportamiento hidrológico de la microcuenca mediante su caracterización morfométrica.
2. Identificar las unidades de respuesta hidrológica que mayor influencia tienen en el aporte de carga de sedimentos y en el escurrimiento superficial.
3. Proponer alternativas de uso de la tierra mejorado a fin de disminuir la carga de sedimentos, que contribuya a la resiliencia del recurso hídrico y hacer frente al cambio climático

III. MARCO DE REFERENCIA

3.1. Modelo hidrológico: SWAT (Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua)

Un modelo se define como la representación de una parte de un sistema que conceptualiza las interacciones y respuestas de las condiciones reales, y que es capaz de hacer pronósticos bajo un conjunto de condiciones propuestas. En el ámbito de la modelación hidrológica, los modelos son representaciones de los fenómenos hidrológicos que se presenta en el ciclo del agua, estos son aproximaciones de la realidad u en consecuento, la salida de un sistema real puede determinarse con cierto grado de confianza (Urrutia Rivas, 2016).

Uribe (2010, pág. 4) expresa que, SWAT es un modelo hidrológico que integra características de varios modelos del Servicio Agrícola de Investigación (por sus siglas en inglés, ARS) y es una secuencia directa del modelo SWRRB1 (Simulador para Recursos de Agua en Cuencas Hidrográficas Rurales). Los modelos específicos que contribuyeron en el desarrollo de SWAT fueron:

- ❖ CREAMS2 (Sustancias Químicas, Escorrentías, y la Erosión de Sistemas de Gestión Agrícola) (Knisel, 1980)
- ❖ GLEAMS3 (Efectos de la carga de Agua Subterránea en Sistemas de Gestión Agrícola) (Leonard, Knisel, & Still, 1987)
- ❖ EPIC4 (Calculadora del Impacto de la Erosión-Productividad) (Williams, Jones, & Dyke, 1984)

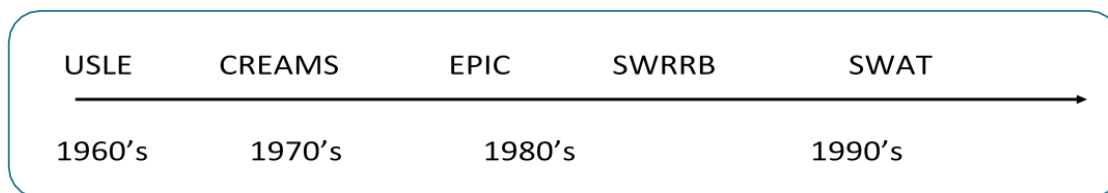


Figura 1. Línea de tiempo de los modelos hidrológicos antecesores de SWAT según Uribe (2010)

SWAT fue creado a principios de los años noventa por el Dr. Jeff Arnold, ha experimentado revisiones y expansiones continuas de sus capacidades, actualmente, el modelo ha sido desarrollado en Windows (Visual Basic), GRASS, ArcView y ArcGIS, ha experimentado una validación extensión de aplicaciones e implementaciones de modelos a nivel mundial.

Debido a las facilidades que nos brinda el modelo SWAT para el cálculo de diversas variables en cuencas, es que ha sido utilizado en varios países del mundo. Usualmente se modela con un enfoque en específico, ya sea el cálculo de sedimentos, pesticidas o minerales, o desde el punto de vista hidrológico de cálculo de caudales en alguna cuenca. (Barquero Ureña, 2015, pág. 11).

3.2. Antecedentes

Espinoza (2017) en su investigación titulada “Impacto del Cambio Climático en el comportamiento hidrológico de las cuencas hidrográficas, aplicando el modelo SWAT en Nicaragua” estimó el escurrimiento superficial y la carga de sedimentos de las cuencas hidrográficas de Nicaragua mediante el modelo hidrológico SWAT, con el objetivo de generar información del estado de dichos recursos para el diseño de Planes de Manejo Integrado de Cuencas.

El análisis se efectuó en tres momentos, utilizando el uso de la tierra del año 2015 en los períodos 1988-2017; y 2040-2069 (año 2050) con el escenario climático pesimista (RCP 8.5); y una proyección de uso de la tierra del año 2015 en donde se propuso los Sistemas Agroforestales en áreas con pasturas y cultivo anual en pendientes mayores del 15%.

Sus principales resultados reflejan que del año 2015 al 2050 se proyecta una tendencia de aumento de los escurrimientos superficiales y de las cargas de sedimentos, estimándose un incremento medio de 121.61 mm y 32.41 ton/ha, respectivamente, evidenciándose que los mayores incrementos se presentaran las unidades hidrográficas que se encuentra en el corredor seco.

Según los resultados de este estudio, la microcuenca del río La Carreta se encuentra dentro de la unidad hidrográfica 953376, correspondiente a la cuenca del Pacífico. Para esta se estima que el escurrimiento y cargas de sedimentos en el 2015 fueron de 404.37 mm y 43.26 ton/ha, y que se espera que para el 2050 bajo escenario pesimista, aumenten a 606.64mm y 74.76 ton/ha, respectivamente.

Gutiérrez (2004), en su estudio titulado “Simulación de la escorrentía y producción de sedimentos aplicando SWAT en las Microcuenca 7 y 13, Subcuenca III, cuenca sur del lago de Managua, Nicaragua”, estimó la escorrentía y la producción de sedimentos a partir del modelo SWAT. Los escenarios aplicados se basan en el uso actual y potencial del suelo de la microcuenca siete y 13 de la subcuenca III de la cuenca sur del lago de Managua, Nicaragua. La precipitación, escorrentía y la producción de sedimento fue simulada para 10 años a partir del 2003 hasta el 2012 por cada tipo de uso del suelo de las microcuencas.

Los principales resultados muestran que con el uso actual que tienen las microcuencas es donde se dan los mayores valores en términos de carga de sedimentos (51.47 ton/ha como promedio) y escorrentía superficial (5.69% de incremento medio), sobrepasando los valores respecto al uso potencial.

González y López (2020) en su investigación titulada “Caracterización de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca del río La Carreta, municipio de Cinco Pinos, Chinandega” caracterizaron las zonas potenciales de recarga hídrica con la finalidad de generar información que permita la priorización de acciones relacionadas con el manejo y conservación de los recursos naturales de la microcuenca.

Para delimitar las zonas potenciales de recarga hídrica, se evaluó cinco elementos: pendiente, tipo de suelo, tipo de roca, cobertura vegetal permanente y uso actual del suelo. La información cartográfica de suelo y uso actual fue actualizada con datos recolectados en campo.

Se determinó que predominan las zonas con bajo potencial de recarga con un 37.93 % respecto al área total las que se caracterizan por tener usos agropecuarios y suelos con textura franco arcillosas a franco arenosas; luego, las áreas con potencial moderado (36.85%) y en menor porcentaje las zonas con potencial de recarga muy alto (1 %).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Descripción del área de estudio

4.1.1. Localización

La microcuenca del río La Carreta, se encuentra ubicada en la Región Pacífico de Nicaragua, específicamente en el municipio de San Juan de Cinco Pinos, situado al pie de la cordillera La Botija. Es uno de los municipios más pequeños del departamento de Chinandega. Según el Instituto Nacional de Información de Desarrollo (INIDE) (2008) la población es de 6,781 habitantes, donde 1,192 viven en la zona urbana y 5,589 viven en la zona rural con una densidad poblacional 113 habitantes/km².

Según Ulloa, Mendoza y Jirón (1997) se localiza fisiográficamente en la provincia tierras altas del interior y sub-provincia pie de monte del Oeste. Presenta formaciones del período terciario con elevaciones entre 220 a 1230 msnm, pendientes mayores del 30%, constituidas por cerros y cuevas, conformando un relieve fuertemente escarpado a precipicio.

González y López (2020, pág. 3) afirman que presenta una extensión aproximadamente de 30.66 km² y geográficamente se encuentra localizada entre las coordenadas 13° 9' 11'' y 13° 13' 52'' de latitud Norte, 86° 49' 34'' y 86° 52' 44'' de longitud Oeste. Dentro de esta se encuentran las comunidades de El Zacatón, Los Zanjones, Villa Camilo Ortega, El Carrizal, Las Tablas, La Montaña, El Espino, Las Pozas, Los Pavones, El Guácimo, El Júcaro, Las Lajitas, El Papalón, La Cabrera y La Carreta.

4.1.2. Características biofísicas

Clima

Según la clasificación de Köppen como se citó en González y López (2020, pág. 3) aseguran que, el área en estudio pertenece al tipo de clima sub-húmedo bimodal. La estación lluviosa se presenta en el período entre los meses de mayo a octubre; esta etapa es afectada por un período seco llamado canícula, que se extiende del 15 de julio al 15 de agosto. (CIMADE, 1994) Tiene una temperatura promedio de 28 °C y precipitaciones anuales de 800 a 1000 mm.

Suelo

Según González y López (2020) existen cuatro órdenes de suelo y estos a su vez se clasifican en seis subgrupos taxonómicos, con mayor proporción se encuentran los suelos Entisoles (Lithic Ustorthents y Typic Ustorthents), distribuidos en la microcuenca de forma predominante, ocupando el 53.66 % del área total, luego los Vertisoles (Typic Haplusterts y Lithic Haplusterts) que se encuentran en las zonas con pendientes más suave y ocupando el 24.94 % del área total, en tercer lugar los suelos Alfisoles (Typic Haplustalfs) que son suelos con desarrollo más notable y ocupando el 20.40% del área total, los suelos Inceptisoles (Lithic Haplustepts) siendo los que se encuentran en menor proporción y ocupando el 0.99% respecto al área total.

Uso de la tierra

El municipio está ubicado una zona con extensas áreas de topografía accidentada con restos de bosques de pino y con pequeños valles de aptitud agropecuaria. Predominan los suelos de vocación forestal, muy pedregosos de topografía accidentada, 30 a 50% de pendiente, de alta fragilidad y baja capacidad productiva; intervenidos por una alta población rural que desarrolla prácticas agrícolas y pecuarias como única alternativa de subsistencia, causando un deterioro acelerado del bosque y del suelo. Por causa de la explotación irracional de la fauna silvestre, ésta se ha visto reducida hasta casi su total extinción.

En la microcuenca se identificaron diferentes usos de tierra a partir de la investigación realizado por González y López (2020). De acuerdo con el estudio se encontró nueve tipos de uso de tierra, aproximadamente un 34.44% a agropecuario, 30.10% pertenece a bosque latifoliado abierto, 16.39% a pasto con árboles dispersos, 6.64% a tacotales, 4.98% a árboles dispersos con pastos, 4.03% a bosque de galería, 2.45% a vegetación arbustiva, 0.94% a zona urbana y un 0.03% a área sin vegetación.

4.2. Metodología

4.2.1. Modelo hidrológico SWAT

La Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua (por sus siglas en inglés, SWAT: Soil & Water Assessment Tool); fue desarrollado por el Dr. Jeff Arnold para el Servicio Agrícola de Investigación (ARS). Diseñado para predecir el impacto del manejo del suelo y la vegetación, la producción de sedimento y las prácticas agrícolas en cuencas hidrográficas.

La base conceptual del modelo para indicar lo que pasa en la cuenca es predecir el comportamiento del ciclo hidrológico. SWAT puede predecir los efectos que tienen las distintas decisiones de manejo en la calidad del agua, sedimentos, nutrientes y cargas de pesticidas en cuencas sin monitoreo y considera complejos constituyentes de la calidad del agua. Ríos, Ibrahim, Faustino, y FONANIFO (2019, pág. 3) “Al ser el modelo SWAT un modelo determinístico, realiza su simulación por medio de relaciones matemáticas, las cuales se resumen en una ecuación del equilibrio de agua, la cual es:” (Barquero Ureña, 2015, pág. 14).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Donde:

SW_t : es el contenido final de agua en el suelo (mm)

SW_0 : es el contenido de agua inicial en el día i (mm) en el tiempo t (día);

R_{day} : es la cantidad de precipitación en el día i (mm);

Q_{surf} : es la escorrentía superficial en el día i (mm);

E_a : es la evapotranspiración en el día i (mm);

W_{seep} : es la cantidad de agua que entra en la zona no saturada del perfil en el suelo en el día i (mm);

Q_{gw} : es la cantidad de flujo de retorno en el día i (mm)

Esta es la ecuación general del balance hídrico que SWAT utiliza. Debido a la complejidad del modelo, esta demanda una amplia gama de datos de entrada, como información sobre clima (radiación, temperatura, precipitación, humedad relativa y velocidad del viento), propiedades del suelo, vegetación y prácticas de manejo del suelo de la zona en estudio.

Erosión

William (1975) afirma que, “El modelo estima la producción de erosión y sedimento para cada URH: (Unidad de Respuesta Hidrológica)” por esto, (Uribe, 2010, pág. 15) utiliza la “ecuación modificada de pérdida universal de suelo (MUSLE) para simular la producción de erosión y sedimento”

$$SED = 11.8 * (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0.56} K_{usle} \cdot C_{usle} \cdot P_{usle} \cdot LS_{usle} \cdot CFRG$$

SED: Producción sedimentos en un día dado (Toneladas metricas)

Q_{surf} : Volumen de superficie de escorrentía

q_{peak} : escorrentía máxima

$area_{hru}$: área de HRU

K_{usle} : factor de erodabilidad del suelo

C_{usle} : factor de cobertura y gestión de USLE

P_{usle} : factor de prácticas de conservación de USLE

LS_{usle} : factor topográfico

CFRG: Factor fragmento macro

4.2.2. Escenarios Climáticos

Para la estimación del escurrimiento superficial y carga de sedimentos, se realizó una recopilación de información climática proveniente de base de datos globales, tales como Climate Engine y MarkSim; También, se utilizó datos climáticos de estaciones meteorológicas locales Davis a través de la base de datos WeatherLink.

Las Sendas Representativas de Concentración (Representative Concentration Pathways: RCP) se identifican por su Forzamiento Radiativo (FR) total para el año 2100 que varía desde 2,6 a 8,5 W/m² (Ver cuadro 1). Cada RCP tiene asociada una base de datos de alta resolución espacial de emisiones de sustancias contaminantes y concentraciones de gases de efecto invernadero y de usos de suelo hasta el año 2100, basada en una combinación de modelos de distinta complejidad de la química atmosférica y del ciclo del carbono (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2015).

Cuadro 1. Sendas representativas de concentración (RCP) según el informe del IPCC.

	FR (W/m²)	Tendencia del FR	[CO₂ ppm] en 2100
RCP 2,6	2,6	Decreciente en 2100	421
RCP 4,5	4,5	Estable en 2100	538
RCP 6,0	6,0	Creciente	670
RCP 8,5	8,5	Creciente	936

FR: Forzamiento Radiativo; RCP: Senda Representativa de Concentración

Fuente: (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2015, p 10)

Se contrastó el escenario climático actual con uno futuro, siendo utilizado el RCP 8.5 categorizado como el escenario pesimista. Para cada momento analizado se asignó un período de 30 años, estos períodos se designaron de la siguiente manera:

- Período 1, año 2019 (1 de enero del 1990 hasta 31 diciembre del 2019)
- Período 2, año 2050 (1 de enero del 2040 hasta 31 de diciembre del 2069)

4.2.3. Insumos requeridos por SWAT

En la figura 2 se puede observar que, para realizar la modelación, fue necesario contar con información cartográfica e hidroclimática, las cuales se mencionan a continuación.

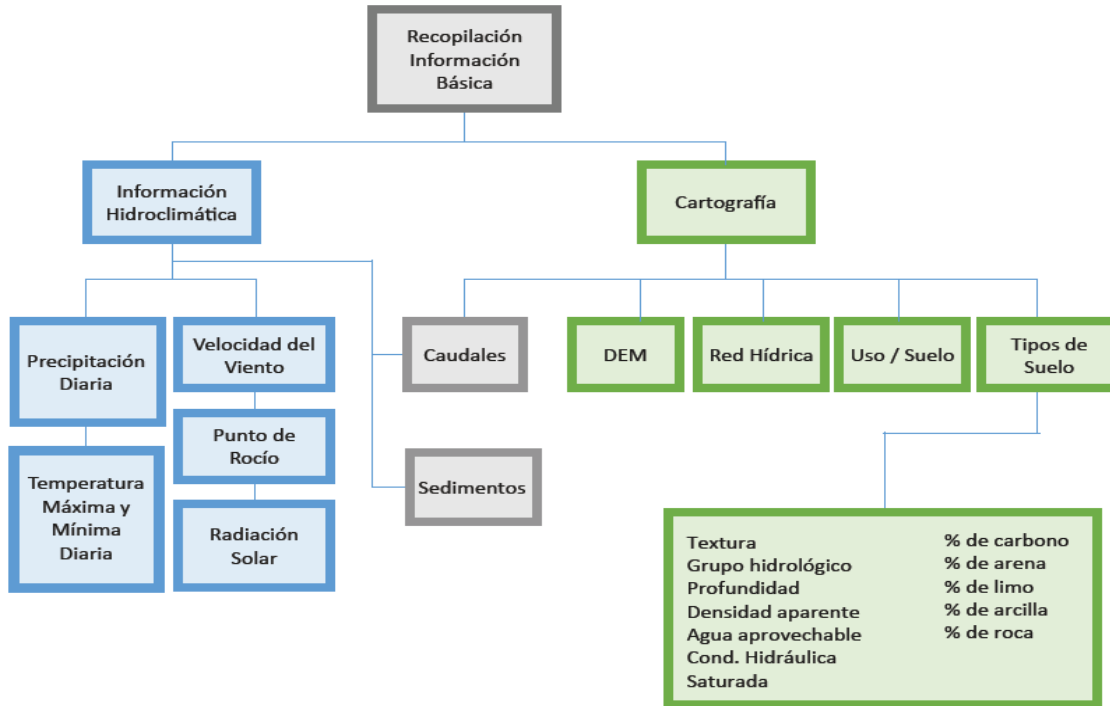


Figura 2. Información base para la aplicación del modelo SWAT. Fuente: Tapasco et al., 2015

4.3. Proceso Metodológico

Para llevar a cabo la simulación hidrológica y mejorar la resiliencia, se utilizó el proceso metodológico, el cual consiste en tres etapas:

- Etapa de caracterización morfométrica,
- Etapa de identificación de las unidades de respuesta hidrológica y
- Etapa de proponer alternativas de uso de tierra.

4.3.1. Etapa I: Caracterización morfométrica

En esta primera etapa se caracterizó la morfología de la microcuenca por esto, fue necesario contar con la información cartográfica como es el modelo digital de elevación, por el cual, se obtuvo de la siguiente manera:

Información cartográfica

a. Modelo de Elevación Digital (DEM)

El modelo requiere el relieve representado en un modelo de elevación digital (por sus siglas en inglés, DEM). El DEM utilizado fue: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), Global Digital Elevation Model Version 2, generado por Ministerio de Economía, Comercio e Industria (por sus siglas en inglés, METI) y la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (por sus siglas en inglés, NASA). (NASA, METI, 2019).

b. Proyección

Esta información consiste en una base de datos de elevación topográfica estereoscópica de la tierra, de un sistema de radar, cuya resolución espacial es 30 x 30 m. El DEM fue re proyectado al sistema de coordenadas planas para Nicaragua WGS 84 UTM, Zona 16 Norte.

Red hídrica

A partir del modelo de elevación digital ASTER se delimita la red de drenaje de la microcuenca. El modelo SWAT calcula la dirección de flujo, la cual, está determinada por la dirección con pendiente descendente de cada celda o pixel, y la acumulación del flujo, que expresa para cada pixel un valor de acumulación de peso proveniente de todos los pixeles aledaños que fluyen hacia ella, con el propósito de definir el curso de las corrientes.

El paso inicial para poder realizar la simulación es determinar los límites de la microcuenca, las subunidades y su respectiva red de drenaje. Al final, el modelo genera un reporte sobre la información topográfica para poder identificar los parámetros morfométricos de la microcuenca.

4.3.2. Etapa II: Identificación de las unidades de respuesta hidrológica

Esta etapa se realizó en dos procesos: siendo la primera, la recopilación de las informaciones necesarias, la segunda consistió reclasificación y reestructuración de la información, por el cual dichos procesos fueron necesarios para determinar las URH, los cuales, se describe a continuación:

Recopilación de información

Este proceso requiere informaciones cartográficas para poder realizar las posibles combinaciones de áreas homogéneas de uso de la tierra y características del suelo, lo cual, se describe a continuación:

a. Uso de la tierra

González y López (2020) describen que, la determinación del uso de tierra se realizó en dos maneras, la primera se empleó el software Google Earth Pro (versión 7.3.2.5491) y se realizó por medio de la delimitación de polígonos según los usos por un proceso de fotointerpretación visual. Esto permitió elaborar un mapa preliminar de usos de la tierra. La segunda consiste en observaciones realizadas en el campo esto con el fin de elaborar un mapa definitivo. (Figura 3) Siendo el uso dominante el agropecuario, seguido de los bosques latifoliados abiertos (Ver Cuadro 2)

Cuadro 2. Distribución de las categorías de uso de la tierra en la microcuenca del río La Carreta.

Fuente: González y López (2020)

Categoría de uso		Área	
Año 2018		Km ²	%
Vegetación boscosa	Bosque Latifoliado Abierto	9.43	30.10
	Bosque de Galería	1.26	4.03
Vegetación arbustiva, matorrales, malezas y Tacotales	Tacotales	2.08	6.64
	Vegetación arbustiva	0.77	2.45
	Árboles dispersos con pastos	5.14	16.39
Vegetación de ciclo corto	Agropecuario	10.79	34.44
Vegetación de ciclo largo	Pasto con árboles dispersos	1.56	4.98
Otros usos	Área sin vegetación	0.01	0.03
Áreas humanizadas	Zona urbana	0.29	0.94

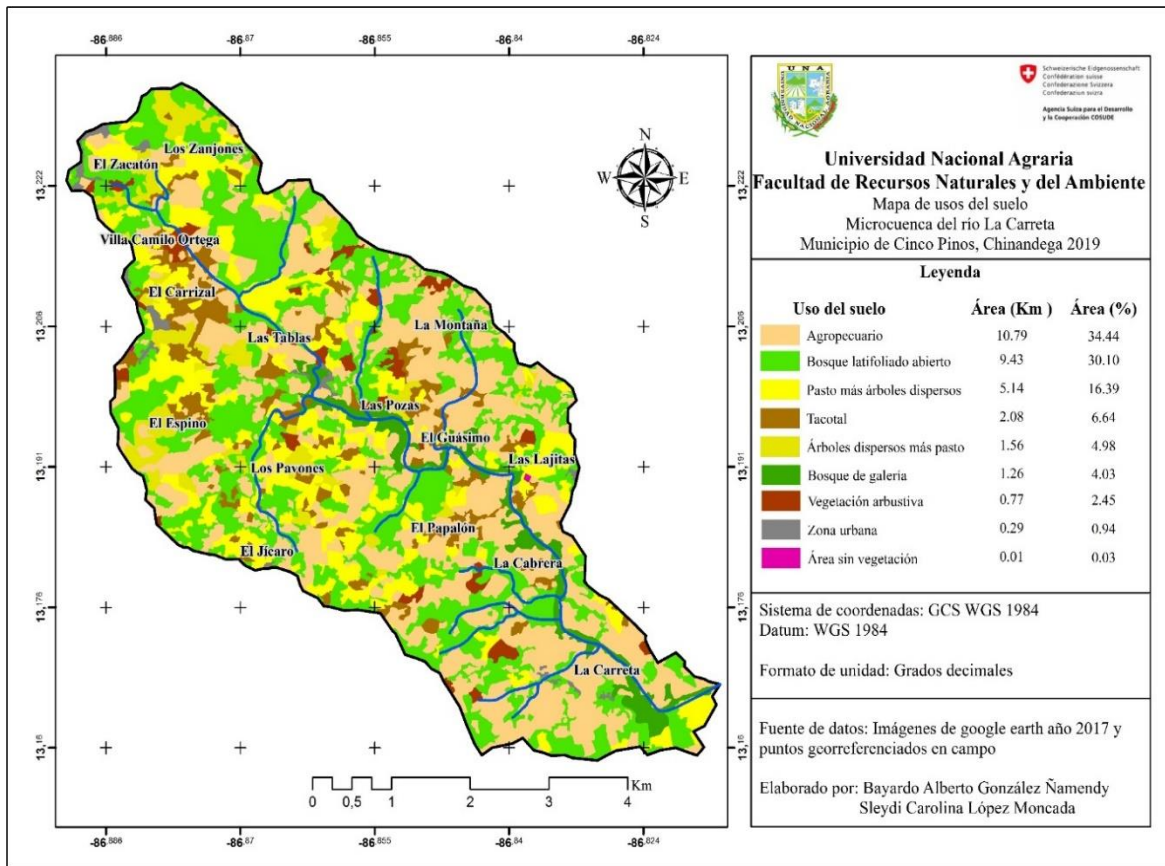


Figura 3. Mapa de uso del suelo de la microcuenca del río La Carreta. Fuente: González y López (2020)

b. Tipo de suelo

González y López (2020) describen que, para la descripción de suelo se realizó mediante levantamiento de datos en el campo, luego la elaboración de mapas utilizó la zonificación agroecológica de Marín del año 1992 y, la delimitación de los límites de cada subgrupo taxonómico se hizo en el software ArcGis 10.2 trazando los polígonos de forma manual. Los resultados del estudio se muestran en el (Cuadro 3 y Figura 4)

González y López (2020) identificaron 4 órdenes que a su vez se clasifican en 6 subgrupos según la taxonomía de suelos de USDA. Sin embargo, en esta investigación, los subgrupos Lithic Haplusterts y Typic Ustorthents, fueron aglomerados a los subgrupos Typic Haplusterts y Lithic Ustorthents respectivamente, debido a que las características fisicoquímicas de estos son muy similares entre ellos (ver cuadro 3).

Cuadro 3. Distribución de los subgrupos de suelos según USDA en la microcuenca del río La Carreta.
Fuente: González y López (2020)

Subgrupo de suelo	Textura predominante	Área	
		Km ²	%
Lithic Haplusterts	Arcilloso	0.20	0.64
Lithic Ustorthents	Franco arenoso	9.16	29.25
Typic Ustorthents	Franco arenoso	7.65	24.41
Typic Haplusterts	Arcilloso	7.61	24.30
Typic Haplustepts	Arcillo- limoso	0.31	0.99
Typic Haplustalfs	Franco arcilloso	6.39	20.40
Total		31.33	100

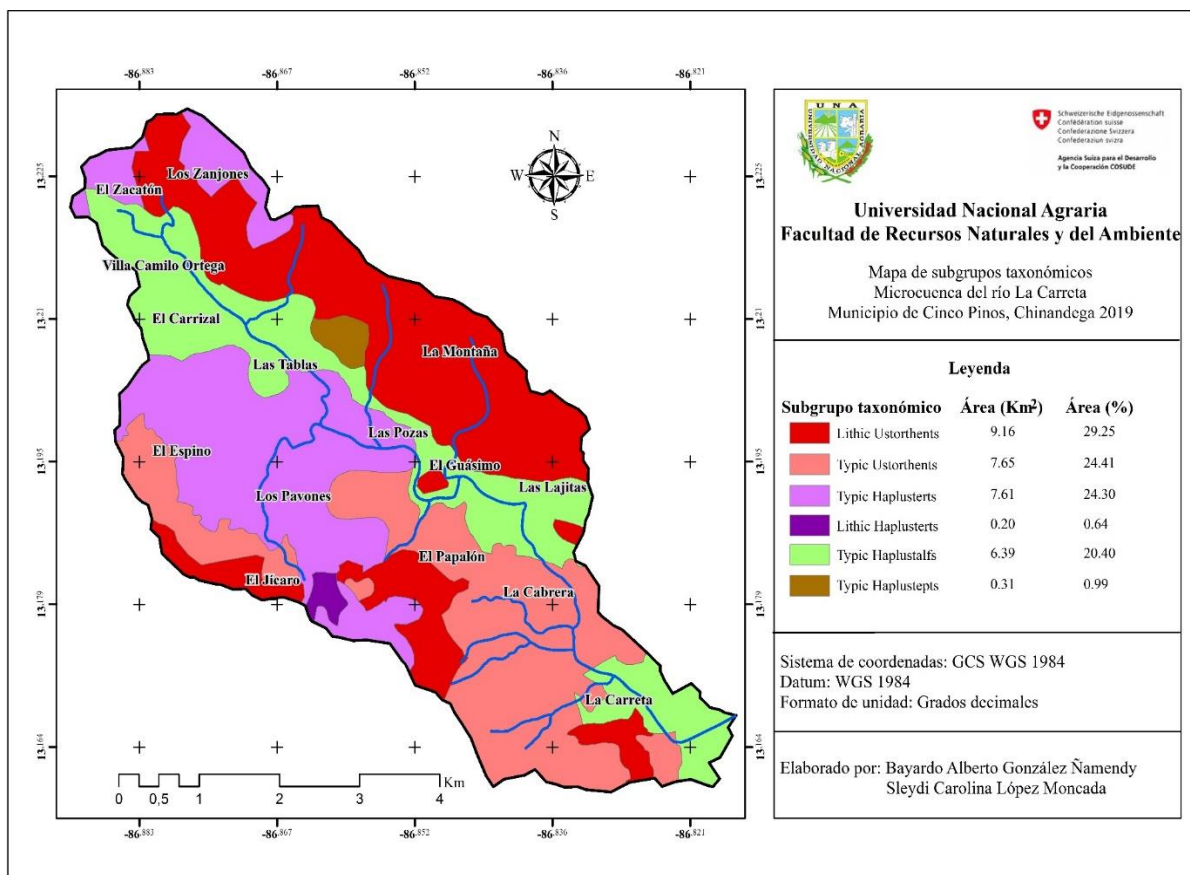


Figura 4. Mapa de subgrupos taxonómicos de la microcuenca del río La Carreta. Fuente: González y López (2020)

Información hidroclimática

Las variables climáticas que se utilizaron en SWAT para la modelación son: precipitación, temperaturas máximas y mínimas, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento. El modelo requiere series históricas para una o varias estaciones y su ubicación geográfica. Para el caso de la microcuenca del río La Carreta se trabajó con cuatro estaciones meteorológicas, cuyas coordenadas se presentan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Información de las estaciones meteorológicas cercanas a la microcuenca del río La Carreta.

N°	Estación	Latitud	Longitud	Elevación (msnm)
1	San Juan de Cinco Pinos	13.22381	-86.8478	361
2	San Francisco del Norte	13.18889	-86.7392	354
3	San Pedro del Norte	13.26253	-86.89332	330
4	Santo Tomas	13.19148	-86.91107	234

Estas estaciones proporcionaron datos climáticos del año 2018 y 2019. Para obtener los registros histórico y futuro con escenario pesimista (RCP 8.5) de estas estaciones, se utilizó las siguientes fuentes para al menos una serie de 30 años. (Ver cuadro 5)

Cuadro 5. Base de datos y modelos climáticos utilizados para recopilar las variables climáticas.

MODELOS USADOS		
Periodo (1990-2019)		Periodo (2049-2069)
Según Climate Engine		Según MarkSim
Temperatura mínima	MERRA 2	Escenario pesimista (RCP 8.5).
Temperatura máxima	MERRA 2	
Velocidad del viento	CFS REANALYSIS	
Precipitación	CHRIPS DAILY	

Los datos históricos para el periodo 1990-2019 fue descargado en formato texto (.txt) del sitio web: Climate Engine (Huntington, 2020), que utiliza Earth Engine de Google para el procesamiento de datos satelitales y climáticos a través de un navegador web. La información está disponible en forma interrumpida a partir del año 1979 en una malla regular. Los datos en Climate Engine para precipitación se encuentran en la pestaña (Chrips Daily), temperatura máximo y mínimo (Merra 2) para la velocidad de viento (CFS Reanalysis).

Los datos climáticos a futuro bajo el escenario RCP 8.5, para el periodo 2040-2069 fue descargado del sitio web del generador de archivos meteorológicos MarkSim™ DSSAT, climate change, agriculture and food security (CCAFS). Es una aplicación que trabaja en una superficie climática de 30 segundos de arco derivada de WorldClim. En este estudio se utilizó la información climática con el escenario pesimista (RCP 8.5) (CGIAR, CCAFS, ILRI Y CIAT, 2020).

Reclasificación y reestructuración de la información

Una vez recopilada la información necesaria para ejecutar el modelo, en este proceso se ajustaron las informaciones según al requerimiento de este, tomando en consideración el formato de entrada de los datos.

A continuación, se describe el proceso de reclasificación y reestructuración de la información de la zona, para cada entrada de información.

Sub-órdenes de suelo

SWAT cuenta con un registro de información de suelo, basado en el Mapa Mundial Digitalizado de Suelos, a una escala de 1:5 000 000. Esta resolución resulta imprecisa para la escala a nivel de microcuena, por lo que se hizo los ajustes necesarios a la base de datos a partir de los datos de suelo recopilados por González y López (2020).

El mapa de subórdenes de microcuena generado en el estudio de González y López (2020) no contenía toda la información fisicoquímica que requiere el modelo, por el cual se utilizó el base de datos Mundial Armonizada de Suelos de la FAO contenida en el software HWSD-viewer (Harmonized World Soil Database v 1.2) para completar los requerimientos del modelo.

Cobertura y uso de tierra

A partir de estos usos, se realizó una comparación con las categorías que el modelo SWAT contiene en su base de datos, para así poder tener una clasificación de uso específico de la zona de estudio. Según el estudio realizado por González y López (2020), el uso de suelo está agrupado en nueve clases de vegetación (descrito previamente en el cuadro 2). Estas categorías de cobertura y uso de tierra fueron reclasificadas según la base de datos de SWAT.

Pendiente

Para delimitar las unidades de respuesta hidrológica (URHs) se definieron rangos de pendiente. Para ello se utilizó la clasificación establecida por la FAO (Ver Cuadro 6).

Cuadro 6. *Clases de pendientes según (FAO, 2009)*

Rango de la pendiente	Interpretación
0-4%	Plano a ligeramente inclinado
4-8%	Inclinado
8-15%	Fuertemente Inclinado
15-30%	Moderadamente escarpado
>30%	Escarpado a muy escarpado

Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2009).

4.3.3. Etapa III: Proponer alternativas de uso de tierra

Esta etapa consistió en organizar las informaciones hidroclimática y analizar la información de salida, esto, con la finalidad de proponer usos de tierra mejorada para disminuir la carga de sedimento en las diferentes subunidades.

Organización de la información hidroclimática

En este proceso se realizó la organización de las diferentes variables climáticas con su debido formato para poder cargar al modelo hidrológico. A continuación, se describe el proceso de organización.

a. Clima

La información climática se organizó en archivos de texto para cada una de las variables de clima que requiere el modelo. Cada archivo de texto consta de una única fila con datos diario para los dos periodos en estudio, de las cuatro estaciones meteorológicas.

La simulación de escenario climático requirió utilizar dos bases de datos:

- La primera, la base de datos climático nacional elaborada por Espinoza (2017) a partir del análisis estadístico de variables climáticas de 17 estaciones meteorológica de Nicaragua.
- La segunda, base estructurada según el formato de SWAT de las cuatro estaciones meteorológicas ubicadas en la zona de estudio.

Análisis de la información

La investigación parte del análisis de información cuantitativa, es decir, se utiliza los datos de salida del modelo hidrológico ArcSWAT, extensión de ArcGIS 10.5, para realizar inferencias en cuanto al comportamiento del escurrimiento superficial y cargas de sedimentos con relación a las HRU de la microcuenca.

La determinación de las HRUs permitió evaluar el comportamiento de cada subunidad de la microcuenca, a partir del análisis de la relación entre las características de pendiente, uso, cobertura y tipo de suelo.

Las distintas combinaciones de estas variables indican el grado de erosión, por lo que para realizar comparaciones entre las subunidades hidrográficas de la microcuenca, se utilizó el cuadro 7.

Cuadro 7. Clasificación de degradación por erosión hídrica

Clase de degradación	Pérdida de Suelo (Ton/ha/año)
<i>Ligero</i>	<10
<i>Baja</i>	10-25
<i>Moderada</i>	25-50
<i>Alta</i>	50-100
<i>Muy alta</i>	>100

Fuente: (Pérez Gallardo, 2001, pág. 67)

a. Calibraciones y validación hidrológica

Barquero (2015, pág. 40) expresa que, todo modelo hidrológico está sujeto a errores, que dependiendo del número de variables con que se cuenta puede afectar considerablemente los resultados. Estos errores son clasificados normalmente en dos tipos, aleatorios o sistemáticos. Los primeros ocurren cuando el error varía para un número sucesivo de intervalos, es decir el error se expresa porque no se realizan suficientes pruebas, por lo tanto, se toma como un hecho el resultado de una o muy pocas pruebas. Al contrario, los errores sistemáticos se mantienen a lo largo de varios intervalos de tiempo, esto puede deberse a un error repetitivo al hacer la toma de datos.

Para reducir el error sistemático y garantizar una precisión aceptable en los datos tomados, se monitoreo los caudales de tres puntos de la red de drenaje de la microcuenca (Ver cuadro 8) mediante el método velocidad-sección, con el uso del correntómetro digital de molinete. En cuanto al error aleatorio, se requirió realizar varias calibraciones manuales del modelo hidrológico para verificar si el comportamiento se ajusta a la realidad de la microcuenca, mediante la comparación de los valores modelados con los monitoreados.

Cuadro 8. Información de la ubicación de los puntos de monitoreo de caudales en la red de drenaje de la microcuenca del río La Carreta.

ID	X	Y	Comunidad
1	519025	1455445	Cerro Colorado
2	516725	1458391	Santa Fe
3	513568	1460649	El Carrizal

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante el uso del modelo hidrológico SWAT según los objetivos planteados.

5.1. Descripción morfométrica de la microcuenca.

En el (Cuadro 9) se presentan las estimaciones de los parámetros morfométricos de la microcuenca del río La Carreta del municipio de San Juan de Cinco Pinos.

Cuadro 9. Resumen de los parámetros morfométricos de la microcuenca del río La Carreta.

Parámetro	Unidad	Estimación	Parámetro	Unidad	Estimación
Parámetros de forma					
Área	Km ²	30.66	Factor de forma		0.71
Perímetro	Km	42.14	Coefficiente de Gravelius		2.17
Parámetros de relieve					
Elevación	msnm	Mínima: 122	Curva Hipsométrica	-	Fase Madurez
		Media: 295.9			
		Máxima: 667	Pendiente media	%	19.06
Parámetros de drenaje					
Forma	Dendrítico y subparalela			Corrientes	
	<i>Cauce principal</i>			Longitud de corrientes	Km
Longitud	Km	12.05	Cantidad	Unidad	35
Pendiente media	%	2.87	Densidad de Drenaje	Km /Km ²	1.4
			Densidad de corriente	Cor./Km ²	1.14

5.1.1. Parámetros de forma

La microcuenca del río La Carreta cuenta con una superficie aproximada de 30.66 km² y un perímetro de 42.14 km. Los valores del factor de forma y el coeficiente de compacidad de Gravelius (0.71 y 2.17, respectivamente) clasifican la forma de la microcuenca como alargada, indicando que el tiempo de concentración de las aguas a la salida de ésta, es mayor, de modo que el caudal del río se desplaza de manera retardada, dando oportunidad de evacuar a la población asentada en los márgenes del río.

5.1.2. Parámetros de relieve

En la figura 5 se puede observar que, la elevación media, es decir, la elevación correspondiente al 50% del área total es de 295.9 msnm.

La forma de la curva indica que tiene un comportamiento característico de una cuenca en fase de madurez, o en equilibrio. La pendiente media la microcuenca es moderadamente escarpada (19.06%). Estos resultados demuestran que el escurrimiento superficial es favorecido por el relieve que presenta la microcuenca indicada previamente, lo que propicia los procesos erosivos en ésta.

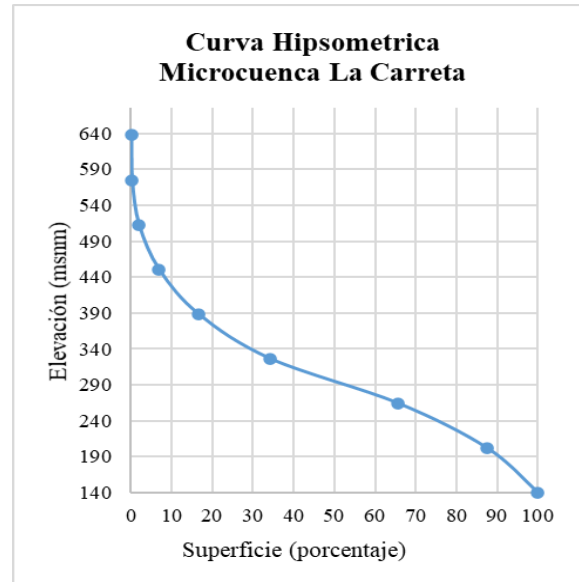


Figura 5. Curva hipsométrica de la microcuenca La Carret

5.1.3. Parámetros de drenaje

Se identificaron 35 cursos fluviales, de carácter intermitente, dispuesto en una forma dendrítica y subparalelo. La longitud total de todas las vertientes es de 42.95 km, siendo la longitud del cauce principal de 12.05 km (Ver cuadro 10). Estos valores indican una densidad de drenaje de 1.4 km/km², y densidad de corriente de 1.14 corrientes/km², reflejando que la microcuenca presenta un buen drenaje.

Cuadro 10. Resumen de la red de drenaje de la microcuenca del río La Carreta.

Nº de orden	Cantidad	Longitud (km)	Clase
1	18	28.96	Intermitente
2	5	5.09	Intermitente
3	12	8.90	Intermitente
Total	35	42.95	

Los parámetros morfométricos de la microcuenca del río La Carreta, indican que los caudales máximos son favorecidos por el relieve que presenta.

A pesar de que la cuenca tiene una forma alargada que permite que los caudales lleguen con un poco de retraso, la inclinación del relieve favorece el escurrimiento superficial que se torna casi inmediato durante las precipitaciones debido a la posición e inclinación del relieve que según Gonzales y López (2020) “mayores inclinaciones hacen que el agua que precipita se escurra superficialmente con mucha más facilidad gracias a la energía cinética.” Estos procesos erosivos impiden la infiltración del agua en el suelo y con ello, la recarga del acuífero, UNESCO (1986) indica que, “esta es debida a la velocidad que ella toma en su recorrido.”

5.2. Balance hídrico

5.2.1. Escenario histórico

En la figura 6 se presenta el balance hídrico de la microcuenca para un registro de 30 años correspondiente al período 1990-2019, en donde la precipitación anual es de 1618. 26 mm, con una temperatura media de 25.66 °C, teniendo como temperatura máxima y mínima, 31.28 y 20.04°C, respectivamente. (Ver figura 6)

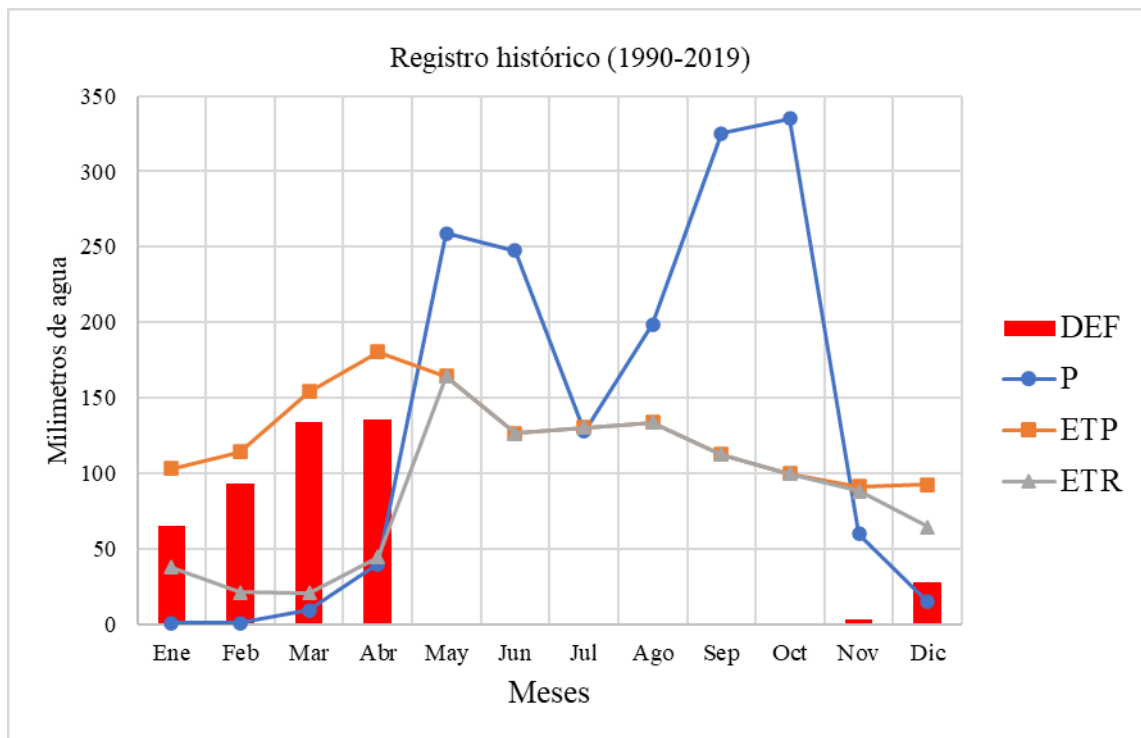


Figura 6. Balance hídrico para el escenario climático histórico (1990-2019) de la microcuenca del río La Carreta.

Se observa que el periodo húmedo se encuentra entre los meses de mayo y octubre, con una disminución en las precipitaciones durante el mes de julio, siendo octubre el mes más húmedo con un promedio mensual de 335 mm. Se espera que para esos meses tenga mayor producción de escurrimiento superficial, según Iroume A (1992) afirme que, “las mayores escorrentías mensuales ocurrieron meses después de las mayores precipitaciones mensuales.” Según (Ares, 2014) esto sucede cuando, “la intensidad de la lluvia supera la capacidad de infiltración de los suelos” esto es debido a la saturación del suelo después de un evento de precipitación. Por otra parte, el periodo seco ocurre entre los meses de noviembre y abril, siendo enero el mes más seco con precipitaciones nulas.

5.2.2. Escenario futuro pesimista (RCP 8.5)

A partir del registro climático para el periodo 2040-2069 con el escenario pesimista (RCP 8.5) obtenido mediante MarkSim, se estimó que la precipitación media anual será de 2088.57 mm; la temperatura media anual, de 27.93°C (temperaturas máximas y mínima de 34.13 y 21.72°C, respectivamente) (Ver figura 7).

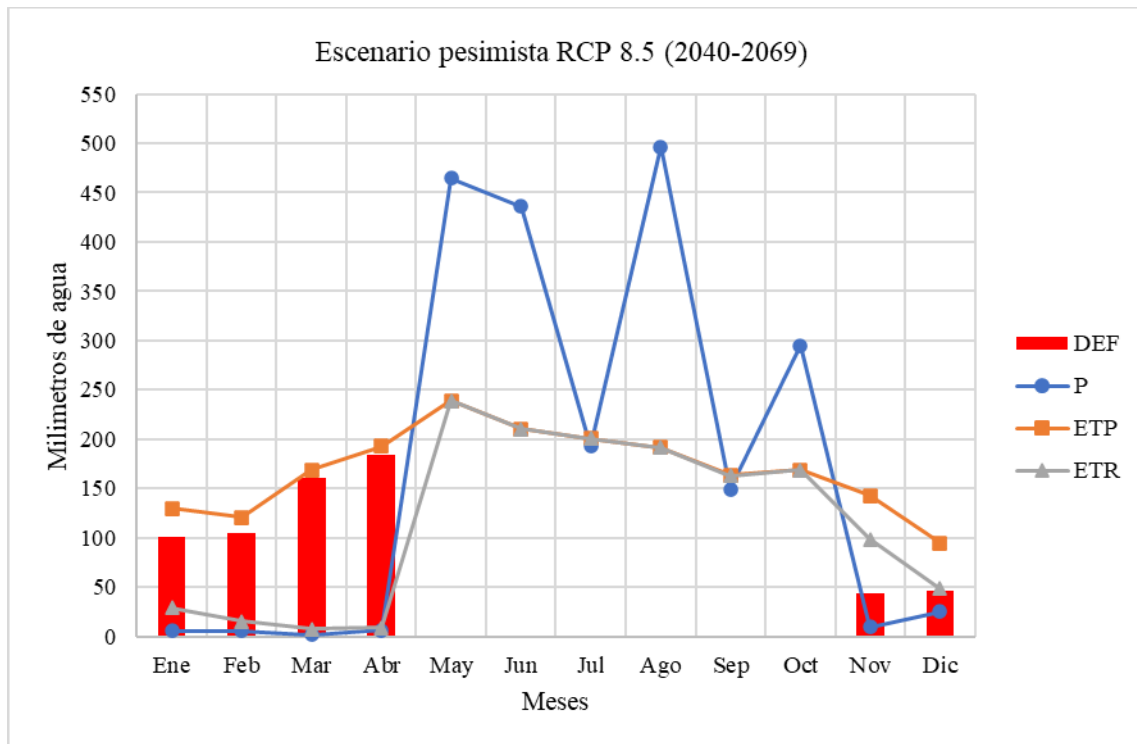


Figura 7. Balance hídrico para el escenario climático pesimista RCP 8.5 (2040-2069) de la microcuenca del río La Carreta.

Con este escenario, se refleja un incremento del 29.06% de la precipitación con relación al escenario histórico (1618.26 mm), esto significa que, en los próximos años se esperan incremento en las precipitaciones de los meses de mayo (205.83 mm), junio (188.49 mm) y agosto (297.55 mm). Los meses con mayor precipitación, según Iroume (1992) son Influídos por las elevadas tasas de evapotranspiración que se producen durante los meses de verano.”

Tapasco, y otros (2015) afirman que, “Aunque la temperatura se incrementa, la precipitación también aumenta, lo que conlleva a que la mayor demanda evapotranspirativa sea compensada por los incrementos en la lluvia.” Investigación realizado por Espinoza (2017, p.23) también afirma que, el aumento de las precipitaciones en las unidades hidrográficas ubicadas en la región del Pacífico puede deberse al comportamiento de las temperaturas ya que, con el aumento de éstas, se induce a un incremento de la evapotranspiración y por consiguiente de la precipitación, no obstante, este aumento no garantiza que la precipitaciones sea uniformes dentro dela microcuenca, más sin embargo, se espera que en algunas de las subunidades presenten precipitaciones de mayor intensidad, menor frecuencia y duración.

Según la figura 6, se puede observar que septiembre y octubre son los meses más lluviosos del año, y en la figura 7 se observa que hay una reducción significativa, principalmente en septiembre, correspondiente a 176.23 mm de los 325.32 mm que históricamente precipitan en la microcuenca. Barquero Ureña (2015) afirma que, “la lluvia distribuida en pocos días lo que provoca que sea un año con menor evapotranspiración” por lo tanto menor precipitación. Esto se puede observar en la figura 7, la distribución de precipitaciones generada en los meses anteriores provoca una baja disminución de evapotranspiración, por ende, se espera que para el siguiente mes presente una baja disminución de lluvia. Esto respondería a las afirmaciones realizadas por Espinoza Acuña (2017) y Tapasco, y otros (2015) que en sus estudios describieron que, una baja evapotranspiración provoca una disminución en las precipitaciones.

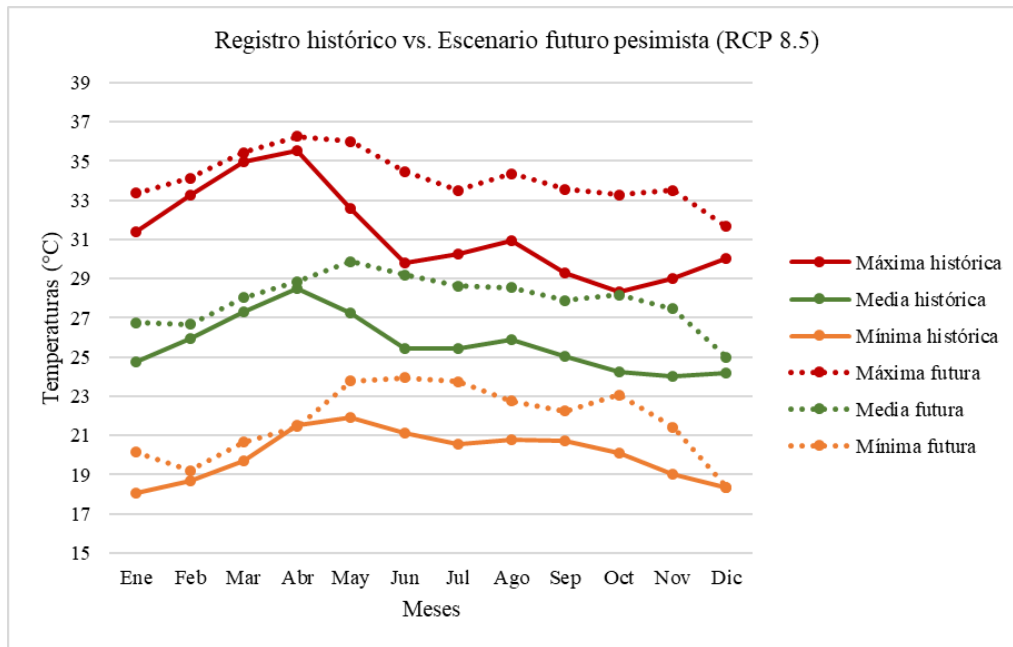


Figura 8. Temperaturas máximas, mínimas y medias del escenario histórico y el escenario pesimista en la microcuenca del río La Carreta

Respecto a las temperaturas también se espera que para éste mismo período haya un incremento de 2.26° C en el promedio anual, equivalente al 8.8% con relación al registro histórico a como se observa en la figura 8. Esto generaría un impacto negativo puesto que se ha demostrado en estudio realizado por Espinoza Acuña (2017) “El aumento de esta variable y de la temperatura media inciden directamente en las pérdidas de agua por transpiración de la cobertura vegetal y por evaporación de los cuerpos de agua y de la humedad del suelo, limitando la disponibilidad de agua en los meses secos.” Así mismo Barquero Ureña (2015) afirma que, “la evapotranspiración devuelve el agua a la atmosfera y se considera que es una de las principales pérdidas de agua que se produce en una cuenca.”

5.3.Descripción biofísica de la microcuenca

5.3.1. Reclasificación de la información utilizada

Con base en el estudio realizado por González y López (2020) la microcuenca La Carreta, se reclasificaron el mapa de usos de tierra y el mapa de subgrupos de suelo, el resultado se describe a continuación:

Uso de la tierra

Se puede observar que de los nueve usos de tierra descritos por González y López (2020), se redujo a seis categorías de usos según la base de datos SWAT (Ver cuadro 11).

Cuadro 11. Reclasificación de las categorías de uso de la microcuenca del río La Carreta, según SWAT.

Categoría de uso según González y López		Categoría de uso según SWAT	
Año 2020		Código	Interpretación
<i>Vegetación boscosa</i>	Bosque Latifoliado Abierto	<i>FRSD</i>	<i>Bosque deciduo</i>
	Bosque de Galería	<i>FRSE</i>	<i>Bosque siempre verde</i>
<i>Vegetación arbustiva, matorrales, malezas y Tacotales</i>	Tacotales	<i>RGNB</i>	<i>Vegetación arbustiva</i>
	Vegetación arbustiva		
<i>Vegetación de ciclo corto</i>	Árboles dispersos con pastos	<i>AGRL</i>	<i>Agricultura genérica</i>
	Agropecuario		
<i>Vegetación de ciclo largo</i>	Pasto con árboles dispersos	<i>PAST</i>	<i>Pastura</i>
<i>Otros usos</i>	Área sin vegetación	<i>BARR</i>	<i>Estéril</i>
<i>Áreas humanizadas</i>	Zona urbana	<i>URLD</i>	<i>Residencial de baja densidad</i>

Se designó el uso “bosque deciduo” (FRSD) de la clasificación de SWAT, para modelar los bosques latifoliado abierto; el uso “bosque siempre verde” (FRSE), para los bosques de galería; el uso “vegetación arbustiva” (RGNB), para la vegetación arbustiva y matorrales; el uso: “agricultura genérica” (AGRL), para las superficies agrícolas; el uso: “Pastura” (PAST), para pastos y pastos con árboles dispersos; el uso “residencial de baja densidad”(URLD), para la zona urbana; y uso “estéril” (BARR) para suelos sin vegetación. (Ver figura 9)

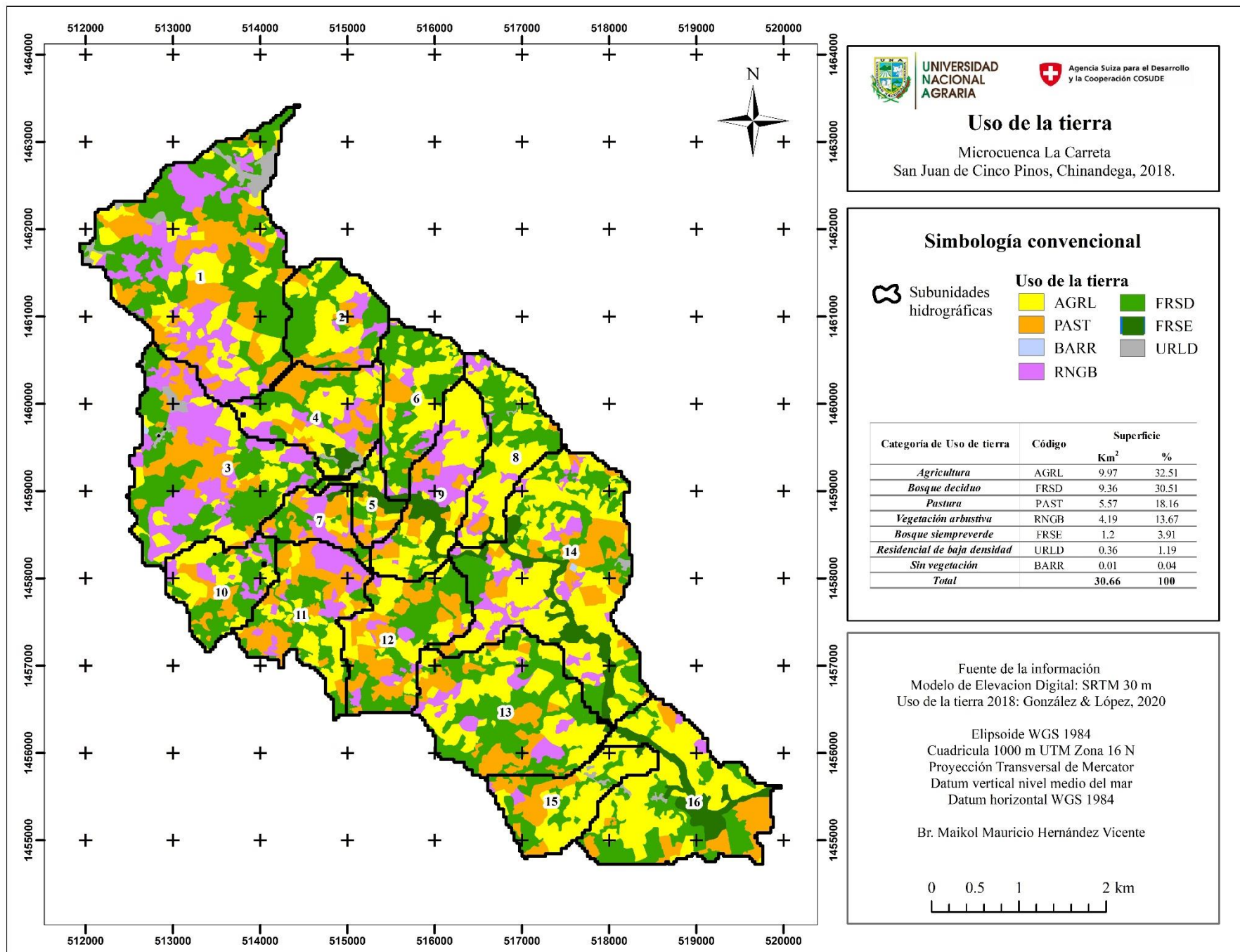


Figura 9. Mapa de clasificación del uso de la tierra de la microcuenca del río La Carreta, 2018.

Cuadro 12. Distribución del uso de la tierra de la microcuenca del río La Carreta, según la clasificación de SWAT.

Categoría de Uso de tierra	Código	Superficie	
		Km ²	%
<i>Agricultura</i>	AGRL	9.97	32.51
<i>Bosque deciduo</i>	FRSD	9.36	30.51
<i>Pastura</i>	PAST	5.57	18.16
<i>Vegetación arbustiva</i>	RNGB	4.19	13.67
<i>Bosque siempreverde</i>	FRSE	1.20	3.91
<i>Residencial de baja densidad</i>	URLD	0.36	1.19
<i>Sin vegetación</i>	BARR	0.01	0.04
Total		30.66	100

El uso de tierra predominante (ver cuadro 12) es la agricultura genérica (AGRL) con una superficie de 9.97 km² (32.51 % del área total), seguida de la categoría bosque deciduo (FRSD), con 9.36 km² (30.51 %). González y López (2020) señalan que este último uso “posee una alta posibilidad de recarga, sin embargo, estas corresponden en su mayoría a fragmentos que han quedado dispersos” p33.

La tercera categoría corresponde a las pasturas (PAST), con una superficie de 5.57 km² (18.16%) siendo esto, una categoría que se le considera como un uso intensivo de tierra donde hay serios problemas de erosión, debido a que, el ganado compacta el suelo haciendo que se genere una capa impermeable alterando su estructura y, por ende, impidiendo que el agua se infiltre fácilmente, provocando un alto escurrimiento superficial. Salas Macías (2011) menciona que, “la principal razón por la cual una pastura produce mayor cantidad de escorrentía superficial es la compactación del suelo y el aumento de áreas con bajo cobertura debido al pisoteo animal” Casasola, Ibrahim, Sepúlveda, Ríos, y Tobar (2009) afirma que, “promueven la impermeabilidad de los suelos y mayor escorrentía superficial”.

Luego sigue la categoría vegetación arbustiva (RNGB) con una superficie de 4.19 km² (ocupando el 13.67%); Bosque siempre verde (FRSE), siendo una de las categorías más importantes en cuanto a la protección del recurso suelo y agua, no obstante, posee menos superficie en la microcuenca (1.20 km², equivalente al 3.91%); uso residencial de baja densidad (URLD) con 0.36 km² (1.19%) y, por último, áreas sin vegetación (BARR) con una superficie de 0.01 km² (0.04% del área total).

Reclasificación de sub ordenes de suelo

En el cuadro 13 se detalla la comparación entre los cuatro subgrupos seleccionados para la modelación, con la Clasificación Mundial de Suelos de FAO-UNESCO para obtener las propiedades físicas y químicas faltantes, para ser incorporadas a la base de datos de SWAT.

Cuadro 13. Comparación de los subgrupos de suelo de la microcuenca del río La Carreta identificados por González y López (2020) con la Clasificación Mundial de suelos de la FAO-UNESCO.

USDA			FAO- UNESCO		Superficie	
Orden	Sub-orden	Sub-grupo	Orden	Propuesta	Km ²	%
Entisol	Orthents	Lithic ustorthents	Regosoles	Eutric Regosoles	16.19	52.81
Vertisol	Usterts	Typic haplusterts	Vertisoles	Eutric Vertisoles	7.99	26.08
Alfisol	Ustalfs	Typic haplustalfs	Luvisoles	Calcic Luvisoles	6.17	20.11
Inceptisol	Ustepts	Typic haplustepts	Cambisoles	Eutric Cambisoles	0.31	1.00
Total					30.66	100

Fuente: elaboración propia

El subgrupo Lithic ustorthents es el que posee una mayor superficie con 16.19 km² (52.81% del área total), caracterizado por ser suelo muy superficial, con poco desarrollo, localizado en sitios escarpados; seguido por Typic Haplusterts con 7.99 km² (26.08%), que corresponde a suelos con alto contenido de arcilla expandible, comunes en sitios con pendientes planas.

Ambos órdenes dominantes presentan propiedades físicas que favorecen el escurrimiento superficial. Los suelos entisoles, por ser poco desarrollados y estar localizados en pendientes escarpadas se encuentran sometidos a pérdidas de suelo a mayor intensidad. Según Torres Cruz y Orozco Miranda (2020) “los suelos del orden Entisol (Lithic Ustortents). Suelos con baja capacidad de retener agua, y fijar carbono por ser muy superficiales. Por tanto, son suelos expuestos a una erosión potencial hídrica alta, por ubicarse en pendientes muy escarpadas.” resultados similares presentaron Lagos Tijerino y Cruz Benavides (2020) en su investigación que, los suelos Entisoles con mayor riesgo a la degradación por erosión hídrica, donde los factores pérdida de cobertura por cambios en uso del suelo, y las condiciones escarpadas de sus terrenos se vuelven muy susceptible a la degradación.

En el caso de los suelos vertisoles, Salgado Pérez (2018) menciona que, “los suelos arcillosos están formados por partículas muy pequeñas. Son pesados, no drenan ni se desecan fácilmente” por ende, no favorece la infiltración del agua precipitada por lo que se ve obligada a desplazarse en la superficie, favoreciendo del mismo modo, el escurrimiento.

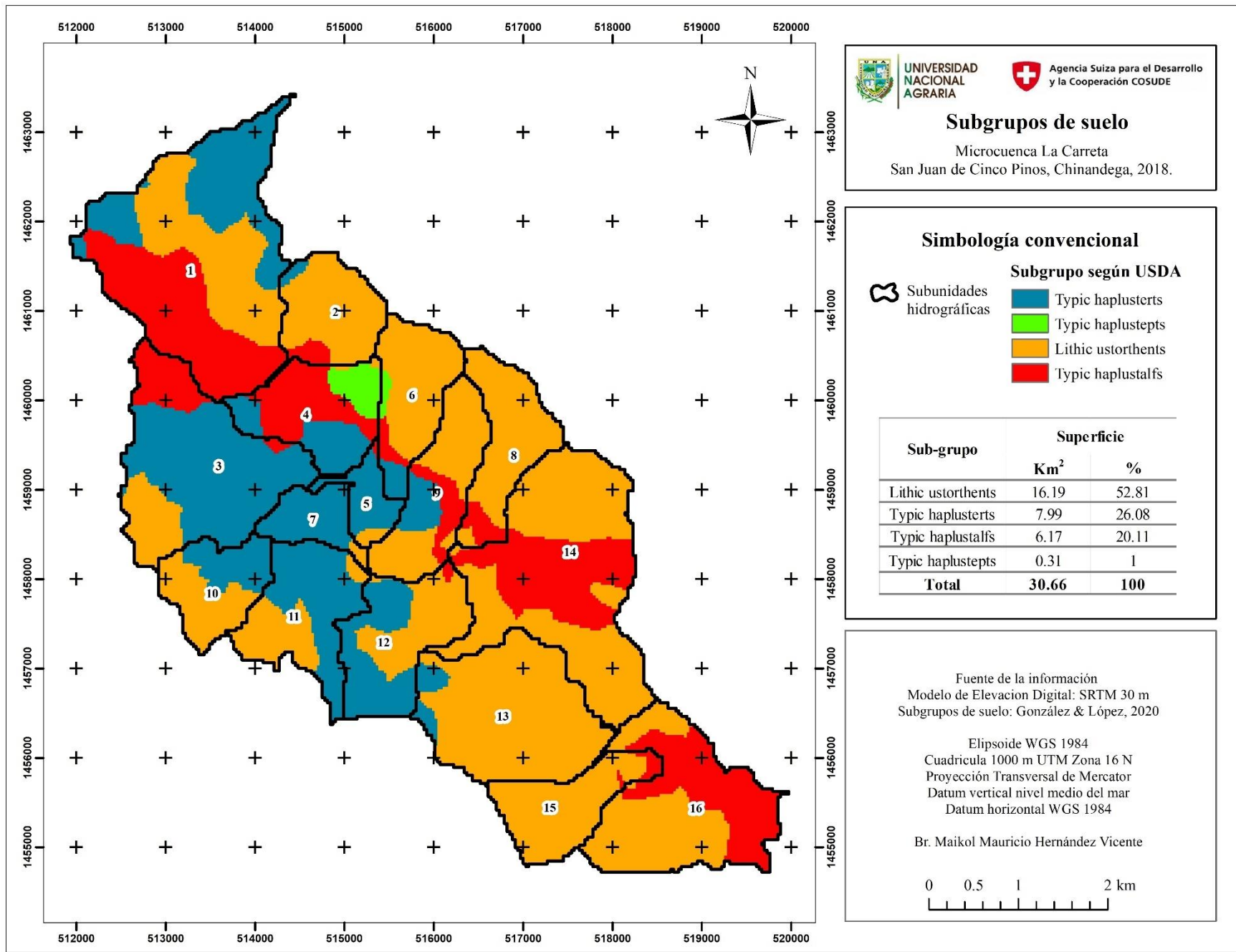


Figura 10. Mapa de agrupación de subgrupos de suelo según USDA, de la microcuenca del río La Carreta, 2018.

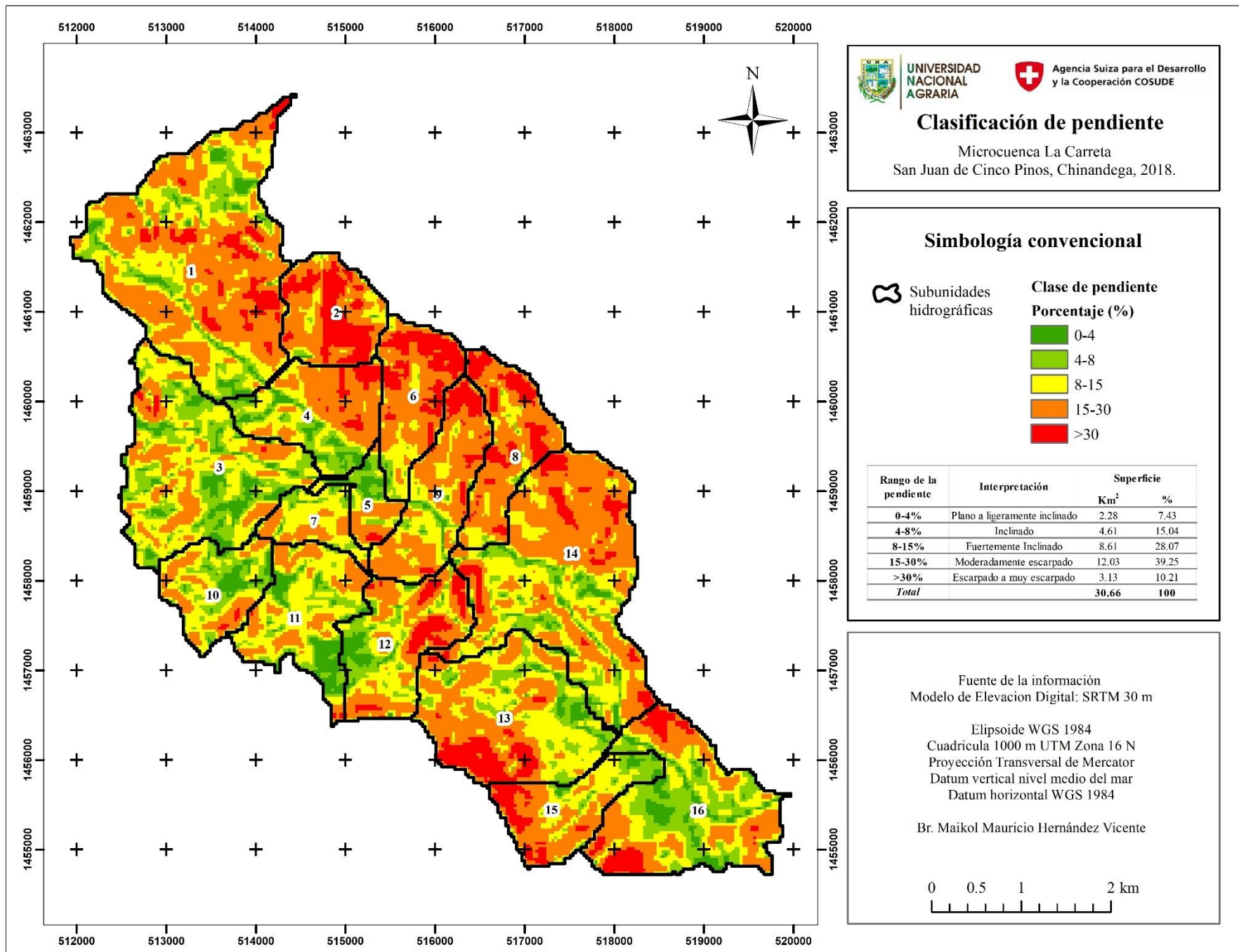


Figura 11. Mapa de distribución de las clases de pendientes en la microcuenca del río La Carreta

Distribución de pendiente

En la figura 11 se puede visualizar que el 50.54% del área de la microcuenca presentan pendientes planas a fuertemente inclinadas (< 15%), y el restante (49.46%) con pendientes de moderadamente escarpadas a muy escarpadas, estos rangos de pendiente favorecen el escurrimiento superficial y con ello el transporte de sedimentos.

Cuadro 14. Clases de pendiente en la microcuenca del río La Carreta

Rango de la pendiente	Interpretación	Superficie	
		Km ²	%
0-4%	Plano a ligeramente inclinado	2.28	7.43
4-8%	Inclinado	4.61	15.04
8-15%	Fuertemente Inclinado	8.61	28.07
15-30%	Moderadamente escarpado	12.03	39.25
>30%	Escarpado a muy escarpado	3.13	10.21
Total		30.66	100

Fuente: adaptado de, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2009)

5.3.2. Unidades de respuesta hidrológica

A partir de los gradientes de pendientes y la reclasificación de suelos y usos de la tierra, se delimitaron 16 subunidades hidrográficas, las cuales en su totalidad presentan 99 unidades de respuesta hidrológica (HRU). En la figura 12, se presenta la combinación del uso de la tierra con la clase de pendiente.

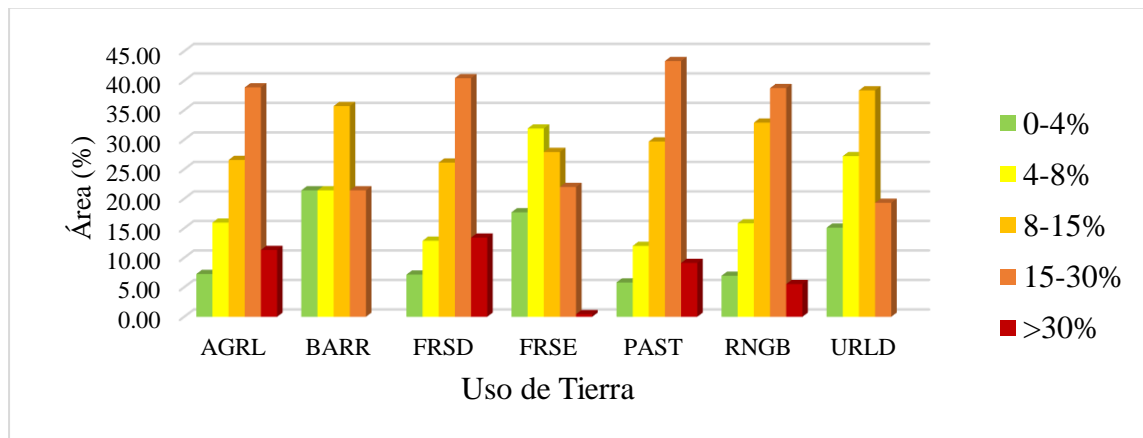


Figura 12. Distribución de superficie ocupada según Unidades de respuestas hidrológicas de la microcuenca del río La Carreta.

Se puede observar que los usos de carácter productivo se encuentran mayoritariamente en pendientes mayores del 15 %, en donde la agricultura presenta el 50.22% (5.51 km²) de su superficie en estas pendientes; y las pasturas, el 52.57% (2.93 km²). Por otra parte, usos con cobertura forestal como los bosques deciduos presentan el 53.84% de su superficie (5.04 km²) en pendientes mayores al 15%, sin embargo, la relación entre las superficies de los usos agropecuarios con los forestales no es equivalente, puesto que el primero ocupa 15.54 km² de la superficie total de la microcuenca, y los usos forestales, 10.56 km².

En la figura 13 se presenta un mapa de las unidades de respuestas hidrológicas delimitadas en la microcuenca, en donde se puede observar que las combinaciones de usos de la tierra con poca cobertura vegetal tales como la agricultura y la pastura, son frecuentemente establecidas en pendientes >8%, con suelos Entisoles, mismos resultados presentaron en su estudio realizado por Lagos Tijerino y Cruz Benavides (2020) los cuales menciona que, estos suelos son utilizados para uso agropecuario y pastos en áreas con pendientes muy escarpadas

Los suelos Lithic ustorthents (LUENTS) se encuentra principalmente ocupado con bosque latifoliado abierto y la agricultura en pendiente moderadamente escarpado a muy escarpado (>15%). En caso del Typic haplustalfs (THALFS), también están ocupados con agricultura, pero en pendientes fuertemente inclinados a moderadamente escarpados (8-15%). Los suelos Typic haplusterts (THERTS) por lo general se encuentran ocupado por pastos, cultivos anuales, bosque latifoliado abierto y una pequeña porción de vegetación arbustiva, con pendientes planas a fuertemente inclinados (<8%).

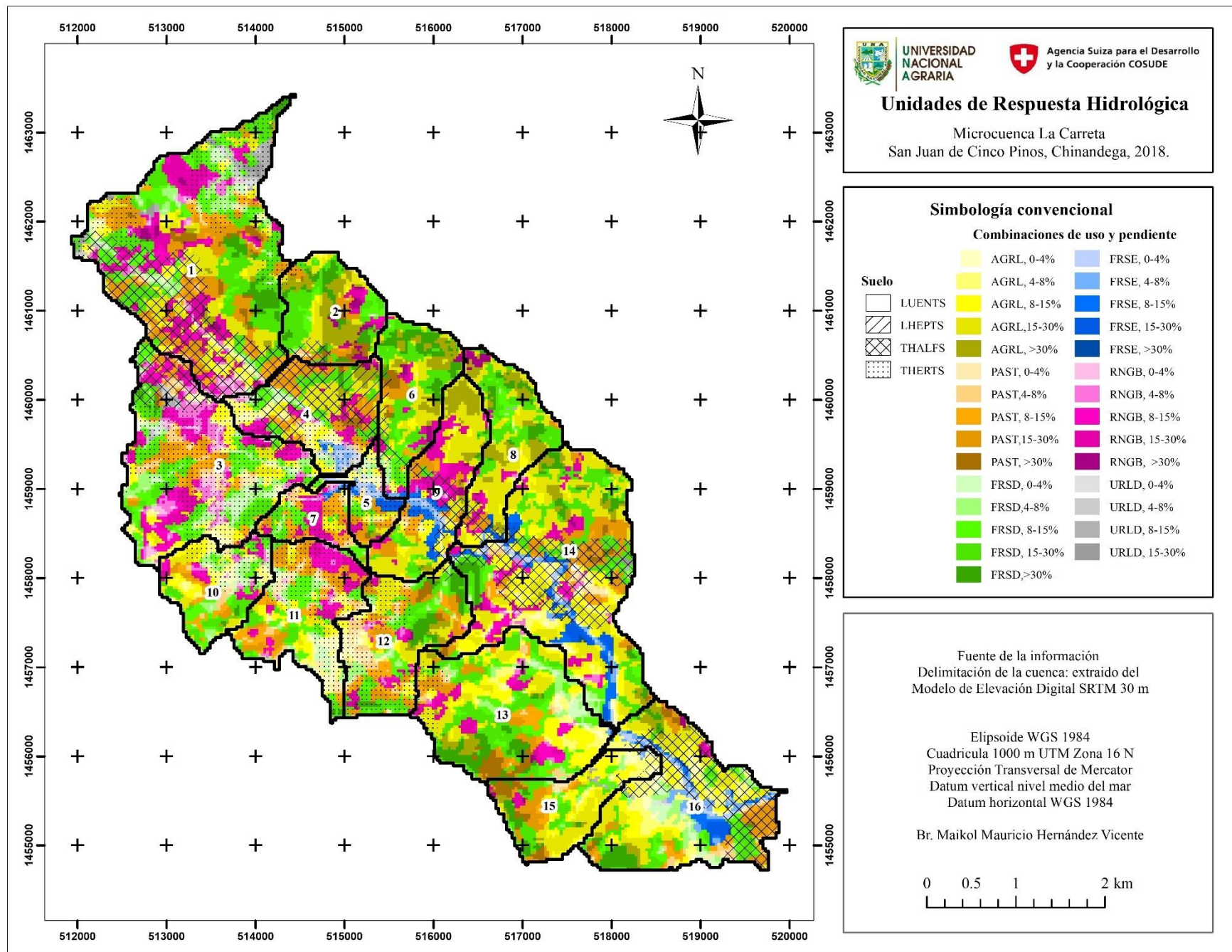


Figura 13. Mapa de las Unidades de respuestas hidrológicas (HRU) de la microcuenca del río La Carreta.

Unidades de Respuesta Hidrológica Dominantes

Para estimar el escurrimiento y la carga de sedimentos, se identificó la Unidad de Respuesta Hidrológica dominante para las 16 subunidades hidrográfica de la microcuenca, la cual corresponde al tipo de combinación de suelo, uso de la tierra y pendiente, que ocupa mayor superficie en la unidad. (Ver figura 14)

La subunidad 1 es la que ocupa mayor superficie en la microcuenca, con 4.79 km² (15.63% del total) dominado por bosque latifoliado abierto, suelos Lithic ustorthents (LUENTS) y pendiente moderadamente escarpado (15-30%), seguida de la subunidad 14 con 4.03 km² (13.15%) en condiciones opuestas a la previamente mencionada. Ésta presenta dominancia de la agricultura sobre suelos superficiales en pendientes moderadamente escarpados (15-30%).

De manera general se observa que las subunidades presentan dominancia de suelos Typic usthortents, a excepción de la subunidad 4, con Typic haplustalfs. Por otra parte, las subunidades dominadas por bosques latifoliados abiertos en pendientes mayores al 8% se encuentran en la zona de recarga de la microcuenca, y que la mayor parte de la zona de transición de ésta se encuentra ocupada mayoritariamente por actividades agropecuarias en pendientes mayores al 15%.

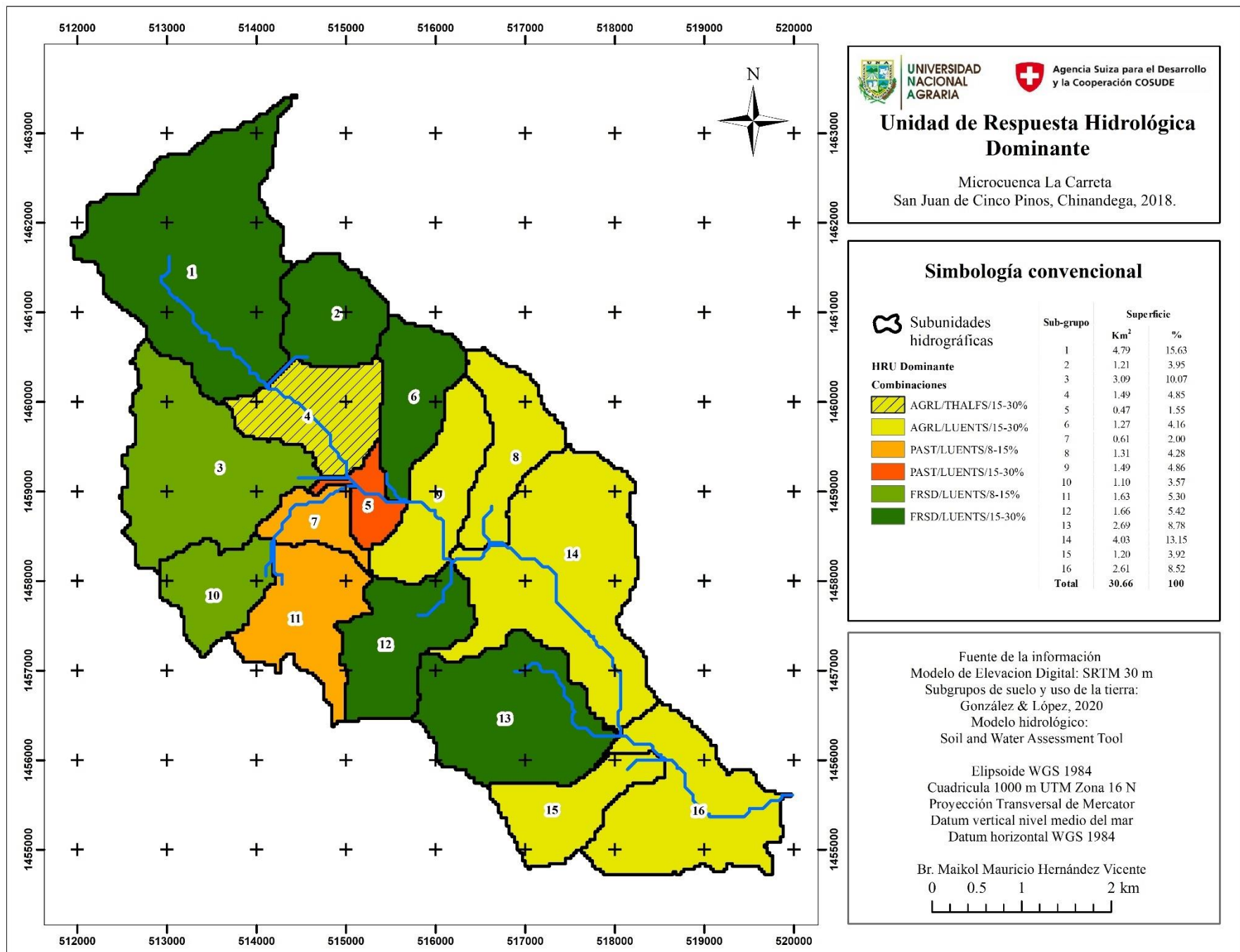


Figura 14. Mapa de Unidades de respuesta hidrológica dominante de la microcuenca del río La Carreta.

5.4. Comportamiento del escurrimiento superficial

5.4.1. Escenario histórico

En el Cuadro 15 se presentan los resultados del comportamiento del escurrimiento superficial en milímetros por año, de las diferentes subunidades hidrográficas para el escenario histórico (1990-2019) y futuro pesimista (2049-2069).

Cuadro 15. Comportamiento del escurrimiento superficial en mm por año en la microcuenca del río La Carreta, para el escenario histórico y futuro.

Subunidad hidrográfica	Superficie (Km ²)	1990-2019		2049-2069	
		Precipitación (mm)	Escurrecimiento superficial (mm)	Precipitación (mm)	Escurrecimiento superficial (mm)
1	4.79	1639.13	66.65	2052.59	247.47
2	1.21	1639.13	63.56	2052.59	238.51
3	3.09	1659.67	64.59	2088.98	223.73
4	1.49	1639.13	546.86	2052.59	1057.73
5	0.47	1639.13	87.87	2052.59	288.65
6	1.27	1639.13	65.59	2052.59	244.52
7	0.61	1639.13	87.81	2052.59	288.46
8	1.31	1639.13	162.20	2052.59	416.99
9	1.49	1639.13	164.36	2052.59	420.06
10	1.10	1659.67	64.57	2088.98	223.67
11	1.63	1639.13	88.36	2052.59	289.89
12	1.66	1639.13	66.80	2052.59	247.86
13	2.69	1639.13	73.03	2052.59	247.92
14	4.03	1639.13	165.03	2052.59	421.13
15	1.20	1639.13	164.84	2052.59	420.88
16	2.61	1639.13	166.83	2052.59	423.49
Total	30.66	1641.9	126.1	2057.6	347.04

En este cuadro se puede observar que, acorde a las modelaciones, las precipitaciones aumentarán un 25.32% (415.7 mm), manifestándose en el incremento en el escurrimiento superficial en un 275.21% (220.94 mm), lo que conlleva a más pérdida de suelo debido a la erosión hídrica.

Con el escenario histórico, se puede observar que las unidades con mayor lámina de agua en término de escurrimiento superficial corresponden a la 4 (546.86 mm), seguida de las 16, 14, 15, 9 y 8 con valores que varían entre 166.83 a 162.20 mm.

Es notable que, las subunidades que presentan valores mayores en cuanto al escurrimiento superficial, influenciados por la magnitud de la precipitación (1,641.9 mm), son aquellas que presentan cultivos agrícolas, pendientes moderadas a fuertemente escarpadas, en suelos superficiales como los Lithic ustorthents (LUENTS) en donde la textura dominante de estos es franco arenoso, a pesar de poseer una textura que favorece a la disminución del escurrimiento superficial debido a la buena capacidad de infiltración.

Según Espinoza Acuña (2017) “la textura franco-limosa a franco arenosa presenta una buena capacidad de infiltración, sin embargo, por el uso de tierra y la pendiente en la que se encuentra tienden a favorecer a la erosión hídrica. Según Lagos Tijerino y Cruz Benavides (2020) las áreas con mayor riesgo a la erosión hídrica son los suelos clasificados como Entisoles por presentar pendientes muy pronunciadas mayores al 40%, y una cobertura vegetal baja. Esto debido al cambio de uso del suelo de bosques a agrícolas y ganaderas.

En el caso de la subunidad 4, la cual refleja el valor máximo de escurrimiento superficial, está ocupada mayoritariamente por agricultura en suelos Typic haplustalfs (THALFS), que a pesar de que son suelos desarrollados, su textura franco-arcillosa facilita el escurrimiento superficial a causa de la pobre capacidad de infiltración que presenta.

González y López (2020) en su investigación de posibilidad de recarga hídrica determino que, “los suelos con texturas franco arcilloso y arcillo limoso, poseen una capacidad de infiltración baja.” Por otro lado, Matus (2007) expresa que: “Suelos de textura fina, arcillosos, pesados y compactados, impiden la recarga hídrica.” Lo cual, esto demuestra que, el valor máximo de escurrimiento es debido al clase de textura que presenta las subunidades.

Por otra parte, el escurrimiento superficial es menor en subunidades con usos de la tierra con cobertura boscosa, lo cual concuerda con ensayos realizados por Treviño, Muñoz, Cavazos, y Barajas (2002) y Ríos (2006) cuyos resultados expresan que, “las áreas con menores porcentajes de esorrentía superficial son las áreas ocupadas por bosque.” Esto, puede asociarse a la protección que brinda el dosel del componente forestal a los suelos, favoreciendo la infiltración y la percolación profunda del agua, independientemente de que las pendientes sean planas o inclinadas.

Tambien Barquero Ureña (2015) expresa que la disminución de escurrimiento, “puede deber a lluvias pequeñas pero constantes, que permiten una adecuada infiltración de los suelos.” Otro factor puede deberse a los cambios en la dirección y velocidad de viento que ocasiona desigual distribución de las precipitaciones sobre la superficie.

5.4.2. Escenario futuro pesimista (RCP 8.5)

La magnitud de los posibles impactos del escurrimiento superficial en la microcuenca varía de una subunidad a otra. En general, se esperan aumentos en esta variable con el escenario futuro pesimista para el periodo 2040-2069 (ver cuadro 15).

Se puede observar que el escurrimiento superficial en la subunidad 4 incrementa considerablemente (1057.73 mm), del mismo modo las subunidades 16, 14, 15 9 y 8, las cuales indican valores que varían entre 423.49 a 416.99 mm. Se evidencia que éstas continúan siendo las subunidades en donde se expresan los mayores volúmenes de agua por escurrimiento superficial en comparación con las otras subunidades hidrográficas.



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AGRARIA

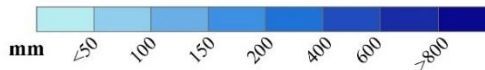


Agencia Suiza para el Desarrollo
y la Cooperación COSUDE

Escorrentamiento superficial

Microcuenca La Carreta
San Juan de Cinco Pinos, Chinandega.

Simbología convencional

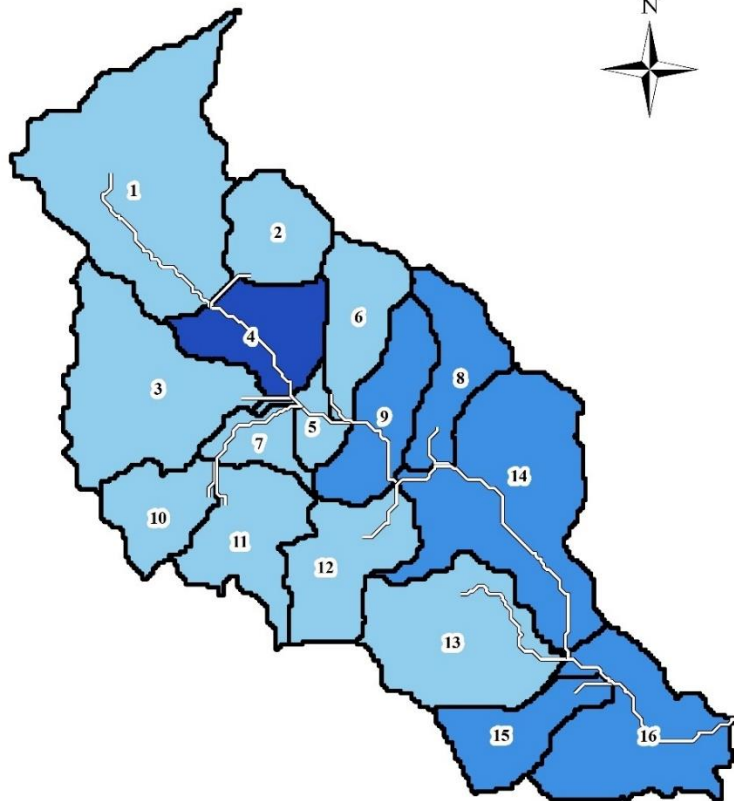


Fuente de la información
Modelo de Elevación Digital: SRTM 30 m
Escorrentamiento superficial:
Soil and Water Assessment Tool

Elipsoide WGS 1984
Cuadrícula 1000 m UTM Zona 16 N
Proyección Transversal de Mercator
Datum vertical nivel medio del mar
Datum horizontal WGS 1984

Br. Maikol Mauricio Hernández Vicente

Escenario histórico



Escenario futuro pesimista (RCP 8.5)

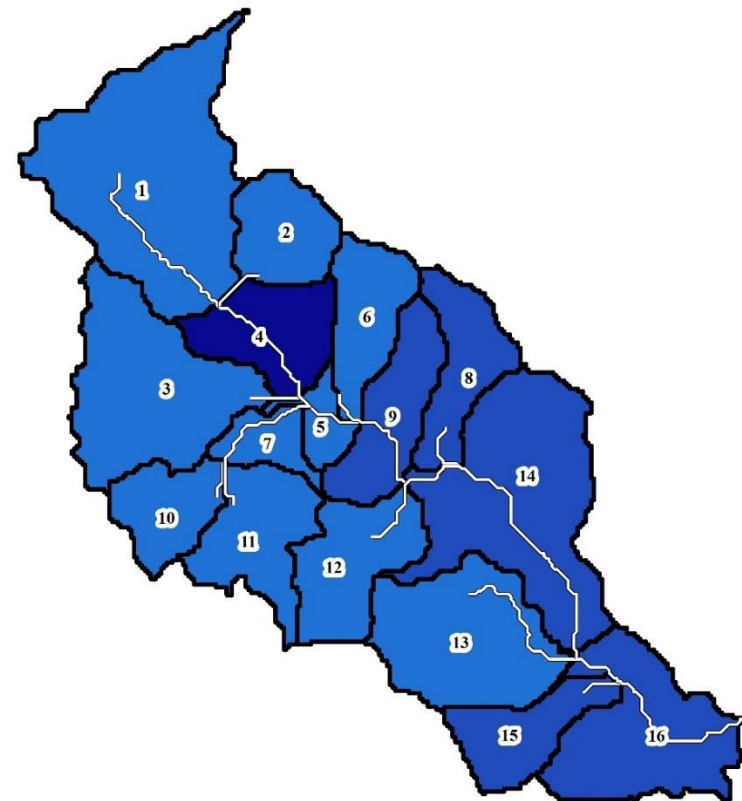


Figura 15. Mapa del escurrimiento superficial anual por subunidad hidrográfica para el periodo histórico y futuro (RCP 8.5) en la microcuenca del río La Carreta

En general, se puede observar en la figura 15, una fuerte tendencia en el incremento del escurrimiento superficial en cada una de las subunidades de la microcuenca, principalmente en aquellas que presentan usos de poca cobertura vegetal en pendientes mayores al 8%, y por consiguiente se espera un incremento en la pérdida de suelo por erosión hídrica, lo que afectará la capacidad productiva de estos.

A partir de la comparación del escurrimiento en cada subunidad para ambos escenarios (ver figura 16), se puede observar que los valores para el escenario histórico varían entre 63.56 a 546.86 mm anuales, mientras que, en el escenario pesimista, variarían entre 223.67 a 1057.73 mm, proyectando un fuerte aumento en esta variable.

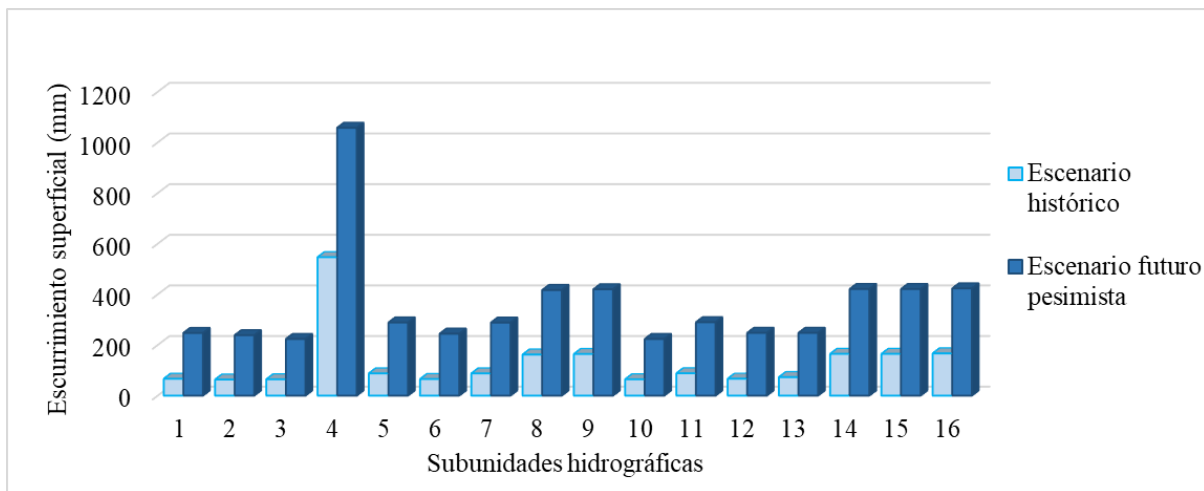


Figura 16. Escurrimiento superficial del periodo histórico vs escenario futuro pesimista (RCP 8.5)

Según los resultados del modelo SWAT, los impactos del escurrimiento superficial estarán geográfica y estacionalmente diferenciadas. Geográficamente, porque los impactos variarían dependiendo de la ubicación de las subunidades dentro de la microcuenca; y estacional, porque su impacto también variará dependiendo del mes en el periodo lluvioso. En términos generales se puede afirmar que el aumento del escurrimiento se presentaría en los meses de mayo a octubre siendo que, estos son los meses más lluviosos en la microcuenca.

5.5. Comportamiento de la producción de sedimento.

A continuación, se presenta el resultado los valores de carga de sedimentos (ton/ha/año) para cada una de las 16 subunidades hidrográficas delimitadas en la microcuenca.

5.5.1. Escenario histórico

En el cuadro 16, se presentan los valores obtenidos de cargas de sedimentos según el escenario histórico y futuro pesimista para la microcuenca.

Cuadro 16. Carga de sedimentos en las subunidades hidrográficas de la microcuenca del río La Carreta para el escenario histórico y futuro.

Subunidad hidrográfica	Superficie (Km ²)	1990-2019		2049-2069	
		Escurrimiento superficial (mm)	Carga de sedimentos (ton/ha)	Escurrimiento superficial (mm)	Carga de sedimentos (ton/ha)
1	4.79	66.65	0.01	247.47	14.43
2	1.21	63.56	0.01	238.51	17.37
3	3.09	64.59	0.01	223.73	8.84
4	1.49	546.86	36.33	1057.73	207.04
5	0.47	87.87	1.70	288.65	11.76
6	1.27	65.59	0.01	244.52	20.68
7	0.61	87.81	1.85	288.46	12.81
8	1.31	162.20	4.77	416.99	44.61
9	1.49	164.36	3.91	420.06	36.98
10	1.10	64.57	0.01	223.67	9.21
11	1.63	88.36	2.49	289.89	17.46
12	1.66	66.80	0.01	247.86	13.17
13	2.69	73.03	0.01	247.92	14.18
14	4.03	165.03	3.42	421.13	32.34
15	1.20	164.84	3.35	420.88	31.45
16	2.61	166.83	2.77	423.49	26.34
Total	30.66	126.1	3.17	347.04	29.81

Se estimó que las cargas de sedimentos, en el escenario histórico, varían entre 0.01 y 36.33 ton/ha/año, en donde la subunidad 4 es la que presenta mayor carga de sedimentos en comparación con las otras subunidades hidrográficas, reflejando 36.33 ton/ha/año. El resto de las subunidades presentan valores que no exceden 5 ton/ha/año.

Es pertinente señalar que en las subunidades cuyo uso dominante es el bosque latifoliado abierto, la generación de cargas de sedimentos resulta ser casi nula (0.01 ton/ha) debido a la influencia de la cobertura forestal, el cual protege al suelo de la erosión. En cambio, en suelos desarrollados como los alfisoles, ocupados con agricultura, se observa que la carga de sedimentos es moderada.

5.5.2. Escenario futuro pesimista (RCP 8.5)

Se espera que para el año 2050 con el escenario pesimista haya un aumento en las cargas de sedimentos en todas las subunidades hidrográfica, asumiendo que el uso de la tierra será el mismo según la clasificación de González y López (2020). Se esperan valores entre 8.84 a 207.04 ton/ha/año. Siendo, la subunidad 4 la que generará mayor carga de sedimentos (207.04 ton/ha), seguido de las subunidades 8, 9, 14 y 15, con cargas de sedimentos que variarán entre 44.61 a 331.45 ton/ha. (Ver figura 17). En su investigación, Cuello (2003) afirma que, las cuencas en condiciones de sobreuso producen la mayor cantidad de sedimentos y que las cuencas donde se encuentra la mayor cantidad de bosques son menos propensas a la erosión

Es relevante señalar que las subunidades con menores cargas de sedimentos continúan siendo aquellas que se encuentran utilizadas por bosques latifoliado abierto. Carvallo (2006) indica que, las áreas cubiertas por bosque presentan los valores más bajos de producción de sedimento. Además, Gopal (2015) afirma que, “la cobertura vegetal cumple un papel importante en la regulación de la erosión del suelo, y por ende en la regulación de la producción de sedimento.”

Si las zonas forestales fuesen sustituidas por actividades agrícolas o pecuarias, se provocaría grandes movimientos de agua a nivel superficial, y por consiguiente pérdida de suelo por erosión hídrica. Esto es confirmado por Ramírez y Rodríguez (2015) que en su estudio de estimación de sedimento a partir de cambios de cobertura se valoraron que las subunidades con mayor aporte de sedimento son aquellas constituidas principalmente por cobertura agrícola y tierras descubiertas. Con esto se reitera la marcada tendencia de la producción de sedimentos cuando se aumentan las áreas agropecuarias y la magnitud de la precipitación.



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AGRARIA



Agencia Suiza para el Desarrollo
y la Cooperación COSUDE

Carga de sedimentos

Microcuenca La Carreta
San Juan de Cinco Pinos, Chinandega.

Simbología convencional



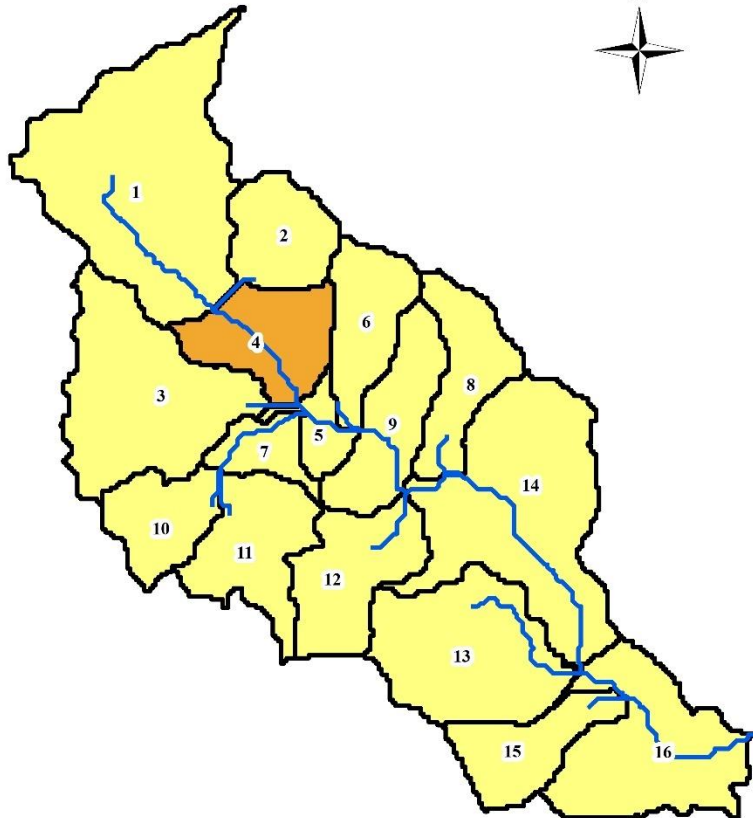
Ton/ha <10 25 50 >100

Fuente de la información
Modelo de Elevación Digital: SRTM 30 m
Carga de sedimentos:
Soil and Water Assessment Tool

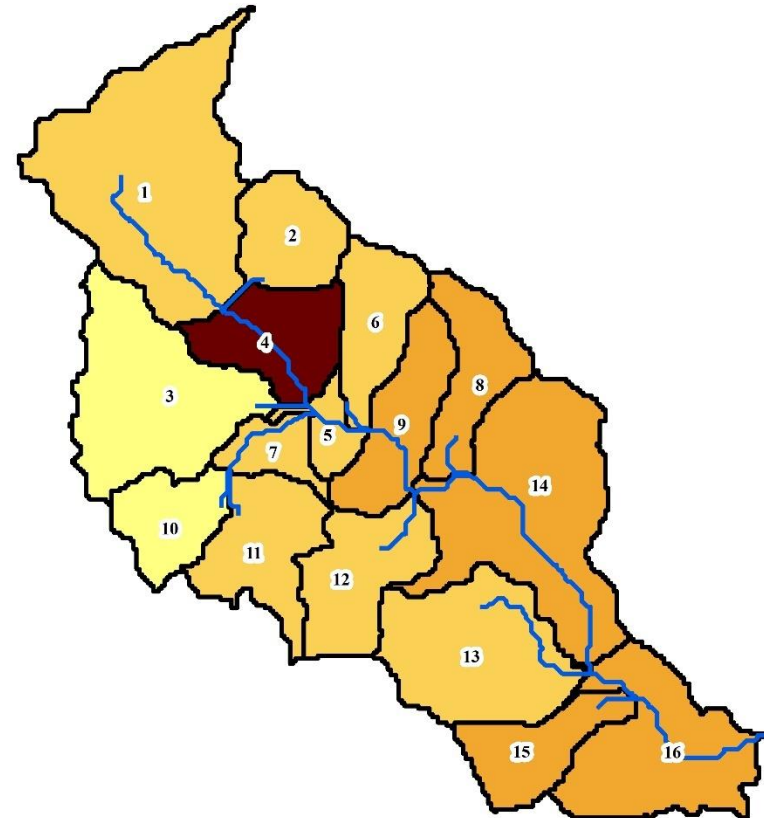
Elipsoide WGS 1984
Cuadrícula 1000 m UTM Zona 16 N
Proyección Transversal de Mercator
Datum vertical nivel medio del mar
Datum horizontal WGS 1984

Br. Maikol Mauricio Hernández Vicente

Escenario histórico



Escenario futuro pesimista (RCP 8.5)



0 0.75 1.5 3 km

Figura 17. Mapa de carga de sedimentos de la microcuenca del río La Carreta con el escenario histórico y pesimista

Si la microcuencia continuase con el uso actual de la tierra y aunado con la variabilidad climática, se espera que, en los próximos cincuenta años, bajo un escenario pesimista (RCP 8.5), el escurrimiento superficial y la carga de sedimentos aumente a 347.04 mm y 29.81 ton/ha respectivamente. Con esto, queda evidenciado que el comportamiento de estas variables depende de la magnitud de la precipitación ocurrida en un espacio y tiempo específico, y del tipo de cobertura.

5.6. Propuesta de manejo para disminuir la erosión hídrica

De manera general, son indiscutible las consecuencias negativas que traen la práctica agropecuaria en cuanto a la conservación del recurso suelo y por consiguiente al recurso hídrico. Conociendo los resultados de escurrimiento y sedimento en las diferentes subunidades es recomendable promover sistemas agroforestales que permita mantener los niveles de ingreso actuales y al mismo tiempo recuperar el estado del suelo.

También es importante desarrollar planes de gestión integral y realizar prácticas dirigidas a la conservación de suelo y agua, tomando en cuenta el grado de prioridad por cada subunidad. Esto propiciaría el incremento de la macro porosidad del suelo, e incrementaría la infiltración y al mismo tiempo permitiría recuperar el estado de los suelos deteriorados por los procesos erosivos. También es pertinente valorar a ejecución de un programa de reforestación con especies arbóreas de beneficios múltiples que permita reducir el escurrimiento superficial y por ende la erosión hídrica

5.6.1. Sistemas agroforestales

Una alternativa positiva es la incorporación del componente forestal en las áreas productivas, como por ejemplo la adopción de sistemas agroforestales como árboles en asociación con cultivos perennes o Quesungual con especies forestales de raíces profundas.

Según Unión Europea, IICA (2015) define que, el Quesungual incorpora tecnologías de manejo del suelo, prácticas agrícolas y forestales, con árboles dispersos en modalidad de regeneración natural, integrándose en una producción agrícola forestal de tipo “agroforestal familiar”.

Estos consisten en plantaciones de árboles de raíces profundas y fijadores de nitrógeno, teniendo en cuenta que las especies sean nativas de la zona y el distanciamiento de las plantaciones se establecen en dependencia de las necesidades del cultivo.

En las subunidades dominadas por actividades agrícolas, es recomendable establecer este sistema puesto que brinda protección al suelo, promueve el reciclaje de nutrientes por el aporte de biomasa y favorece la infiltración del agua en el suelo.

- **Diseño de establecimiento**

Una parcela típica de este sistema la conforman numerosos árboles podados y arbustos (140 árboles por hectárea) con una densidad promedio entre 11 a 14 árboles por hectáreas de grandes dimensiones para madera y fruta. La diversidad de especie en el sistema es alta y depende del manejo y selección de la regeneración natural que realice el productor. (Gamboa, Gómez, & Ibrahim (s.f)

Gamboa et al. (2006) sugiere que puede establecerse en áreas donde haya vegetación secundaria que el agricultor pueda aprovechar periódicamente y que posteriormente pueda dejar en descanso algunos años. El Periodo de descanso oscila entre seis a 12 años, donde se encuentren árboles que posean diámetros superiores a 10 cm y arbustos con alturas mayores a un metro. Durante este tiempo de descanso las áreas pueden recuperar los nutrientes del suelo, gracias a la biomasa producida por los árboles y arbustos durante el ciclo.

5.6.2. Sistemas silvopastoriles

En superficies que presentan pasturas y vegetación arbustiva, se sugiere establecer sistemas silvopastoriles, por ejemplo, bancos forrajeros, arboles dispersos en potreros y cercas vivas.

Según Mendieta López y Rocha Molina (2007) Los sistemas silvopastoriles son la combinación de especies forestales o frutales y animales, sin la presencia de cultivos; y un banco de proteína o banco de forraje, es una plantación forestal cuyo objetivo principal es la obtención de forraje para la suplementación animal.

La característica más sobresaliente en este sistema es la proporción de alimentos nutritivos para los animales, mejoran las características del suelo, proporcionan servicios ambientales, almacenamiento de carbono, aumento de la biodiversidad y la conservación del agua. Los Sistema silvopastoriles permiten que el pastoreo se realice desde el primer año hasta la última cosecha de los árboles.

- **Diseño de establecimiento**

Montagnini, Somarriba, Murgueitio, Fassola, & Eibl (2015) recomienda que, en el establecimiento de un sistema silvopastoriles como el banco forrajero, debe establecerse hileras dobles o triples de árboles separadas por fajas de pastoreo de 15 a 30 metros de ancho entre las líneas de árboles.

La densidad de las arboles inicial en estos sistemas equivale casi al 50% o menos de la de las plantaciones arbóreas homogéneas (entre 300 y 600 árboles ha-1 según la especie y la zona agroecológica). Con una intercepción de luz por los árboles maderables que oscila entre el 10 y el 40 %.

Para la selección de las especies de árboles en el sistema silvopastoril en condiciones de alta luminosidad, se da prioridad a las fijadoras de nitrógeno como los árboles leguminosos que pueden abundar en el trópico seco.

Las especies arbóreas utilizadas en este sistema deben de ser de valor forrajero comprobado. Así como la Leucaena (*Leucaena leucocephala*), Guácimo (*Guazuma ulmifolia*), madero negro (*Gliricidia sepium*), entre otras; también se recomienda que las especies forrajeros tenga interacciones con árboles ya sea de especies frutales y maderables. Según Mendieta López & Rocha Molina (2007) las especies maderables y frutales sirven como alimentos, sombra para el ganado y sirven de protección al suelo.

La distancia de siembra depende de las especies escogidas y del método utilizado. En el siguiente cuadro se presenta las distancias de siembra recomendadas para algunas especies leñosas.

Cuadro 17. Distancia y método de siembra.

Especie	Distancia de siembra	Método de siembra	Plantas por ha⁻¹
Leucaena	0,8 m x 0,4	semilla	31.250
Cratylia	1 m x 0,4	semilla	25.000
Madero negro	1 m x 0,5 m	estaca - semilla	20.000
Guácimo	1,5 m x 1,5 m	semilla y / o seudo estaca	4.400

Fuente: (CATIE, FAO, LEAD Y CIPAV, 2005, pág. 11)

5.6.3. Obras de conservación de suelo y agua

La producción de los cultivos se basa en la interacción suelo-agua-atmósfera; la variación de uno de estos componentes produce un desequilibrio entre ellos, perjudicando notablemente a las cosechas. Por lo tanto, las buenas prácticas para el manejo de las cuencas, la protección del suelo es fundamental para mantener fértil y productivo, conservar la calidad de las aguas, y en caso de embalses, disminuir la sedimentación.

Para el manejo de las cuencas es imprescindible el uso de las siguientes técnicas o prácticas para la protección y conservación de estas.

- **Barreras vivas y muertas**

FAO,OEA (2011) define que, las barreras vivas son cultivos que se siembran en curvas a nivel, principalmente en las laderas, con el propósito de controlar la erosión. Poseen la característica de que se manejan tupidas en los surcos, con alta densidad; por este motivo actúan como barreras. Salgado Pérez (2018) define que, la barrera de piedra es un tipo de barrera de material “muerto” puesta en sentido transversal a la pendiente con el propósito de disminuir la velocidad del agua de escorrentía y a la vez causar la deposición de sedimentos gruesos.

AGEMA,MARENA, UNDP (sf) expresa que, “En la combinación de estas técnicas, es recomendable mencionar que las barreras vivas deben colocarse, preferiblemente, en la parte de arriba de las barreras muertas para su reforzamiento.” No utilizar especies que puede convertirse en invasoras, es preferible utilizar especies que puedan y brinden otros productos, por ejemplo, forraje o pasto de corte para alimentación animal para evitar el daño a la estructura y a las plantas que refuerzan las barreras.

Las especies a plantar suelen ser gramíneas de tallo duro y porte erecto, no obstante, también se puede practicar en el campo, según (Camacho, sf) con sembrados de pastos, con cultivos como el maíz, fríjol, la piña; con una siembra en hileras dobles o a tres bolillos. AGEMA, MARENA, UNDP (sf) recomienda que el pasto se establezca a una distancia de un pie (20 a 30 cm.), los arbustos de 30 cm. a 1 metro, y los árboles y frutales a una distancia de 3 metros.

Por otro lado el pasto deberá tener por lo menos dos funciones, como barrera viva y forraje para nuestros ganados (res, ovejas, Conejos, etc); y la construcción de una barrera comienza con una excavación de 10 cm de profundidad, con una base superior de 60 cm de ancho y una base inferior de 40 cm de ancho en la parte superior de la barrera, la altura dependerá de la cantidad de piedra suelta en el terreno, pero no será mayor de 60 cm la distancia entre barrera dependerá de la pendiente del terreno y pueden construirse de 6 a 12 m entre cada barrera.

- **Zanjas de infiltración o ladera**

Según Camacho (sf) recomienda lo siguiente; para el establecimiento buenas prácticas como es las zanjas de infiltración o ladera:

Esta práctica consiste en la construcción de canales en la parcela, siguiendo curvas de nivel o desnivel trazadas con la ayuda del nivel A. También se denominan en muchos sitios como acequia de ladera.

Es necesario saber que la construcción de las zanjas debe estar acompañado por barreras vivas para su protección. En sitios donde los suelos presentan una textura franco-arcillosa, la capacidad de infiltración es de media a baja, por lo que se recomienda establecer zanjas profundas para favorecer la recarga hídrica.

La construcción se realiza con el aparato A, en sentido de las curvas de nivel, la distancia entre las zanjas depende del grado de la pendiente y las zanjas de ladera deben tener por lo menos 30 cm de ancho y 30 cm de profundidad.

- **Mulch**

González (sf) explica que, Consiste en la incorporación de diversos materiales orgánicos sobre el suelo que permite mantener la humedad del suelo. La aplicación de esta técnica estimula la actividad de los organismos del suelo, tales como las lombrices de tierra, que ayudan a mejorar la estructura del suelo aumentando la porosidad. A través de los espacios o poros, el agua se infiltra fácilmente, reduciendo así la escorrentía superficial del suelo. En general se recomienda que la capa de mulch sea entre 5 y 10 cm de grosor. Si hay problemas de drenaje deberá usar una capa de uno o dos cm para evitar el exceso de humedad en la zona de las raíces, lo que puede estresar a la planta y causar pudrición las raíces.

- **Diques de retención para estabilización de cárcavas**

SICTA; IICA; COSUDE (1999) afirma que, “la construcción de diques es solo una parte del plan integral de manejo de la parcela o de la cuenca, pero es esencial para recuperación de suelo del terreno,” lo cual, son muros ya sea de madera o piedras, construidos en forma de medialuna, siguiendo las curvas a nivel, para retener el suelo que es arrastrado por erosión hídrica y favorecer la estabilización de la cárcava.

CENTA (sf) recomienda que, para la construcción de estos es preferible utilizar madera sana libre de plagas y enfermedades. Algunas especies recomendadas son el madero negro (*Giricidia sepium*), tigüilote (*Cordia dentata*), laurel (*Cordia alliodora*), bambú (*Bambusa sp*) que son especies forestales con buena capacidad de rebrote. Su establecimiento debe ser antes de las lluvias en el mes de abril para que rebroten durante el invierno.

SICTA; IICA; COSUDE (1999) recomienda que, las construcciones del dique deben tener forma de medialuna con su base tres veces más ancha que el borde superior y una inclinación del talud de un 10%. La base del dique debe estar bien enterrada en el fondo de la cárcava y en los taludes, a unos 30 centímetros de profundidad por cada metro de altura del dique, El dique debe tener una superficie cóncava para evacuar controladamente las aguas acumuladas.

Según Dirección General de Servicio Pedagógico (sf) Desde una perspectiva técnico-científico, las pendientes con más del 50% son exclusivamente de vocación forestal. En terrenos con menos de 50%, se recomienda una distancia entre las prácticas en función de la pendiente (ver cuadro 18).

Cuadro 18. Distanciamiento entre las obras físicas de conservación de suelo según la pendiente.

Distancias entre obra según pendiente	Pendientes		
	suave menor de 15%	Moderada 15-30%	Fuerte 30- 50%
Barreras vivas	15-30 m	10-15 m	4-10 m
Barreras muertas	10-20 m	6-10 m	4 - 6 m
Acequias o Zanjas	10-20 m	8-10 m	6 - 8 m
Diques	4-12 m	2- 5 m	1.3-2 m

Fuente: (Dirección General de Servicio Pedagógico, (sf), pág. 58)

5.6.4. Educación ambiental

Es importante considerar la inclusión de la educación ambiental a nivel de educación primaria, secundaria y comunal para garantizar la sostenibilidad de las obras propuestas mediante la sensibilización de la población en su conjunto para el uso, aprovechamiento, manejo, conservación y restauración de los recursos naturales de manera responsable.

Esto implica, un proceso cuyos resultados serán visibles a largo plazo puesto que la meta es crear conciencia a todos los seres humanos con su entorno, por el cual, es importante promover que las personas adopten modos de vida que sean compatibles con el medio ambiente.

VI. CONCLUSIONES

Las características morfométricas que presenta la microcuenca del río La Carreta, indican que la respuesta hidrológica, de acuerdo con el tiempo de concentración de las aguas a la salida de esta, es lo suficiente para que el caudal del río se desplace de manera retardada. De modo que, en condiciones ideales de uso y manejo de la tierra, los procesos erosivos no serían tan severos.

La unidad de respuesta hidrológica que más aportan en términos de escurrimiento superficial y carga de sedimentos, son las que presentan superficies con suelos alfisoles, ocupados con agricultura, en pendientes moderadamente inclinadas a escarpadas (>15 %).

Las alternativas propuestas para la microcuenca incluyen aumento de la cobertura vegetal (sistemas agroforestales) y obras de conservación de suelos y agua, ya que contribuyen a la protección de suelo, reduciendo la velocidad del escurrimiento superficial, y por ende la erosión hídrica y propiciando una mayor infiltración del agua en el perfil del suelo.

VII. LITERATURA CITADA

- Torres Cruz, J. P., & Orozco Miranda, L. A. (2020). *Generar un índice de riesgo a degradación de suelos en la microcuenca Las Canoas en San Juan de Cinco Pinos y San Pedro de Potrero Grande, Chinandega 2019-2020*. Managua, Nicaragua.
- AGEMA, MARENA, UNDP. (sf). *BARRERAS MUERTAS DE PIEDRA*. Guatemala.
- Ares, M. G. (2014). *LLUVIA, ESCURRIMIENTO Y PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN UNA MICROCUENCA AGRÍCOLA DEL SISTEMA DE TANDILIA*. FCA Y F. Universidad Nacional de la Plata.
- Arnold, J., Kiniry, J., Srinivasan, R., Williams, J., Haney, E., & Neitsch, S. (13 de octubre de 2012). *SWAT*. Obtenido de Soil & Water Assessment Tool: Input/Output Documentation. Texas: Texas Water Resources Institute.: <http://swat.tamu.edu/media/69296/SWAT-IO-Documentation-2012.pdf>
- Barquero Ureña, A. (2015). *Modelación hidrológica en las cuencas San Jerónimo-Piedras, Río Blanco y Tenorio usando SWAT*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería Agrícola.
- Berry, J. K. (1987). *A mathematical structure for analyzing maps*. *J. Environmental Management*.
- Brutsaert, W. (2005). *Hydrology an introduction*. Cornell University, New York. US. New York, US.
- Camacho, N. A. (sf). *Manual de Buenas Prácticas para el Manejo de Cuencas Hidrográficas*. USA: USAID.
- Carvalho, E. (2006). *Evaluación del efecto de los cambios de cobertura sobre la producción de agua y sedimentos en la microcuenca quebrada La Virgen, Los Teques, Edo. Miranda*. Universidad Central de Venezuela.
- Casasola, F., Ibrahim, M., Sepúlveda, C., Ríos, N., & Tobar, D. (2009). *Políticas y sistemas de incentivos para el fomento y adopción de buenas prácticas agrícolas: Implementación de sistemas silvopastoriles y el pago de servicios ambientales en Esparza, Costa Rica: una herramienta para la adaptación al cambio climático*. 1ra ed. Turrialba, C.R: CATIE 292 pág. (Serie técnica. Informe Técnico / CATIE; No.377).
- CATIE, FAO, LEAD Y CIPAV. (2005). *Bancos forrajeros de especies leñosas*.
- CENTA. (sf). *GUÍA TÉCNICA DE CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA*. SALVADOR.
- CGIAR, CCAFS, ILRI Y CIAT. (12 de Marzo de 2020). Obtenido de Generador de archivos meteorológicos Marksim™ DSSAT: <http://gismap.ciat.cgiar.org/MarkSimGCM/#tabs-3>
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill Interamericana, S.A. Santafé de Bogotá. CO. 299 p.
- CIMADE. (1994). *Diagnostico Agro socioeconómico centro de información para el medio ambiente y el desarrollo*. Municipio de Cinco Pinos: Universidad centroamericana facultad de ciencias agropecuarias área de Desarrollo Agrario y Agronomía.

- 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*. Turrialba: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. República Dominicana.: CATIE.
- Dirección General de Servicio Pedagógico. ((sf)). *Manejo y conservación de suelos*. Honduras: Departamento de diseños Curricular.
- Espinoza Acuña, M. J. (2017). *Impacto del Cambio Climático en el comportamiento hidrológico de las cuencas hidrográficas, aplicando el modelo SWAT en Nicaragua*. Managua, Nicaragua: UNA.
- FAO. (20 de Septiembre de 2009). *Guía para la descripción de suelos*. Roma, Italia. Obtenido de <http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf>
- FAO,OEA. (2011). *Buenas prácticas; Barrera vivas*. Guatemala.
- Gamboa, H., Gómez, W., & Ibrahim, M. (s.f). *Buenas prácticas agrícolas para la adaptación al cambio climático. Capítulo 3: Sistema agroforestal Quesungual: una buena práctica de adaptación al cambio climático*. Obtenido de <http://www.sidalc.net/reprodoc/A3824e/A3824e.pdf>
- Gaspari, F. J. (2012). *Caracterización Morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina*. Séptimo congreso de medio ambiente AUMG. La Plata Argentina.
- González Ñamendy, B. A., & López Moncada, S. C. (2020). *Caracterización de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca del río La Carreta, municipio de Cinco Pinos, Chinandega (tesis de pregrado), Universidad Nacional Agraria, Nicaragua* .
- González, S. (sf). *Técnicas Apropriadas para Aplicar el Mulch*. Puerto Rico.
- Gopal, L. (2015). *Evaluación del Impacto de Cambios de Cobertura Vegetal en la Producción de Agua de la Cuenca del Río Güey (tesis ing.)*. Universidad Central de Venezuela, Maracay.
- Griggs, R. H., Jones, C. A., & Srinivasan, R. (13 de Mayo de 2021). Obtenido de Sistemas de información geográfica conexión con los modelos de simulación y aplicación a las materias relacionadas con la erosión: <http://www.fao.org/3/t2351s/T2351S04.htm>
- Gutiérrez Alarcón, M. C. (2004). *Simulación de la escorrentía y producción de sedimentos aplicando SWAT en las Microcuenca 7 Y 13, Subcuenca III, cuenca sur del lago de Managua, Nicaragua*. Managua: UNA.
- Herrera Castro, E., & Herrera López, D. (2009). *Evaluación de los Factores de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Municipio San José de los Remates*. Managua, Nicaragua: UNA.
- Horton, R. E. (1945). *Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology Geological Society of America Bulletin*. U.S.A.
- Huntington, J. H. (22 de Marzo de 2020). Obtenido de Climate Engine: Computación en la nube de datos declima y teledetección para monitoreo avanzado de recursos naturales y comprensión de procesos. Boletín de la American Meteorological Society, Recuperado el 22 de marzo del 2020: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/BAMS-D-15-00324.1>.
- INIDE. (2008). *CINCO PINOS en cifras: VII censo de población y IV de vivienda 2005*. Chinandega, Nicaragua. 4p.

- Iroume A., A. (1992). *Precipitación, escorrentía y producción de sedimentos en suspensión en una cuenca de sedimentos en suspensión en una cuenca cercana a Valdivia, Chile*. Valdivia, Chile: Instituto de Manejo Forestal, Universidad Austral.
- Jiménez, F. (2003). *Metodologías de Investigación en Sistemas Agroforestales: Medición de los componentes del balance hídrico en sistemas agroforestales*. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 13 p.
- Kirkby, M., & Morgan, R. (1984). *Erosión de suelo*. S.A. México. 368 p.
- Knisel, W. (1980). *CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems*. USDA: Conservation Research Rept.
- Lagos Tijerino, D. A., & Cruz Benavides, M. T. (2020). *Desarrollar un índice de riesgo de degradación del suelo a partir de indicadores ambientales en la microcuenca La Carreta, San Juan de Cinco Pinos, Nicaragua, 2019 - 2020*. Managua, Nicaragua.
- Leonard, R., Knisel, W., & Still, D. (1987). *GLEAMS: Groundwater loading effects on agricultural management systems*.
- MARENA;. (2000). *planes ambientales municipales departamento de Chinandega, Municipio de Cinco Pinos*. Managua, Nicaragua.
- Martínez, S. (8 de Octubre de 2020). *La prensa*. Obtenido de Ríos se secan por tala de árboles. La Prensa. Recuperado el 8 de octubre 2020:
<https://www.laprensa.com.ni/2010/04/20/departamentales/22227-rios-se-secan-por-tala-de-arboles>
- Mendieta López, M., & Rocha Molina, L. R. (2007). *Sistemas agroforestales*. Managua, Nicaragua: UNA.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (20 de Octubre de 2015). *Cambio Climático*. Obtenido de Bases Físicas. Guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC. Madrid: MAGRAMA: http://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/publicaciones/publicaciones/guia_resumida_ar5-ipcc_tcm7-311196.pdf
- Montagnini, F., Somarriba, E., Murgueitio, E., Fassola, H., & Eibl, B. (2015). *Sistemas Agroforestales. Funciones Productivas, Socioeconómicas y Ambientales*. Serie técnica. Informe técnico 402. CATIE, Turrialba, Costa Rica: Editorial CIPAV, Cali, Colombia. 454p.
- Morgan, R. (1997). *Erosión y conservaciones suelo*. Silsoe College, Cranfield University, España. 263 p.: Ediciones Mundi-Prensa.
- NASA, METI. (14 de Junio de 2019). Obtenido de Advanced spaceborne thermal emission and Reflection Radiometer: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>
- Oyuela, D. (1999). *Manual didáctico, capacitación de técnicos de UMAS*. Siguatepeque, Comayagua, Guatemala.
- Pérez Gallardo, S. (2001). *Modelo para evaluar la erosión hídrica en Colombia utilizando Sistemas de Información Geográfica*. Bogotá, Colombia.: Universidad Industrial de Santander.
- Ramírez, M., & Rodríguez, D. (13 de Mayo de 2015). *Revista NOVA*. Obtenido de Simulación y modelación de la producción de sedimentos en dos escenarios dominantes de ocupación de suelo

- en la cuenca hidrográfica del río Coello.:
<http://revistas.sena.edu.co/index.php/rnova/article/view/188/221>.
- Ríos, J. (2006). *Comportamiento hidrológico de sistemas de producción ganadera convencional y silvopastoril en la zona de recarga hídrica de la subcuenca del Río Jabonal, cuenca del Río Barranca, Costa Rica. Tesis Magister Scientiae. CATIE. Turrialba, CR.* Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Ríos, J. (2006). *Comportamiento hidrológico de sistemas de producción ganadera convencional y silvopastoril en la zona de recarga hídrica de la subcuenca del Río Jabonal, cuenca del Río Barranca, Costa Rica.* Tesis Magister Scientiae. CATIE. Turrialba, CR.
- Ríos, N., Ibrahim, M., Faustino, J., & FONANIFO. (15 de Octubre de 2019). *CATIE:Repositorio Institucional*. Obtenido de Uso del modelo SWAT para estimar la producción de sedimentos en una cuenca dominada por Ganadería: <http://hdl.handle.net/11554/7816>
- Salas Macías, C. A. (2011). *Comportamiento hidrológico y erosivo en usos de suelo prioritarios de la campiña lechera en Santa Cruz, Turrialba, Costa Rica.* Turrialba, Costa Rica.
- Salgado Pérez, J. J. (2018). *Efecto de obras de conservación de suelos en la diversidad de macroinvertebrados y sus parámetros fisicoquímicos en la Finca El Aguacatal Buena Vista, comunidad Plan Grande, Estelí, I semestre 2017.* Nicaragua.
- Salgado Pérez, J. J. (2018). *Efecto de obras de conservación de suelos en la diversidad de macroinvertebrados y sus parámetros fisicoquímicos en la Finca El Aguacatal Buena Vista, comunidad Plan Grande, Estelí, I semestre 2017.* Estelí, Nicaragua.
- Salgado, J., & Güitron de los Reyes, A. (17 de Noviembre de 2018). *revistatlalo*. Obtenido de Aplicabilidad de los modelos hidrológicos distribuidos, Acapulco, MX.: http://www.revistatlaloc.org.mx/amh_congreso/articulos/legislacionydocencia/319APLICABILIDAD_DE_LOS_MODELOS_HIDROLOGICOS_DISTRIBUIDOS_pdf
- Sánchez San Roman, F. J. (2010). *evapotranspiración.* Salamanca.
- Sánchez San Román, F. J. (17 de febrero de 2019). Obtenido de Hidrología. Hidrogeología. Universidad de Salamanca. Salamanca: <http://web.usal.es/javisan/hidro>
- Scherrer, S., & Naef, F. (2003). *A decision scheme to indicate dominant hydrological flow processes on temperate grassland.* Hydrol. Processes.
- SICTA; IICA; COSUDE;. (1999). *Obras de conservación de suelos y agua en laderas.* America Central.
- Tapasco, J., Quintero, M., Uribe, N., Valencia, J., Calderón, S., Romero, G., . . . Ludeña, D. A. (2015). *Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Recurso Hídrico. Calderón, S (Coords).* . Colombia: CEPAL, DNP, BID. Obtenido de Tapasco, J., Quintero, M., Uribe, N., Valencia, J., Calderón, S., Romero, G., Ordóñez, DA., Álvarez, A., Sánchez-Aragón, L., Ludeña, DA. (2015). Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Recurso Hídrico. Calderón, S (Coords). Colombia. CEPAL, .
- Treviño, E., Muñoz, C., Cavazos, C., & Barajas, L. (2002). *Evaluación del flujo hídrico superficial en la Sierra de San Carlos, Tamaulipas.* Ciencia UANL 5(4): 525-530. Universidad Autónoma de Leon. Monterrey, MX.

- Tuñón Colom, J. (2000). *Determinación experimental del balance hídrico del suelo y evaluación de la contaminación asociada a las prácticas agrícolas*. Tesis Doctoral. Universidad Jaume I. Departamento de Ciencias Experimentales. Castellón de la Plana. ES. 377 p.
- Ulloa, S., Mendoza, R. B., & Jiron, N. (1997). *Adopción de tecnologías de conservación de suelos y agua en Cinco Pinos y El Chaparral – Chinandega*. Managua, Nicaragua: INLES.
- UNESCO. (1986). *Manual de uso y conservación del agua en zonas rurales de América Latina y el Caribe: agua, vida y desarrollo, tomo 2*. Montevideo: INCA Editorial – Mendoza - Argentina. Obtenido de https://unesdoc.unesco.org/in/documentViewer.xhtml?v=2.1.196&id=p::usmarcdef_0000217078&file=/in/rest/annotationSVC/DownloadWatermarkedAttachment/attach_import_b25546b8-e6d4-4dd7-b64c-4ffaa237d927%3F_%3D217078spa.pdf&updateUrl=updateUrl1838&ark=/ark:/4822
- Unión Europea, IICA. (2015). *Sistematización de Buenas Prácticas de Adaptación del Sector Agropecuario ante el Cambio Climático*. San José: C.R: ISBN: 978-92-9248-605-1.
- Uribe, N. (2010). *Soil and Water Assessment Tool: Conceptos básicos y guía rápida para el usuario*. Temple - texas, USA: CIAT.
- Uribe, N. (2010). *Soil and Water Assessment Tool: Conceptos básicos y guía rápida para el usuario*. Temple - texas, USA: CIAT.
- Urrutia Rivas, M. A. (2016). *aplicación de modelo swat para la simulación hidrológico de la cuenca alta del rio san juan bajo la influencia de la minería*. tesis M sc, escuela colombiana de ingeniería julio garavito, Bogota D.C.
- William, J. R. (1975). *Sediment routing for agricultural watersheds*. *Wáter Re sour. Bull.*
- Williams, J. R., Jones, C. A., & Dyke, P. T. (1984). *A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity*.

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Balance hídrico de la microcuenca del río La Carreta (escenario histórico)

Microcuenca La Carreta - Escenario climático histórico (1990-2019)													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P	0.80	0.74	9.15	40.07	259.00	247.33	127.63	198.71	325.32	335.02	59.83	14.68	1618.26
Tmed	24.74	25.97	27.33	28.52	27.25	25.45	25.41	25.87	25.02	24.23	24.03	24.19	
Cálculo de Evapotranspiración potencial - Método Thornthwaite												a	3.45
T	24.74	25.97	27.33	28.52	27.25	25.45	25.41	25.87	25.02	24.23	24.03	24.19	
i	11.25	12.11	13.09	13.96	13.03	11.75	11.72	12.04	11.45	10.90	10.77	10.88	142.96
ETPsc	106.16	125.49	149.79	173.39	148.17	117.03	116.45	123.80	110.39	98.78	96.07	98.25	1463.78
e	0.97	0.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	0.95	0.94	
ETP	102.98	114.19	154.29	180.33	164.47	126.39	130.43	133.71	112.59	99.77	91.26	92.36	1502.77
Balance hídrico												CRAD	154.822
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P	0.80	0.74	9.15	40.07	259.00	247.33	127.63	198.71	325.32	335.02	59.83	14.68	1618.26
ETP	102.98	114.19	154.29	180.33	164.47	126.39	130.43	133.71	112.59	99.77	91.26	92.36	1502.77
P-ETP	-102.18	-113.46	-145.14	-140.26	94.53	120.94	-2.80	65.00	212.73	235.25	-31.44	-77.68	115.49
PPA	-211.29	-324.75	-469.89	-610.16	0.00	0.00	-2.80	0.00	0.00	0.00	-31.44	-109.11	
RES	39.55	19.00	7.44	3.01	154.82	154.82	152.05	154.82	154.82	154.82	126.37	76.52	
VR	-36.97	-20.54	-11.56	-4.43	151.81	0.00	-2.77	2.77	0.00	0.00	-28.45	-49.85	
ETR	37.77	21.28	20.71	44.50	164.47	126.39	130.40	133.71	112.59	99.77	88.28	64.53	1044.40
DEF	65.21	92.92	133.58	135.83	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	2.99	27.82	458.37
EXC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	120.94	0.00	62.23	212.73	235.25	0.00	0.00	631.14
DRE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	60.47	0.00	31.11	121.92	178.59	0.00	0.00	392.09

Anexo 2. Balance hídrico de la microcuenca del río La Carreta (escenario histórico)

Microcuenca La Carreta - Escenario climático pesimista (2050)													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P	5.84	5.56	1.77	6.64	464.83	435.82	193.13	496.27	149.09	295.08	9.53	25.01	2088.57
Tmed	26.75	26.67	28.04	28.86	29.89	29.21	28.63	28.56	27.91	28.18	27.47	25.01	27.93
Cálculo de Evapotranspiración potencial - Método Thornthwaite												a	4.26
T	26.75	26.67	28.04	28.86	29.89	29.21	28.63	28.56	27.91	28.18	27.47	25.01	
i	12.67	12.61	13.60	14.21	14.99	14.47	14.04	13.99	13.51	13.70	13.19	11.44	162.42
ETPsc	134.21	132.45	163.85	185.24	215.25	195.12	179.09	177.14	160.61	167.32	150.20	100.61	1961.08
e	0.97	0.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	0.95	0.94	
ETP	130.18	120.53	168.77	192.65	238.93	210.73	200.58	191.31	163.82	168.99	142.69	94.58	2023.75
Balance hídrico												CRAD	154.822
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P	5.84	5.56	1.77	6.64	464.83	435.82	193.13	496.27	149.09	295.08	9.53	25.01	2088.57
ETP	130.18	120.53	168.77	192.65	238.93	210.73	200.58	191.31	163.82	168.99	142.69	94.58	2023.75
P-ETP	-124.34	-114.97	-166.99	-186.00	225.91	225.09	-7.45	304.96	-14.73	126.09	-133.16	-69.57	64.83
PPA	-327.07	-442.04	-609.03	-795.03	0.00	0.00	-7.45	0.00	-14.73	0.00	-133.16	-202.73	
RES	18.72	8.91	3.03	0.91	154.82	154.82	147.55	154.82	140.77	154.82	65.51	41.80	
VR	-23.08	-9.81	-5.88	-2.12	153.91	0.00	-7.27	7.27	-14.05	14.05	-89.31	-23.71	
ETR	28.91	15.37	7.65	8.76	238.93	210.73	200.40	191.31	163.14	168.99	98.84	48.72	1381.77
DEF	101.27	105.15	161.11	183.88	0.00	0.00	0.18	0.00	0.68	0.00	43.85	45.86	641.98
EXC	0.00	0.00	0.00	0.00	72.00	225.09	0.00	297.69	0.00	112.03	0.00	0.00	706.81
DRE	0.00	0.00	0.00	0.00	36.00	130.54	0.00	148.84	0.00	56.02	0.00	0.00	371.40

Subunidad hidrológica	Clase de pendiente	Subgrupo de suelo y uso de la tierra																									Total general	
		LHEPTS				LUENTS							THALFS							THERTS								
		AGRL	FRSD	PAST	RNGB	AGRL	BARR	FRSD	FRSE	PAST	RNGB	URLD	AGRL	BARR	FRSD	FRSE	PAST	RNGB	URLD	AGRL	BARR	FRSD	FRSE	PAST	RNGB	URLD		
11	4-8%					0.05		0.03		0.03	0.01	0.00									0.05		0.05		0.06	0.01		0.29
	8-15%					0.11		0.19		0.20	0.13	0.00									0.00		0.01		0.01	0.00		0.65
	15-30%					0.05		0.10		0.15	0.09										0.00		0.00		0.00	0.00		0.40
	>30%					0.00		0.01																				0.01
	0-4%					0.01		0.01		0.01	0.00		0.00								0.05		0.01		0.05	0.01		0.15
12	4-8%					0.02		0.04		0.03	0.02		0.00		0.00						0.02		0.04		0.06	0.01		0.24
	8-15%					0.07		0.14		0.18	0.04		0.00		0.00						0.00		0.00		0.01	0.00		0.45
	15-30%					0.17		0.20		0.17	0.05		0.00		0.01								0.00		0.00			0.60
	>30%					0.04		0.13		0.04	0.01																	0.22
	0-4%					0.04		0.07	0.00	0.01	0.00														0.00			0.13
13	4-8%					0.17		0.14	0.01	0.04	0.03												0.00		0.01	0.00		0.40
	8-15%					0.37		0.30	0.00	0.11	0.09															0.00		0.87
	15-30%					0.27		0.40		0.16	0.12												0.00					0.95
	>30%					0.06		0.18		0.10	0.00																	0.35
	0-4%					0.05		0.02	0.02	0.01	0.01		0.02		0.00	0.03	0.01	0.01										0.19
14	4-8%					0.13		0.04	0.04	0.01	0.04		0.08	0.00	0.01	0.05	0.03	0.03									0.46	
	8-15%					0.34		0.12	0.08	0.05	0.08		0.23	0.00	0.04	0.06	0.05	0.07	0.00								1.12	
	15-30%					0.66		0.32	0.09	0.15	0.14		0.18	0.00	0.16	0.04	0.17	0.02	0.01								1.94	
	>30%					0.11		0.14	0.00	0.02	0.01		0.00		0.00		0.02											0.32
	0-4%					0.02		0.01	0.00	0.01			0.02			0.00												0.07
15	4-8%					0.07		0.03	0.00	0.01		0.00	0.04		0.00	0.01			0.00								0.16	
	8-15%					0.20		0.07		0.04		0.01	0.01															0.32
	15-30%					0.21		0.13		0.12	0.02	0.00																0.47
	>30%					0.02		0.07		0.08	0.01																	0.17
	0-4%					0.03		0.08	0.02	0.01		0.01	0.05		0.02	0.05	0.01											0.28
16	4-8%					0.17		0.09	0.07	0.03		0.00	0.17		0.04	0.08	0.03	0.00	0.00								0.68	
	8-15%					0.14		0.06	0.04	0.04			0.18		0.08	0.04	0.04	0.01	0.00								0.64	
	15-30%					0.19		0.12	0.04	0.06	0.01		0.14		0.08	0.00	0.12	0.01									0.77	
	>30%					0.07		0.11		0.02	0.01		0.01		0.01		0.00											0.23
	Total general	0.12	0.08	0.08	0.02	7.00	0.00	7.16	0.59	3.63	2.64	0.18	2.00	0.01	1.28	0.44	1.34	1.05	0.07	0.85	0.00	0.83	0.17	0.52	0.48	0.11	30.66	

*LHEPTS: Lithic haplustepts; LUENTS: Lithic Usthorents; THALFS: Typic haplustalFs; TherTs: Typic haplusterts;

AGRL: Agricultura; FRSD: Bosque latifoliado abierto; PAST: Pastura; RNGB: Vegetación arbustiva; BARR: Tierras sin vegetación; URLD: Zona urbana