UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

ESCUELA DE POSGRADO

UNIVERSIDAD NACIONAL
DE JAÉN

MAESTRÍA EN CAMBIO CLIMÁTICO, AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL SOSTENIBLE

DINÁMICA TERRITORIAL ASOCIADA AL CAMBIO DE COBERTURA FORESTAL Y SU IMPACTO EN LA RECARGA Y EROSIÓN HÍDRICA EN LAS UNIDADES HIDROGRÁFICAS DE LA PROVINCIA DE JAÉN

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN CAMBIO CLIMÁTICO, AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL SOSTENIBLE

Autor: Bach. Neyser Cruz Díaz Maldonado

Asesores: M.Sc. José Ney Ríos Ramírez

Dr. Manuel Emilio Milla Pino

Línea de investigación: Modelación hidrológica en cuencas hidrográficas

JAÉN – PERÚ

2026

Neyser Cruz Díaz Maldonado

Dinámica territorial asociada al cambio de cobertura forestal y su impacto en la recarga y erosión hídrica en las unidades hid...

Quick Submit

Quick Submit

Universidad Nacional de Jaen

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::1:3597147211

Fecha de entrega
18 jun 2026, 10:54 a.m. GMT-5

Fecha de descarga
18 jun 2026, 10:57 a.m. GMT-5

Nombre del archivo
DRICA_EN_LAS_UNIDADES_HIDROGR_FICAS_DE_LA_PROVINCIA_DE_JA_N.pdf

Tamaño del archivo
15.3 MB

125 páginas

29.418 palabras

162.905 caracteres



5% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

5%	Fuentes de Internet
1%	Publicaciones
2%	Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



ANEXO 16

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO (X) /DOCTOR( )

En la ciudad de Jaén, el día 15 de junio del año 2026, siendo las 10:00 horas, el sustentante **Neyser Cruz Díaz Maldonado** defiende en sesión pública presencial (X)/ a distancia ( ) la Tesis titulada: **DINÁMICA TERRITORIAL ASOCIADA AL CAMBIO DE COBERTURA FORESTAL Y SU IMPACTO EN LA RECARGA Y EROSIÓN HÍDRICA EN LAS UNIDADES HIDROGRÁFICAS DE LA PROVINCIA DE JAÉN** , para obtener el Grado Académico de Maestro (X)/Doctor ( ) En Cambio Climático, Agricultura y Desarrollo Rural Sostenible, ante el Jurado Evaluador conformado por:

Presidente: Dr. Cirilo Mario Caira Mamani

Secretario: Dr. Alexander Huamán Mera

Vocal: Mg. Annick Estefany Huaccha Castillo

El sustentante procedió hacer la exposición de la investigación, haciendo especial mención de sus aportaciones a la sociedad y/o ciencia. Terminada la defensa de la Tesis presentada, los miembros del Jurado Evaluador pasaron a exponer su opinión sobre la misma, formulando cuantas cuestiones y objeciones consideraron oportunas, las cuales fueron contestadas por el sustentante.

Tras la intervención de los miembros del Jurado Evaluador y las oportunas respuestas del sustentante, el Jurado Evaluador determinó la calificación global concedida a la sustentación de la Tesis de Maestría (X)/Doctorado (),en términos de:

Aprobado (y) por Unanimidad (y) / Mayoría ( ) Desaprobado ( )

Con la mención: En Cambio Climático, Agricultura y Desarrollo Rural Sostenible

- Aprobado con excelencia : 19 - 20 (19)
- Aprobado con distinción : 17-18 ( )
- Aprobado : 14-16 ( )
- Desaprobado : <14 ( )

Otorgada la calificación, el secretario del Jurado Evaluador lee la presente Acta en sesión pública.

Siendo las horas del mismo día y fecha, el Jurado Evaluador concluye el acto de sustentación de la Tesis para obtener el Grado Académico de Maestro (X)/Doctor ( ).

Dr. Cirilo Mario Caira Mamani

Dr. Alexander Huamán Mera

Mg. Annick Estefany Huaccha Castillo

OBSERVACIONES:

.....

.....

“Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana”

ANEXO N° 7:

Declaración Jurada de Autenticidad y de no plagio
de la Tesis o Trabajo de Investigación (posgrado)

Yo, Neyser Cruz Diaz Maldonado, egresado del Programa de Maestría en **Cambio Climático, Agricultura y Desarrollo Rural Sostenible** de la Universidad Nacional de Jaén, identificado con DNI 43181719

Declaro bajo juramento que:

7. Soy autor del trabajo titulado:

“Dinámica territorial asociada al cambio de cobertura forestal y su impacto en la recarga y erosión hídrica en las unidades hidrográficas de la provincia de Jaén”

El mismo que presento bajo la modalidad de tesis para optar el **Grado de Maestro** en **Ciencias en Cambio Climático, Agricultura y Desarrollo Rural Sostenible**.

8. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
9. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
10. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
11. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: Jaén, 08 de agosto de 2026



4. Indicar si es tesis, trabajo de investigación, trabajo académico o trabajo de suficiencia profesional.
5. Grado de Bachiller, Título profesional, Grado de Maestro o Grado de Doctor
6. Idéntica a DNI, no se admite digital salvo certificado

Dedicatoria

Dedico este trabajo principalmente a mis padres, Magdalena y Edilberto, quienes con su esfuerzo incansable sembraron en mí el deseo de superación. Gracias por creer en mí incluso cuando yo dudaba y por ser el ejemplo de vida que aspiro seguir.

A mi hermana Edita, por estar siempre presente y ser mi soporte moral.

Neyser Cruz Diaz Maldonado

Agradecimiento

Agradezco primeramente a Dios, por permitirme culminar este importante escalón en mi vida profesional con salud y bienestar.

A la Universidad Nacional de Jaén y a su Escuela de Posgrado, por abrirme las puertas de sus aulas y permitirme ser parte de la Maestría en Cambio Climático, Agricultura y Desarrollo Rural Sostenible, brindándome las herramientas necesarias para mi formación especializada.

De manera especial, expreso mi profunda gratitud a mis asesores, el M.Sc. José Ney Ríos Ramírez y el Dr. Manuel Emilio Milla Pino. Su rigurosidad académica, paciencia y orientación experta en el modelamiento hidrológico y análisis espacial fueron fundamentales para la materialización de esta investigación. Gracias por compartir sus conocimientos y elevar la calidad de este estudio.

A los docentes de la maestría, por sus enseñanzas que han enriquecido mi visión profesional sobre la gestión del territorio.

Finalmente, agradezco a mi familia por su comprensión durante las horas de ausencia dedicadas al estudio y la redacción de esta tesis.

I. ÍNDICE

I. ÍNDICE IV

II. RESUMEN XIII

III. INTRODUCCIÓN 1

IV. REVISIÓN DE LITERATURA 4

4.1. Antecedentes de la investigación 4

4.2. Bases teóricas 6

4.2.1. Cuenca hidrográfica 6

4.2.2. El territorio y su dinámica 6

4.2.3. Teledetección 7

4.2.4. Sensores remotos 7

4.2.4.1. Plataformas de teledetección 7

4.2.4.2. Procesamiento y análisis de imágenes satelitales 8

4.2.4.3. Teledetección y cobertura vegetal 9

4.2.4.4. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) 9

4.2.4.5. Proyección de la pérdida de cobertura vegetal 10

4.2.4.6. Land Change Modeler (LCM) 10

4.2.4.7. Método de modelización con cadenas de Markov 12

4.2.4.8. Algoritmo de automatismo celular 12

4.2.5. Modelo hidrológico 12

4.2.5.1. Modelo hidrológico SWAT 13

4.2.6. Escenarios de clima futuro 15

4.2.6.1. SSP2-4.5 16

4.2.6.2. SSP5-8.5 16

4.2.6.3. Modelo General de Circulación (MCG) 16

V. MATERIALES Y MÉTODOS 17

5.1. Tipo y diseño de estudio 17

5.2. Población, muestra y muestreo 17

5.2.1. Población 17

5.2.2. Muestra y muestreo 17

5.3. Variables intervinientes 18

5.3.1. Variables de entrada para el modelado 18

5.3.1.1. Cobertura y uso de la tierra 18

5.3.1.2. Propiedades del suelo 18

5.3.1.3. Topografía 19

5.3.1.4. Datos meteorológicos 19

5.3.2. Variables de Escenario 19

5.3.2.1. Escenarios de cambio climático 19

5.3.2.2. Periodos de tiempo 20

5.3.3. Variables de salida del modelo 20

5.3.3.1. Percolación (PERC) 20

5.3.3.2. Recarga hídrica (GW_Q) 20

5.3.3.3. Producción de sedimentos (SYLD) 21

5.3.3.4. Escorrentía superficial (SURQ) 21

5.4. Métodos 21

5.4.1. Ubicación 21

5.4.2. Instrumentos y equipos utilizados 22

5.4.3. Metodología 23

5.4.3.1. Obtención del límite geográfico 23

5.4.3.2. Usos y coberturas del suelo 23

5.4.3.3. Modelamiento hidrológico SWAT 27

5.4.3.3.1. Adquisición de insumos satelitales y cartográficos 29

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 38

6.1. Cambios en la cobertura y uso del suelo 38

6.1.1. Identificación y características de las categorías: 38

6.1.1.1. Áreas artificiales 38

6.1.1.2. Cuerpos de agua 38

6.1.1.3. Bosque 39

6.1.1.4. Vegetación secundaria 40

6.1.1.5. Agricultura 40

6.1.1.6. Pastizales/Herbazales 42

6.1.1.7. Suelos desnudos 43

6.1.1.8. Páramo 43

6.1.2. Análisis de cambios históricos (2000-2020) 44

6.1.3. Proyección de cambios futuros (2020-2040) 49

6.2. Modelación hidrológica: Línea base (2000-2020) 53

6.2.1. Área de estudio y configuración del modelo 53

6.2.2. Componentes del balance hidrológico de la Línea Base (2003–2020) 55

6.2.3. Producción de sedimentos (SYLD - Línea base) 58

6.2.4. Percolación (PERCmm - Línea base) 62

6.3. Proyecciones bajo escenarios de Cambio Climático (2040) 75

6.3.1. Anomalías climáticas proyectadas (2021-2040) 75

6.3.2. Impacto en los componentes del balance hidrológico 76

6.3.3. Impacto en la recarga hídrica (GW_Q) 78

6.3.4. Dinámica de la percolación (PERCmm) 79

6.3.5. Impacto en la producción de sedimentos (SYLD).....80

6.3.6. Dinámica de la escorrentía superficial (SURQ).....82

6.4. Discusiones.....83

6.4.1. La expansión de pastizales como principal motor de cambio territorial.....83

6.4.2. La conexión causa-efecto: Cómo la transformación del paisaje degrada los servicios hídricos.....84

6.4.3. El rol paradójico de la agricultura intensiva: Los arrozales como "Puntos Calientes" de recarga inducida.....85

6.4.4. Cambio Climático: Un multiplicador del riesgo hídrico.....86

6.4.5. Limitaciones de la investigación y futuras direcciones.....86

VII. CONCLUSIONES.....87

VIII. RECOMENDACIONES.....88

8.1. Para los gobiernos locales y regionales.....88

8.2. Para el sector productivo.....89

8.3. Para la academia y futuras investigaciones.....90

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....93

X. ANEXOS.....101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 *Clasificación de Erosión del Suelo según Criterios del SENAMHI* 29

Tabla 2 *Insumos del modelo SWAT* 30

Tabla 3 *Asignado de código SWAT a las coberturas de suelo* 31

Tabla 4 *Parámetros fisicoquímicos de suelos requeridos por SWAT*.....33

Tabla 5 *Tipos de suelo identificados para la Provincia de Jaen*.....35

Tabla 6 *Ubicación geográfica de estaciones meteorológicas* 36

Tabla 7 *Ocupación (%) de cobertura y uso del suelo para el periodo 2000-2020*.....45

Tabla 8 *Comparativo en hectáreas para el 2000-2020 y proyectado al 2040*.....50

Tabla 9 *Parámetros geofisicos del área evaluada* 54

Tabla 10 *Cálculos de componentes del balance hidrológico* 57

Tabla 11 *Aporte de Sedimentos de las 15 Subcuencas Prioritarias en la Provincia de Jaén*.....60

Tabla 12 *Aporte de Percolación de las 15 Subcuencas Prioritarias en la Provincia de Jaén*.....64

Tabla 13 *Niveles de erosión y distribución de área en la zona de estudio*.....68

Tabla 14 *Niveles de erosión por rangos de pendientes* 71

Tabla 15 *Distribución de usos y coberturas y/o otras características de la zona de estudio*.....73

Tabla 16 *Anomalías climáticas, para los escenarios SPP2-4.5 y SPP5-8.5* 75

Tabla 17 *Comparativo de escenarios actual, SPP2-4.5 y SPP5-8.5*.....77

Tabla 18 *Variación (%) de los escenarios SPP2-4.5 y SPP5-8.5 versus el escenario actual* 78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 *Representación conceptual del ciclo hidrológico en el modelo SWAT*.....14

Figura 2 *Esquema conceptual de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU)* 15

Figura 3 *Ubicación geográfica del área de estudio en la provincia de Jaén*.....22

Figura 4 *Evolución espacio-temporal de la cobertura y uso del suelo (2000-2020)* 24

Figura 5 *Código de procesamiento en Google Earth Engine para asignación de bandas, integración del Modelo Digital de Elevación y corrección de escala* 25

Figura 6 *Código en Google Earth Engine para la generación de imágenes compuestas mediante colecciones Landsat 5, 7 y 8.* 26

Figura 7 *Implementación del algoritmo Random Forest y evaluación de precisión mediante el índice Kappa* 26

Figura 8 *Proyección espacial de cobertura al año 2040 mediante el módulo Land Change Modeler* 27

Figura 9 *Caracterización edafológica mediante la interfaz del software SPAW-USDA* 32

Figura 10 *Determinación del grupo hidrológico de suelos mediante el software NumCur* 33

Figura 11 *Distribución espacial de las unidades edafológicas en la provincia de Jaén* 35

Figura 12 *Caracterización y expansión territorial de las áreas artificiales.* 38

Figura 13 *Tipología y distribución de los cuerpos de agua en el área de estudio*.....39

Figura 14 *Caracterización fisonómica de la cobertura forestal* 39

Figura 15 *Dinámica de transición y características del paisaje de vegetación secundaria* 40

Figura 16 *Tipología de cultivos agrícolas y su impacto visual en el ecosistema edáfico.* 41

Figura 17 *Distribución de la cobertura tipo pastizal y herbazal según características geomorfológicas y altitudinales*.....42

Figura 18 *Presencia de suelos desnudos identificados en ecosistemas de laderas y valles.*.....43

Figura 19 *Cobertura de páramos andinos y su contexto de recarga hidrológica.*.....44

Figura 20 *Representatividad espacial de las categorías de uso de suelo por periodo de evaluación*.....46

Figura 21 *Distribución espacial del uso y cobertura del suelo en el periodo 2000-2005* 47

Figura 22 *Distribución espacial del uso y cobertura del suelo en el periodo 2018-2020* 47

Figura 23 *Dinámica de ganancias y pérdidas porcentuales en categorías de cobertura terrestre (2000-2020)* 48

Figura 24 *Variación temporal de la superficie territorial: periodos históricos y proyección climática*.....51

Figura 25 *Proyección espacial del uso y cobertura del suelo bajo escenarios climáticos al año 2040.* 51

Figura 26 *Proyección de ganancias y pérdidas porcentuales de la cobertura terrestre al año 2040*.....52

Figura 27 *Ámbito geográfico de simulación hidrológica en la provincia de Jaén* 54

Figura 28 *Discretización espacial de unidades hidrográficas y subcuencas modeladas* 55

Figura 29 *Componentes del balance hidrológico anual promedio en el área de estudio* 56

Figura 30 *Clasificación y distribución porcentual de pendientes topográficas*.....58

Figura 31 *Distribución espacial de la tasa de producción de sedimentos*.....59

Figura 32 *Relación entre la producción de sedimentos y la superficie de las subcuencas prioritarias*.....61

Figura 33 *Identificación de subcuencas con nivel crítico en la producción de sedimentos* 62

Figura 34 *Distribución espacial de las tasas de percolación en el subsuelo*.....63

Figura 35 *Relación entre la tasa de percolación y la extensión territorial de subcuencas prioritarias* 65

Figura 36 *Localización de las subcuencas con mayor capacidad de percolación*.....66

Figura 37 *Dinámica espacial de la precipitación media anual* 67

Figura 38 *Clasificación espacial de la vulnerabilidad a la erosión hídrica*.....69

Figura 39 *Modelo Digital de Elevación y clasificación de pisos altitudinales* 70

Figura 40 *Tasas de percolación modeladas a escala de Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU)*.....74

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 *Scrip de Google Earth Engine (GEE) de clasificación supervisada Random Forest*.....101

Anexo 2 *Descripción de Grupo Hidrológico*.....104

Anexo 3 *Descripción del tipo de suelo y la influencia en la Modelación Hidrológica* 105

Anexo 4 *Aporte de sedimentos (SYLDt_ha) de las 168 Subcuencas de la Provincia de Jaén*.....109

Anexo 5 *Aporte de percolación (PERCmm) de las 168 Subcuencas de la Provincia de Jaén*.....111

II. RESUMEN

La seguridad hídrica en Jaén enfrenta una doble amenaza: la transformación del paisaje y el cambio climático. La investigación analizó el impacto del cambio de cobertura del suelo sobre la recarga y erosión hídrica en la provincia. La metodología integró teledetección y el modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) para cuantificar las dinámicas territoriales. Se analizó el periodo histórico (2000-2020) y proyectado al 2040, evaluando la presión climática futura mediante escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Los resultados revelan un impacto hidrológico dual. En laderas, la dinámica principal es la expansión de pastizales/herbazales (37,001.8 ha) a expensas de bosques, degradando la regulación hídrica al aumentar la erosión. Sin embargo, en zonas bajas, la agricultura de riego intensivo (arrozales) genera alta percolación (> 400 mm/año), creando una recarga inducida que contrasta con la función de los ecosistemas naturales. El análisis de escenarios climáticos revela un riesgo agravado. Ambos proyectan un aumento de la evapotranspiración, indicando mayor estrés hídrico. El escenario SSP2-4.5 sugiere un futuro más árido, con una disminución de la recarga hídrica del -5.60%, mientras que el SSP5-8.5 apunta a un futuro de extremos, con un aumento de la escorrentía y la erosión del +4.35%. Se concluye que la seguridad hídrica es alterada de forma compleja, por la degradación de suelos en laderas y la creación de una recarga artificial en zonas bajas, con interrogantes sobre su sostenibilidad. Sumado a las presiones climáticas, la investigación subraya la urgencia de políticas diferenciadas para la conservación en cabeceras y el manejo sostenible del agua en zonas agrícolas.

Palabras clave: Cambio de uso de suelo, modelo hidrológico SWAT, cambio climático, ordenamiento territorial, sostenibilidad hídrica

III. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos 50 años, los procesos de cambio en lo social, económico y la población han tenido un impacto significativo en la mayoría de los paisajes del mundo. La segunda revolución industrial fue el detonante que impulsó la metamorfosis social y espacial acontecida (Gimenez & García, 2023). La intensidad de las transformaciones ha provocado una reorganización de usos y coberturas de suelo sin precedentes, aspecto que se ve representado en el nuevo escenario territorial generado (Cuchia & Flórez, 2022).

Para Martínez et al. (2019), las dinámicas de cambio de uso y cobertura del suelo (CCUS) representan uno de los mayores contribuyentes al cambio ambiental global, al actuar como uno de los principales procesos generadores de transformaciones en los ecosistemas naturales.

En la región andina, la pérdida de biodiversidad es una consecuencia directa de la transformación de los ecosistemas, impulsada principalmente por la expansión de la frontera agrícola y ganadera Maquera (2020). Si bien el aumento poblacional y la demanda de recursos generan fuertes presiones antropogénicas sobre la tierra, diversos investigadores sostienen que estas dinámicas de cambio de uso de suelo responden, fundamentalmente, al modelo económico vigente.

Los estudios de cambio de uso de suelo y vegetación son el referente para conocer las trayectorias de distintos procesos asociados con la deforestación, degradación y perturbación de los bosques, erosión y desertificación del suelo, pérdida de la biodiversidad, entre otros (García, 2022).

Según Zumaeta (2019) , si bien el monitoreo de procesos como la deforestación y la expansión urbana se realiza mediante el estudio de los cambios de uso y cobertura del suelo, la literatura sugiere que el análisis retrospectivo no es suficiente. Por tanto, resulta indispensable complementar estos estudios con modelos de simulación que permitan predecir la transformación del territorio y sus efectos a mediano y largo plazo.

Mediante el incremento significativo de la calidad de los datos de teledetección y la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG), es posible conocer la dinámica de los cambios de uso en diferentes periodos, además de entender cómo y por qué ocurren estos cambios; inclusive permite identificar áreas más susceptibles a

presentar cambios, de modo que es fundamental en la toma de decisiones para la planificación de un territorio (Maquera, 2020). Estos modelos juegan un papel importante al momento de explorar posibles desarrollos futuros, se podría explorar la incógnita de "qué pasaría si", a través de diferentes escenarios (Zumaeta, 2019). La simulación de escenario de uso del suelo puede entonces ser tomada como una herramienta o un instrumento importante sobre el cual apoyarse para diseñar ordenaciones futuras del territorio (Barrenechea & Álvarez, 2019).

Los desafíos en la gestión de los recursos naturales ante las crecientes demandas de alimento, agua, fibra y energía, sumados a la degradación de los ecosistemas y la pérdida de sus funciones, requieren de un enfoque que permita su gestión de forma integral y que asegure obtener los bienes y servicios que sustentan la vida humana, sin comprometer la provisión de los mismos en el futuro (Achkar et al. 2014).

Las dimensiones sociales, ambientales y culturales se ven influenciadas por la economía global en el planeta. La transformación de los procesos productivos y sus formas territoriales tiene una incidencia directa en las interacciones sociales. Este hecho adquiere otros matices en regiones pobres y en aquellas identificadas como "potenciales" o "ganadoras", donde las transformaciones económicas afectan de manera considerable los patrones socioculturales, bajo los cuales los actores sociales configuran sus territorios (Vargas, 2009).

Los beneficios que la naturaleza brinda a los humanos se llaman servicios de los ecosistemas, y estos son esenciales para el bienestar, tanto directa como indirectamente. En el informe La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio del 2005, se clasifican en cuatro tipos de servicios: 1) de provisión (alimentos, agua, energía); 2) de regulación (como la purificación del agua y la regulación climática); 3) culturales (educación, ocio) y 4) de soporte, que mantienen los servicios (ciclo de nutrientes, formación del suelo).

Esta dinámica nacional de cambio de uso de suelo encuentra un preocupante reflejo en la Provincia de Jaén, un territorio estratégico en la selva alta del norte peruano. Jaén se ha consolidado como uno de los principales centros de producción de café especial del país, un motor económico que, si bien ha impulsado el desarrollo local, también ha ejercido una presión creciente sobre sus ecosistemas naturales. La expansión de la frontera agrícola, a menudo a expensas de los bosques, intensifica la demanda sobre los

recursos hídricos y degrada los suelos. Sumado a esto, la provincia presenta una alta vulnerabilidad a los efectos del cambio climático, como la alteración de los patrones de lluvia, lo que agrava la incertidumbre sobre la disponibilidad futura de agua.

En este escenario, comprender cuantitativamente la relación bosque-agua es crucial. La alteración de la cobertura forestal impacta directamente en la recarga de acuíferos y en los procesos de erosión hídrica, afectando la seguridad hídrica para el consumo humano y las actividades productivas

La presente investigación se justifica por la necesidad urgente de generar información científica que permita una gestión territorial sostenible en la Provincia de Jaén. Actualmente, existe un vacío de conocimiento sobre los impactos cuantitativos que la histórica expansión de la frontera agrícola ha tenido sobre los servicios ecosistémicos hídricos a escala provincial. Por ello, este estudio es fundamental al proporcionar (1) una cuantificación precisa de la relación causa-efecto entre el cambio de cobertura forestal y la respuesta hidrológica en términos de recarga y erosión hídrica; (2) un análisis a nivel de todas las unidades hidrográficas de la provincia, superando el enfoque de estudios de caso aislados; y (3) una línea base robusta, generada con herramientas de teledetección y modelamiento avanzado, indispensable para la formulación de políticas de ordenamiento territorial y estrategias de adaptación al cambio climático que busquen equilibrar la producción agrícola y la seguridad hídrica de la región.

Para abordar esta problemática y generar conocimiento científico aplicable a la gestión territorial, esta investigación buscó responder a la siguiente pregunta: ¿Cuál es el impacto de la dinámica territorial, asociada al cambio de cobertura forestal, sobre la recarga y la erosión hídrica en las unidades hidrográficas de la Provincia de Jaén bajo escenarios de cambio climático? Para ello, se estableció como objetivo general evaluar los impactos hidrológicos derivados de los cambios de uso de suelo y las proyecciones climáticas. El cumplimiento de este objetivo se articuló a través de tres metas específicas: primero, la delimitación geográfica de las unidades hidrográficas de la provincia; segundo, la caracterización de las dinámicas territoriales históricas (2000-2020) y futuras (2040) del uso y cobertura del suelo; y tercero, la simulación y cuantificación de los impactos conjuntos de dichas dinámicas y los escenarios de cambio climático sobre la recarga y erosión hídrica. La investigación se fundamentó en la hipótesis de que la pérdida

de cobertura forestal propicia un impacto negativo cuantificable en la respuesta hidrológica de las cuencas, exacerbado por las proyecciones climáticas futuras.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Antecedentes de la investigación

Rosero Mier (2018), en su tesis de maestría sobre la cuenca del río Tahuando (Ecuador), realizó un análisis multitemporal, determinó que las principales causas del cambio de uso y cobertura del suelo son la ganadería, la agricultura (asociada a baja productividad del suelo) y el crecimiento demográfico en zonas pobladas. En ese mismo estudio concluyó que la predicción para el periodo 2017-2031, la cobertura vegetal experimentará cambios, reflejados en la pérdida anual de 17.15 ha de agricultura y 18.21 ha de cobertura vegetal, y en un incremento de 0.35 ha/año en ganadería y 31.74 ha/año en zonas pobladas.

En Perú Loayza et al. (2017) evaluaron la expansión urbana y las modificaciones de la cobertura vegetal en el distrito de Végueta-Lima, utilizando imágenes satelitales Landsat de 1986, 2001, 2005 y 2010. Este estudio encontró que la expansión urbana aumentó de 0.9% a 7.7% entre 1986 y 2014, mientras que la cobertura vegetal se redujo de 18% a 8.2% en el mismo periodo.

Por su parte Maquera (2020) analizó el cambio de la cobertura y uso del suelo en la Región Tacna durante 2007-2017 mediante fotointerpretación de imágenes LANDSAT y clasificación supervisada (CLC). Determinó que, en 2007, el bosque y áreas naturales dominaban (94.47%), seguidas por áreas agrícolas (3.51%). Las áreas artificializadas, húmedas y cuerpos de agua representaban 0.88%, 0.895% y 0.25% respectivamente.

Asimismo, en la Microcuenca Yuyac - Chachapoyas, la simulación de cambios de uso del suelo y pérdida de cobertura vegetal al año 2030 Zumaeta (2019) registró una disminución de 129.40 ha de cobertura boscosa y un crecimiento de 161.90 ha de mosaico de pastos y cultivos entre 2018 y 2030. Se observó una mayor concentración de pérdidas cerca de centros poblados, red hídrica y vial.

Según el Gobierno Regional de Cajamarca (2014) afirma que la conversión de áreas con vegetación arbórea y arbustiva en zonas agrícolas diversas ha provocado graves

alteraciones en los servicios ecosistémicos. La afectación se debe principalmente a actividades humanas que alteran la naciente de los ríos, como la agricultura, ganadería, deforestación, tala de los bosques, y la minería en las zonas altas de las cuencas, lo cual repercute en el agua y la biodiversidad.

Teodor (2022) estudió la Cuenca del Río Santa (1981-2014) y estimó que la erosión hídrica influye 0.3040 veces más en la producción de sedimentos.

Arriaga (2021) concluyó en su estudio de maestría que el aporte de producción de sedimentos está determinado por la dinámica de manejo de los usos y coberturas de suelo y no necesariamente por la cantidad de área, por ejemplo, los cultivos con menores áreas de distribución aportan más producción de sedimentos comparado a otros usos y coberturas con mayores áreas de distribución y menores aportes de sedimentos.

Finalmente Martínez, (2019) explicó que el cambio de cobertura vegetal incide directamente en las características físicas e hidráulicas del suelo, lo que puede resultar en la pérdida del "efecto esponja" y un aumento del escurrimiento y la erosión tras la remoción del bosque. Con base en su modelación, tomando como línea base el periodo 1963-1984, estimó proyecciones para 2040 bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5:

- Reducción de precipitación: 2.96% (51.2 mm/año) para RCP4.5 y 3.6% (62.3 mm/año) para RCP8.5.
- Reducción promedio en la producción de agua: 5.8% (39.6 mm).
- Aumento en la erosión: 20.6% (4.67 t/Ha/año) para RCP4.5 y 18.5% (4.18 t/Ha/año) para RCP8.5, frente a las 22.6 t/Ha/año de la línea base.

Si bien los antecedentes revisados a nivel internacional, nacional y local sientan bases importantes sobre las dinámicas de cambio de uso de suelo y sus consecuencias ecológicas, en conjunto revelan un vacío de conocimiento crucial para la región nororiental del Perú. Los estudios previos en la zona se han centrado principalmente en la caracterización de la deforestación o en análisis hidrológicos de cuencas específicas, sin llegar a integrar ambos componentes en un análisis cuantitativo de causa-efecto. Por tanto, la presente investigación genera un aporte sustancial al construir sobre estos hallazgos, aplicando por primera vez un modelo hidrológico SWAT para cuantificar de manera explícita el impacto que la transformación histórica del cambio de uso de suelo

ha tenido sobre los servicios ecosistémicos de regulación hídrica y control de la erosión a escala de toda la Provincia de Jaén.

4.2. Bases teóricas

4.2.1. Cuenca hidrográfica

Según Harbaugh (1972) citado por Araque et al. (2019) la cuenca hidrográfica es un área definida topográficamente, drenada por un curso de agua o un sistema conectado de cursos de agua, que dispone de una salida simple para que el caudal efluente sea descargado.

La cuenca hidrográfica debe ser entendida como una unidad básica para el análisis ambiental, permite conocer y evaluar sus diversos componentes y los procesos e interacciones que en ella ocurren (Moreira et al. 2020).

Cuenca hidrológica es la unidad natural de distribución del agua en la superficie terrestre, que representa el medio natural físico asociado a los recursos hídricos y que juega un rol decisivo en la formación del medio ambiente y, sobre todo, en todo el desarrollo humano. El agua ocupa un lugar especial en la base de la pirámide medioambiental. En este sentido, la cuenca hidrológica juega un papel importante para el resto del territorio como componente natural, social y económico importante, dado el papel específico de la cuenca en el ciclo hidrológico que capta, concentra y distribuye el suministro de agua sedimentada (Galiano & Suarez, 2023).

4.2.2. El territorio y su dinámica

El concepto de territorio está ligado íntimamente con el de espacialidad, se ha utilizado como sinónimo de espacio, lugar y espacio geográfico, términos que resultan poco precisos y denotan un carácter inmóvil Mahecha (2016). El autor sostiene que hay otras formas de definir el territorio, más exactas y con una dimensión social importante, que lo ven como un espacio apropiado y normado, con fronteras claras. Estas dos definiciones son dos casos concretos de una clase más amplia de espacios que comprende todos los objetos definidos por un continuo topográfico métrico. Boscherini & Poma (2000) distingue entre las dos grandes familias métricas: la topográfica, que comprende

objetos espacialmente continuos, y la topológica, que comprende las redes y rizomas, y define el territorio como un espacio topográfico métrico.

4.2.3. Teledetección

Para Veneros et al. (2020) es una técnica que permite obtener información a distancia de los objetos sobre la superficie terrestre. Consiste en tres componentes esenciales: el dispositivo que capta la información, el elemento que se estudia y la energía que los conecta. Las imágenes de satélite son la herramienta principal utilizada en la teledetección. Además, el segundo elemento, que es la información georreferenciada, se almacena, manipula y analiza mediante otra herramienta que complementa la teledetección.

Cuando se analiza el comportamiento espectral de la vegetación y el comportamiento espectral de la cobertura forestal, observamos que la reflectividad se ve afectada por factores como la geometría y posición de las hojas, ángulo de observación, lignina y el tipo de suelo (Martínez & Solís, 2018).

4.2.4. Sensores remotos

Instrumentos que estudian algo sin estar en contacto directo con ello permiten obtener información rápida y fiable de un objeto, área o fenómeno. Estos son los sensores remotos, que se pueden analizar e interpretar usando Sistemas de Información Geográfica (SIG) para mejorar el entendimiento. Los sensores remotos instalados en una base son los más usados, y registran la energía electromagnética que la superficie de un objeto devuelve o libera en distintas bandas del espectro electromagnético. Estas bandas incluyen longitudes de onda que van desde las más pequeñas (gamma y rayos X) hasta las más grandes (microondas y ondas de radio). Dentro de las longitudes de onda más cortas están las ultravioleta, que son muy prácticas para los sensores (Veneros et al. 2020).

4.2.4.1. Plataformas de teledetección

Los sensores son los equipos que se usan para captar, guardar y enviar a distancia las imágenes, y se transportan en satélites (SPOT, LANDSAT, METEOSAT, etc.) o aviones. Existen tres tipos de plataformas según lo lejos que estén de la superficie de la tierra: Las superficiales, las aéreas y las que orbitan. Estas imágenes satelitales son los

datos que provienen de estos satélites y que se usan para diversos análisis sobre el estado de la tierra, los tipos de vegetación, los cuerpos de agua, el calor de la superficie y el aire, entre otros. Los estudios de cobertura vegetal usan las imágenes multiespectrales. Por ejemplo, para estimar la cantidad de biomasa, evaluar los índices de vegetación, detectar las plagas de la vegetación, monitorear los bosques, medir el alcance de incendios y minería. También, para estudios de recursos hídricos como el movimiento de masas de agua, estrés hídrico, existencia de agentes contaminantes, etc. Para investigaciones en suelos como clases de suelos, grado de humedad, y además pueden contribuir a diferenciar rocas superficiales. Igualmente, para estudios de la atmósfera, donde se puede analizar la calidad del aire y contaminantes (Veneros et al. 2020).

4.2.4.2. Procesamiento y análisis de imágenes satelitales

Para mejorar la información que se obtiene de las imágenes satelitales descargadas, se deben aplicar métodos que corrijan las imperfecciones que presentan. Mediante correcciones geométricas, radiométricas y atmosféricas, se logran mejoras en el contraste y el color de estas imágenes. También mejoran el contraste al aumentar la calidad visual de la imagen e incluyen aquellas técnicas de expansión y comprensión de su histograma para adaptarlo al dispositivo de salida Liu et al. (2019).

- La corrección radiométrica consiste en ajustar los valores de la imagen y eliminar cualquier irregularidad en la radiancia del objetivo que haya sido modificada por la atmósfera o por los errores del sensor.

- La georreferenciación o corrección geométrica consiste en ajustar la imagen a un sistema de coordenadas y a una proyección cartográfica específica. Las distorsiones pueden ser originadas por movimientos en la plataforma, cambios en la altitud de plataforma, rotación de la tierra y/o relieve del terreno.

- La corrección atmosférica busca quitar la influencia de los aerosoles y la radiancia intrínseca que se observa en la imagen, como resultado de la interacción del sensor con la atmósfera.

El propósito de clasificar las imágenes satelitales es agrupar todos los píxeles en una o varias clases temáticas, usando la reflectancia de cada píxel en distintas longitudes de onda y un criterio estadístico para asignarlo a una clase espectral que corresponda

a un tipo de cobertura terrestre. La información categorizada es usada para generar mapas temáticos. Los métodos de clasificación comúnmente son de dos tipos, de acuerdo con la manera en la que se obtienen las estadísticas de las categorías definidas durante la fase de entrenamiento: métodos supervisados y métodos no supervisados (Veneros et al. 2020).

4.2.4.3.Teledetección y cobertura vegetal

El estudio de la cobertura vegetal se inició como una de las primeras líneas de investigación para valorar y gestionar los recursos naturales. Las imágenes de satélite fueron empleadas, sobre todo tras el inicio de la serie LANDSAT en 1972. Los sistemas satelitales de observación de la Tierra ofrecieron imágenes multitemporales que son usadas ampliamente para evaluar y monitorear el estado de la vegetación, en los niveles global, regional, nacional y local (Duque et al. 2016). El Índice de Vegetación, que mide la reflectancia a distintas longitudes de onda y que capta la sensibilidad de la cubierta, es el parámetro que se usa para realizar la medición. También, se trata de un número que resulta de mezclar distintas bandas espectrales y que puede tener que ver con la cantidad de vegetación que hay en un píxel específico. Estos índices, son utilizados para mejorar la discriminación entre el suelo y la vegetación, reduciendo el efecto del relieve en la caracterización espectral de las diferentes cubiertas (Mancera, 2019).

4.2.4.4. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Este índice se basa en el peculiar comportamiento radiométrico de la vegetación, relacionado con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, permitiendo determinar la vigorosidad de la planta (Carrera, 2021).

Se utiliza para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético, minimiza efectos topográficos y produce escala lineal de medición (Jiang et al. 2006).

La escala va de -1 a 1, y el valor cero indica el lugar aproximado donde empieza la ausencia de vegetación. Los valores negativos representan superficies sin vegetación Huang et al. (2021). La normalización se utiliza para reducir el efecto de la degradación

de calibración del sensor y la influencia de los efectos atmosféricos en los datos de teledetección.

El cálculo del NDVI implica el uso de la siguiente Ecuación (1) con dos bandas, el Infrarrojo Cercano (NIR) y el rojo (RED) (Carrera, 2021).

$$\text{NDVI}= \frac{NIR-GREEN}{NIR*GREEN} \qquad \text{Ecuación (1)}$$

El análisis multitemporal de imágenes de satélite Lansadt, nos permite hacer un seguimiento de la evolución de las diferentes comunidades vegetales y de los cultivos agrícolas, integrados a los sistemas de información de geográfica (Carrera, 2021).

El objetivo es adaptar la vegetación según su reflectancia en diferentes longitudes de onda y minimizar la información de condiciones de estrés. Los NDVI se tratan de imágenes calculadas a partir de operaciones algebraicas entre distintas bandas espectrales de diferentes imágenes satelitales (Carrera, 2021).

4.2.4.5. Proyección de la pérdida de cobertura vegetal

La reducción o desaparición de la cubierta vegetal significa que la superficie terrestre pierde la capa de vegetación que la cubría en una zona específica. Esto puede deberse a acciones humanas como la tala de árboles, la construcción de ciudades o el cultivo extensivo. Esta pérdida afecta de manera importante la estabilidad del ecosistema, favorece el cambio climático al soltar carbono que estaba en la vegetación, y puede provocar la disminución de biodiversidad y el deterioro del suelo.

Para Rosero Mier (2018) la proyección tiene como fin determinar áreas con mayor susceptibilidad a ser afectadas por procesos de conversión de ecosistemas naturales, esto consiste en la implementación de un modelo empírico que caracterice los procesos de conversión de la vegetación natural observados en el período aproximado.

4.2.4.6. Land Change Modeler (LCM)

Es un sistema de apoyo a la planificación de tierras y la toma de decisiones que se incorpora totalmente al software IDRISI Selva and Image Processing, además de una extensión para Esri ArcGIS 10.5. Con un proceso automatizado y sencillo, "Land Change

Modeler" facilita el análisis de cambios complejos. Facilita el análisis rápido de las transformaciones de la cobertura de la tierra, modelar de forma empírica las conexiones con las variables que las explican y proyectar escenarios posibles de cambio de suelo. Land Change Modeler le permite simular futuros cambios, modelar escenarios para emisiones REDD, y modelar posibles impactos en la biodiversidad (Rosero Mier, 2018).

Está compuesto por varios módulos:

- *El analizador de cambios:* le permitirá comprar dos mapas de diferentes fechas, y reevaluar como ha cambiado la situación en el tiempo, incluyendo una herramienta de abstracción y de análisis de superficie, para descubrir los cambios más complejos (Rosero Mier, 2018).

- *Modelador para Cambios Potenciales:* Utilizando los datos sobre los cambios en el terreno y añadiendo mapas medioambientales, con Land Change Modeler puede crear un layer de datos GIS que exprese una transición potencial, como muestra de lo que podrá pasar en un futuro. Cada transición esta modelada con Logistic Regresion o con una red neural Mlti-Layer Perceptron, resultando un mapa para cada transición, declarando el cambio potencial. Las variables ambientales pueden ser estáticas o dinámicas (además estas se recalculan en cada iteración durante el curso de la predicción) (Rosero Mier, 2018).

- *Predicting Change:* Las proyecciones sobre transformaciones dinámicas se fundamentan en cambios históricos y modelos durante un periodo de tiempo. Se puede modelar la cantidad de cambios mediante un análisis de cadenas de Markov. Land Change Modeler facilita indicar el número de fases en las que se actualizan las variantes. El sistema verifica en cada etapa si hay intervenciones planificadas que puedan afectar. El proceso de predicción, como el caso de la edificación de nuevas vías, puede producir varios tipos de predicciones, algunas más complicadas que se pueden obtener con un solo clic. Con un solo clic, se pueden generar diversos tipos de predicciones, algunas de mayor dificultad. Una predicción más suave también se proporciona (Rosero Mier, 2018).

4.2.4.7. Método de modelización con cadenas de Markov

Son un tipo de proceso aleatorio discreto que se utiliza para predecir el estado de un sistema en un momento determinado a partir de los dos estados anteriores. Se trata de un procedimiento discreto en un tiempo discreto, en donde el valor en el tiempo t1 depende de los valores en los tiempos t0 y t-1 (cadena markoviana de segundo orden) (Paegelow et al. 2003).

El algoritmo compara dos mapas de uso del territorio generados en distintas fechas y después determina la probabilidad de que un píxel del primer mapa pase a otra clase en el segundo mapa. La matriz que describe las probabilidades de pasar de un estado a otro en un sistema dinámico se llama matriz de transición de Markov y sirve para estimar cómo evolucionará el uso del territorio en el futuro. La predicción se materializa en una serie de mapas de ocupación del suelo (uno para cada categoría) para un tiempo futuro, en donde el nivel digital de cada píxel expresa la probabilidad de pertenecer a la categoría analizada (Paegelow et al. 2003).

4.2.4.8. Algoritmo de automatismo celular

Para usar esta función se necesita el resultado de los procesos anteriores, en particular el mapa de uso del territorio base que sirve para implementar las cadenas de Markov, la matriz de zonas de evaluación de la aptitud del territorio para cada clase de uso del suelo usando mapas. Además, se menciona el uso de cadenas de Markov para modelar la transición entre diferentes categorías de uso del suelo. Por último, es necesario indicar el número de iteraciones (que deben coincidir con los años de extrapolación para el cálculo de la proyección) y del tipo de filtro booleano para el análisis de contigüidad local (Paegelow et al., 2003).

4.2.5. Modelo hidrológico

Según Clarke citado Varillas (2022), un modelo hidrológico se define como una descripción matemática de una cuenca hidrográfica y sus diversas respuestas nos permite analizar, de manera simplificada, cómo se transforma la lluvia en escorrentía.

Los modelos hidrológicos se dividen en cuatro categorías. La primera es el modelo hidrológico determinístico, que se basa en diversas variables, parametrizaciones

y ecuaciones físicas y/o químicas para simular procesos y reproducir la relación causa-efecto. Esta categoría se subdivide en modelos agregados, que tratan la cuenca como una unidad simple sin considerar la variación espacial de la respuesta hidrológica, y modelos distribuidos.

La segunda categoría incluye los modelos probabilísticos, que se basan en leyes de probabilidad y se dividen en estadísticos y estocásticos. La tercera categoría abarca los modelos conceptuales, que son representaciones simplificadas de los procesos físicos para facilitar la comprensión de fenómenos naturales complejos. Finalmente, los modelos paramétricos consisten en ecuaciones matemáticas con variables determinadas a través del análisis de datos.

Antes de aplicar un modelo hidrológico, es esencial comprender el funcionamiento del ciclo hidrológico. Esto implica entender cómo la cuenca genera agua en términos de tiempo y espacio, y cómo sus propiedades biofísicas influyen en la calidad y cantidad del agua. En este contexto, los modelos se utilizan como herramientas para mejorar el conocimiento sobre el comportamiento y las interacciones entre los componentes del ciclo hidrológico (Martínez, 2019). Por lo tanto, la base de los modelos hidrológicos es la modelación de cuencas.

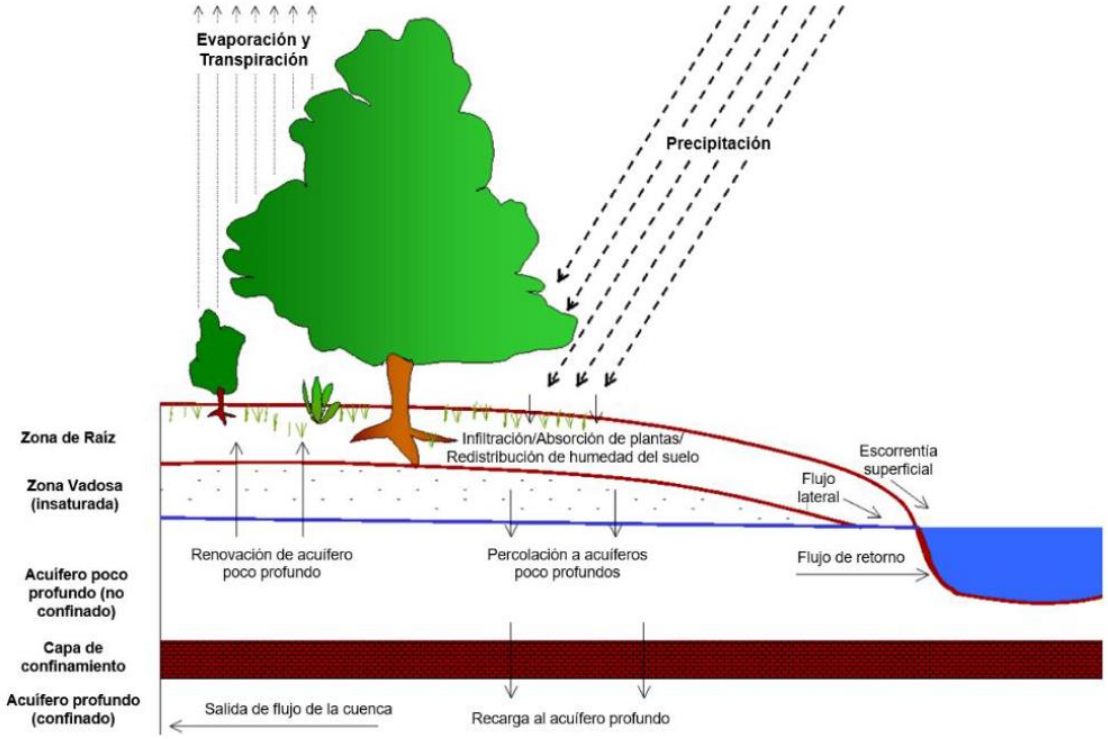
4.2.5.1. Modelo hidrológico SWAT

SWAT (Soil Water Assessment Tool) es una herramienta para la evaluación del suelo y el agua a escala de cuenca. Es un modelo agro-hidrológico determinístico, distribuido y continuo, cuyo fundamento teórico se basa en la ecuación del balance hídrico Neitsch et al. (2005). Este modelo permite simular los procesos físicos del ciclo hidrológico a nivel de cuencas, dividiéndolas en subunidades.

El modelo se compone de varios submodelos que pueden utilizarse para simular diferentes procesos hidrológicos y se fundamenta en la ecuación general del balance hídrico basada en los procesos del ciclo hidrológico (Figura 1) (Flores Rodriguez, 2020).

Figura 1

Representación conceptual del ciclo hidrológico en el modelo SWAT



Nota: Adaptado de Flores (2020)

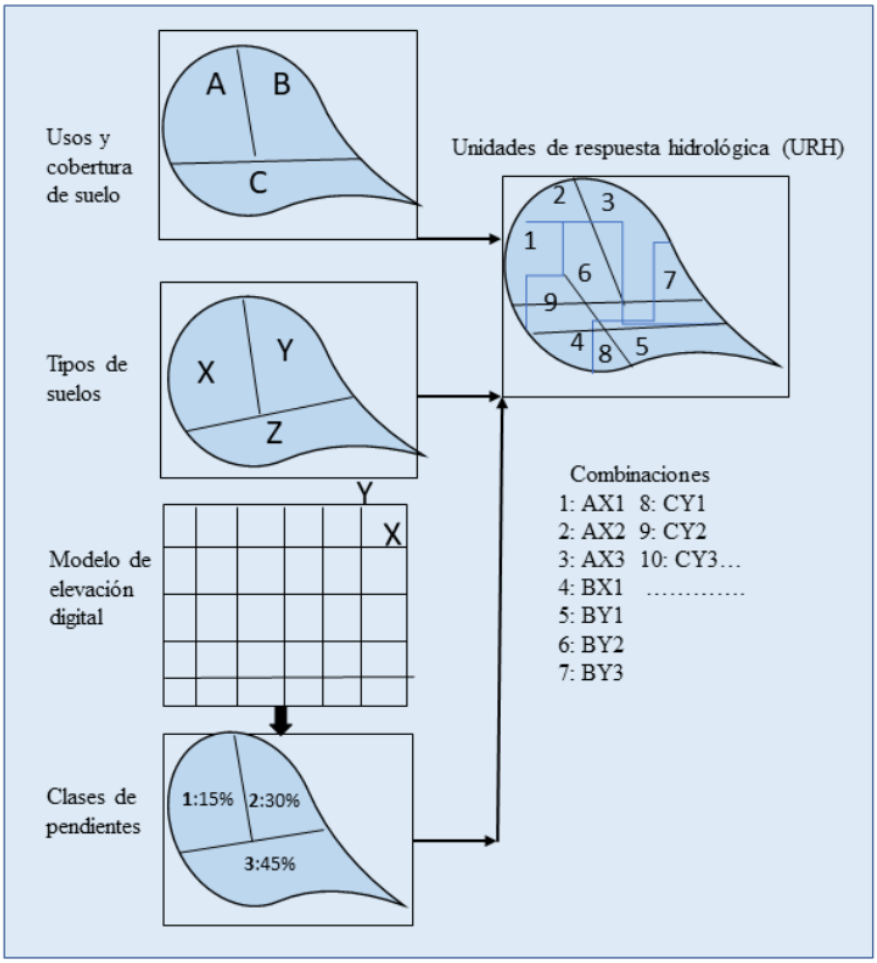
El modelo diseñado para predecir la cantidad de pérdida de suelo por escurrimiento fue calculado a partir de la ecuación universal de perdida de suelo modificada-MUSLE J. R. Williams et al. (2009), siendo una modificación al modelo USLE y se expresa como:

Los datos de entrada para el modelo incluyen información meteorológica, hidrológica, propiedades físicas del suelo, topografía, cobertura vegetal y prácticas de manejo de tierras en las cuencas. El modelo evalúa la respuesta de la cuenca dividiéndola en Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) Varillas (2022), que se definen como agrupaciones homogéneas de uso del suelo, tipos de suelo y topografía con la finalidad de brindar datos más seguros y confiables (Figura 2).

Cada HRU se obtiene de las combinaciones de los diferentes factores mencionados, es decir, cada polígono de HRU tienen un mismo suelo, cobertura vegetal y pendiente (Martínez, 2019).

Figura 2

Esquema conceptual de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU)



Nota: Adaptado de (Arriaga Pérez, 2021)

4.2.6. Escenarios de clima futuro

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), en su sexto informe propuso nuevos escenarios de cambio climático para finales de siglo, las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP), estos escenarios son generados en el marco del CMIP6 (Proyecto de Inter comparación de Modelos Acoplados, Fase 6), donde se concentran diversos modelos climáticos globales desarrollados por distintos países, estos datos se encuentran disponibles desde el año 2018, y han sido desde entonces calibrados y analizados con respecto a datos observados climáticos (Arteaga, 2024).

Según Mancera (2019), la vida en la Tierra es viable únicamente si se integra el recurso hídrico en la planificación de un sistema efectivo de manejo y gestión de las

cuencas hidrográficas. Por esta razón, es esencial estudiar el ciclo hidrológico considerando el cambio climático. Estos cambios se manifestarán a nivel global y en todas las formas en que el agua se presenta en la Tierra.

4.2.6.1. SSP2-4.5

Este es un escenario "intermedio" en el que las emisiones de CO2 permanecen cerca de los niveles actuales antes de empezar a disminuir a mediados de siglo, sin llegar a cero netos hasta 2100. Las tendencias socioeconómicas siguen patrones históricos sin cambios significativos, y el avance hacia la sostenibilidad es lento y desigual. En este escenario, las temperaturas globales aumentan aproximadamente 2.7°C para finales de siglo (IPCC, 2024).

4.2.6.2. SSP5-8.5

Este escenario describe un futuro con altas emisiones, impulsado por un desarrollo económico dependiente de combustibles fósiles. Las emisiones de CO2 siguen aumentando considerablemente, y las temperaturas globales podrían superar los 4°C para finales de siglo. Este escenario supone un rápido crecimiento económico y un uso intensivo de recursos, con poca mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos escenarios ayudan a comprender los posibles impactos del cambio climático bajo diferentes trayectorias de desarrollo y políticas (IPCC, 2024).

4.2.6.3. Modelo General de Circulación (MCG)

Un Modelo General de Circulación (MCG), conocido en inglés como GCM, es un modelo matemático que describe la circulación de la atmósfera o los océanos de un planeta. Estos modelos se basan en las ecuaciones de Navier-Stokes aplicadas a una esfera rotatoria, incorporando términos termodinámicos para diversas fuentes de energía como la radiación y el calor latente. Estas ecuaciones son la base de modelos complejos utilizados en programas de computadora para simular las condiciones atmosféricas y oceánicas de la Tierra (Cambio Climático Global, 2024).

Los MCGs son elementos esenciales del modelo climático global, junto con componentes de la superficie terrestre y marina, como el hielo marino. Estos modelos se

utilizan ampliamente para la predicción meteorológica, la comprensión del clima y la proyección del cambio climático (NOAA's, 2021).

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Tipo y diseño de estudio

Por la naturaleza del estudio, el abordaje del estudio comprendió la aplicación de una metodología con enfoque multimetódico o mixto, combinando metodologías cualitativas y cuantitativas (Gabriel, 2019).

La creación y utilización de procesos y dispositivos sistemáticos para la descripción detallada de los ecosistemas y los beneficios que brindan a la humanidad se relaciona con un método cualitativo, y el uso de software de Sensoramiento Remoto, permite respaldar el método cuantitativo de la investigación.

5.2. Población, muestra y muestreo

5.2.1. Población

La población de estudio comprende las unidades hidrográficas de la Provincia de Jaén y para la cual se colectaron datos históricos 2000 – 2020 de cobertura forestal y uso de suelos, además del uso de escenarios climáticos al año 2040 para la elaboración del modelo hidrológico.

5.2.2. Muestra y muestreo

Para la elección del lugar de estudio se utilizó el muestreo no probabilístico por conveniencia, el cual según Casal & Mateu (2003) se trata de seleccionar una muestra mediante métodos no aleatorios, cuyas características sean comparables a las de la población objetivo. En este tipo de muestreos, la "representatividad" es determinada subjetivamente por el investigador.

5.3. Variables intervinientes

5.3.1. Variables de entrada para el modelado

5.3.1.1. Cobertura y uso de la tierra

Esta variable describe la cubierta biofísica de la superficie terrestre y las actividades antrópicas desarrolladas sobre ella. Se utilizó información histórica de los periodos 2000-2005 y 2018-2020, obtenida principalmente de la plataforma Geobosques del MINAM y complementada con clasificación supervisada de imágenes Landsat en Google Earth Engine (GEE) para áreas no cubiertas por el monitoreo de bosques tropicales. Las categorías de cobertura/uso consideradas incluyeron Cuerpos de Agua (WATR), Bosque Mixto (FRST), Vegetación Secundaria (COFF), Agricultura (CRGR), Pastizales/Herbazales (MIGS), Suelo Desnudo (BARR), Áreas Artificiales (URLD) y Páramo (VEPA). Esta variable es clave, ya que impacta directamente los procesos de infiltración, escorrentía y erosión. Asimismo, se generaron proyecciones de cambio de cobertura y uso del suelo al año 2040 utilizando el módulo Land Change Modeler (LCM) del software IDRISI Selva, empleando métodos como Cadenas de Markov y Autómatas Celulares.

5.3.1.2. Propiedades del suelo

Caracterizan las condiciones edáficas que influyen en la hidrología y la erosión de la cuenca. Los datos de suelo, incluyendo tipo de suelo, textura (arena, limo, arcilla), contenido de materia orgánica, conductividad eléctrica y contenido de fragmentos de roca, fueron obtenidos de la base de datos global SOILGRIDS a una resolución de 30x30m. A partir de estos datos de textura y materia orgánica, se determinaron propiedades hidráulicas clave para el modelado, como la densidad aparente, la capacidad de agua disponible (SOL_AWC), y la conductividad hidráulica saturada (SOL_K), utilizando programas como SPAW-USDA. La erodabilidad del suelo (Factor K de USLE) se obtuvo a partir de tablas específicas, y los grupos hidrológicos (HYDGRR) se determinaron con el programa NumCur a partir de datos de textura. El suelo es un factor determinante en la respuesta hidrológica y la erosión. Se identificaron 18 tipos de suelo principales en la provincia de Jaén.

5.3.1.3. Topografía

La topografía del terreno define la geometría de la cuenca y sus características de drenaje. La principal variable utilizada fue el Modelo de Elevación Digital (DEM) ASTER GDEM con una resolución espacial de 30x30m, obtenido de la plataforma EARTHDATA de la National Aeronautics and Space Administration (NASA). A partir del DEM, se derivaron variables topográficas como la pendiente. La topografía es fundamental para delimitar las unidades hidrográficas, definir la red de drenaje e influye directamente en el movimiento del agua y los sedimentos a través de la cuenca. La pendiente fue clasificada en siete rangos de acuerdo con la normativa pertinente.

5.3.1.4. Datos meteorológicos

La precipitación y la temperatura son los principales forzadores del ciclo hidrológico y, consecuentemente, influyen en la erosión. Se utilizaron datos diarios históricos de precipitación y temperatura para el periodo 2001-2020, extraídos de 9 estaciones meteorológicas virtuales ubicadas en la Plataforma W3S. Para los escenarios futuros, se utilizaron datos de anomalías climáticas (variaciones de precipitación y temperatura) proyectadas para el periodo 2021-2040. Estas anomalías fueron derivadas de un ensamble de modelos climáticos globales (GCMs) (MPI-ESM1-2-HR, MPI-ESM1-2-LR y FIO-ESM-2-0) bajo los escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5, procesadas a partir de datos de Worldclim 2.1 y extraídas utilizando R Studio.

5.3.2. Variables de Escenario

5.3.2.1. Escenarios de cambio climático

La investigación considera dos Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) combinadas con Concentraciones Representativas (RCP) definidas en el marco del IPCC: **SSP2-4.5:** Representa un escenario intermedio donde las emisiones de CO2 se estabilizan y comienzan a disminuir a mediados de siglo. Las tendencias socioeconómicas siguen patrones históricos sin cambios drásticos, y el avance hacia la sostenibilidad es lento y **SSP5-8.5:** Describe un futuro con altas emisiones, impulsado por un fuerte desarrollo económico dependiente de combustibles fósiles. Esto resulta en un aumento considerable de las emisiones y un calentamiento global más elevado. Estos escenarios influyen en las proyecciones de precipitación y temperatura utilizadas como datos de entrada para el modelo hidrológico futuro.

5.3.2.2. Periodos de tiempo

Se distinguen dos periodos principales de análisis y comparación:

Línea base: Corresponde al periodo histórico reciente para el cual se dispone de datos de cobertura/uso del suelo y meteorológicos (generalmente 2000-2020), representando las condiciones actuales de las cuencas.

Periodo proyectado: Corresponde al año futuro específico para el cual se realizan las simulaciones de balance hidrológico y sedimentos bajo los escenarios de cambio climático (año 2040). Este periodo se basa en las proyecciones de cobertura/uso y las anomalías climáticas futuras.

5.3.3. Variables de salida del modelo

5.3.3.1. Percolación (PERC)

Corresponde al flujo de agua que se mueve verticalmente desde la parte inferior del perfil del suelo hacia la zona no saturada y, eventualmente, hacia los acuíferos someros y profundos, expresada en milímetros (mm). La percolación es un proceso precursor de la recarga hídrica (GW_Q). Es una variable crucial para entender la capacidad del suelo para permitir el paso del agua más allá de la zona de raíces de las plantas, siendo un componente fundamental en la partición del agua de lluvia entre la escorrentía y el almacenamiento subterráneo.

5.3.3.2. Recarga hídrica (GW_Q)

Esta variable representa la cantidad de agua que recarga el acuífero profundo de cada subcuenca, expresada en milímetros (mm). Es el principal indicador de la sostenibilidad de los recursos hídricos subterráneos, ya que esta agua es la que eventualmente sostiene el caudal base de los ríos durante las épocas de estiaje. Un valor alto de GW_Q indica que el paisaje tiene una alta capacidad para almacenar agua a largo plazo, mientras que un valor bajo sugiere una vulnerabilidad a las sequías.

5.3.3.3. Producción de sedimentos (SYLD)

Representa la cantidad de sedimento que es transportado fuera de una unidad de área, expresada en toneladas por hectárea por año (t/ha). El modelo SWAT estima la producción de sedimentos utilizando una adaptación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE). Esta variable es el parámetro central para evaluar la erosión del suelo y el transporte de sedimentos a nivel de cuenca.

5.3.3.4. Escorrentía superficial (SURQ)

Esta variable representa la cantidad de agua de lluvia que no se infiltra en el suelo y fluye sobre la superficie del terreno hacia los cauces, expresada en milímetros (mm). Es un indicador clave de la respuesta hidrológica inmediata de la cuenca ante un evento de lluvia. Valores altos de escorrentía superficial están directamente asociados con un mayor riesgo de erosión (ya que es la fuerza que transporta los sedimentos) y un menor potencial de recarga hídrica, siendo característicos de suelos compactados, impermeabilizados o con poca cobertura vegetal.

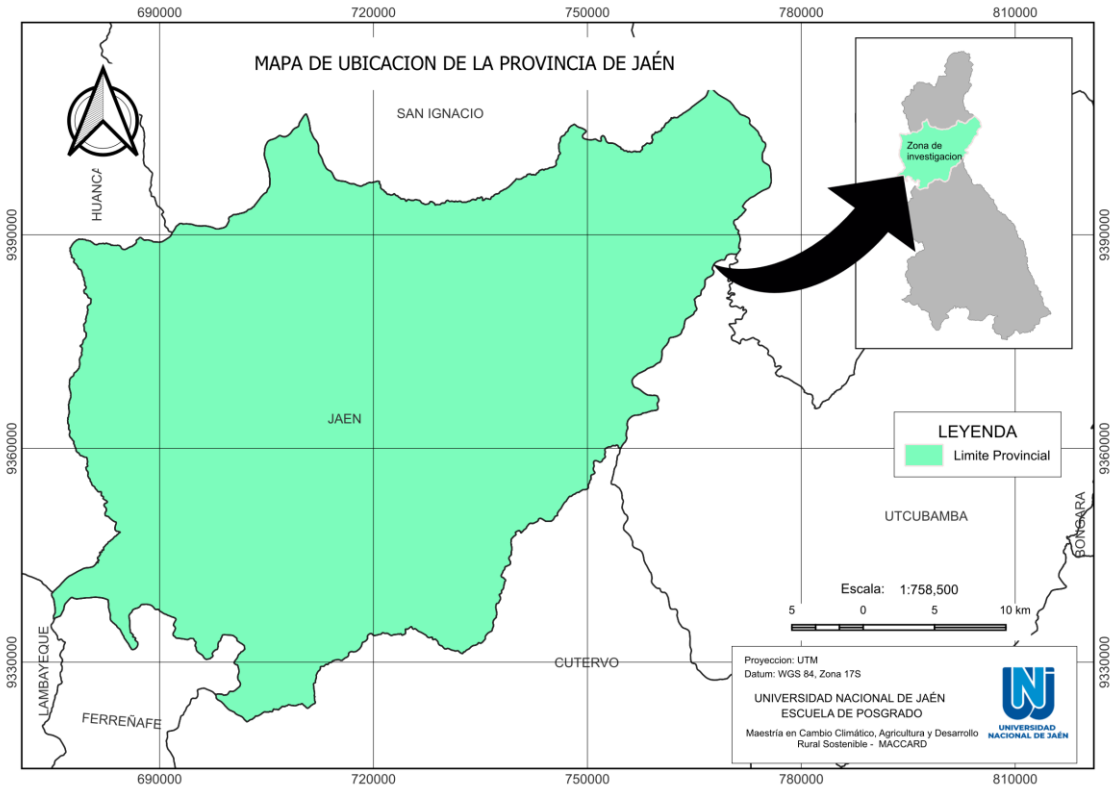
5.4. Métodos

5.4.1. Ubicación

La provincia de Jaén está ubicada en la parte norte de la Región de Cajamarca, entre los 5º15 y los 6°4 de latitud Sur; y entre los 78º 33 y los 79º 38 de longitud Oeste aproximadamente (Figura 3). Abarca una extensión territorial de 5232.57 km², el cual representa el 15.4 % del departamento. La provincia se encuentra en un rango altitudinal, que oscila entre los 370 y 3965 m.s.n.m con un promedio altitudinal de 1762 m. Cuenta con 12 distritos: Jaén, Bellavista, Chontalí, Colasay, Huabal, Las Pirias, Pomahuaca, Pucará, Sallique, San Felipe, San José del Alto y Santa Rosa.

Figura 3

Ubicación geográfica del área de estudio en la provincia de Jaén



Nota: Elaboración propia

5.4.2. Instrumentos y equipos utilizados

En las siguientes líneas, se describen los equipos y materiales utilizados durante el proceso de investigación

- Materiales y equipos de campo: Libretas de campo; Navegador GPS Garmin Montana 650; Cámara fotográfica; Motocicleta.

- Materiales y equipos de oficina: Plataformas (Google Earth Engine - GEE; Landsat; Soil grids; Geoservidor MINAM; Worldclim); Softwares (IDRISI Selva 17.0; QSWAT 2.0.1; QGIS 3.28.15; Soil Water Characteristics; SPAW 6.02; Nuncurk; R Studio 4.3.1; Plataforma W3S (Ghimire et al. 2022); Microsoft 365 y Computador.

5.4.3. Metodología

5.4.3.1. Obtención del límite geográfico

El presente estudio inicio con la obtención del límite Provincial de Jaén, para la cual se utilizó la plataforma digital Global Administrative Áreas–GADM Global Administrative Áreas - GADM (2022) la que proporciona mapas y datos espaciales relacionados con las divisiones administrativas en todo el mundo.

5.4.3.2. Usos y coberturas del suelo

Para el cambio de uso y cobertura de la tierra, se utilizó la plataforma Geobosques de Ministerio del Medio Ambiente – MINAM, que mediante el proyecto "Módulo de Monitoreo de la Cobertura de Bosques (MMCB)" (Figura 4), realiza el monitoreo continuo de los bosques tropicales desde el año 2000. Las imágenes proporcionadas por la plataforma GeoBosques (Programa Nacional de Conservación de Bosques) constituyeron la fuente principal para la clasificación del uso y cobertura del suelo en las unidades hidrográficas analizadas. Sin embargo, la cartografía oficial presentaba vacíos de información distribuidos en diversos sectores de la provincia, correspondientes a áreas catalogadas conceptualmente como "área no analizada" por encontrarse fuera del ámbito de monitoreo forestal priorizado del programa. Esta carencia de datos iniciales representaba un vacío de 189,331.40 hectáreas, lo que equivale al 37.44% del área total de la Provincia de Jaén (505,726.50 hectáreas).

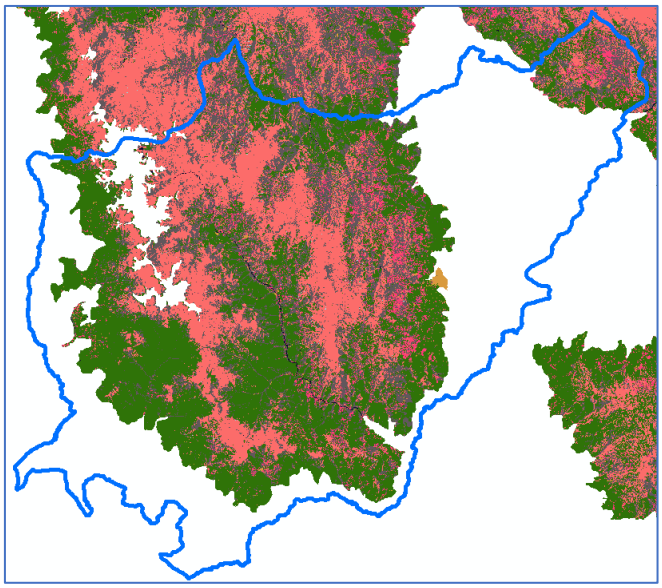
Para subsanar esta limitación y evitar la existencia de píxeles vacíos que imposibilitaran el correcto funcionamiento del modelamiento hidrológico, se complementó y completó la base de datos mediante el procesamiento digital de imágenes en la plataforma *Google Earth Engine* (GEE). A través de esta herramienta de computación en la nube, se procesaron colecciones de imágenes satelitales multiespectrales (Landsat y Sentinel, según el año correspondiente) para clasificar y asignar coberturas específicas únicamente a las zonas que carecían de información en la capa de GeoBosques.

La integración de ambas fuentes cartográficas se ejecutó mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) bajo un riguroso protocolo de consistencia espacial: primero, los productos clasificados en GEE fueron remuestreados a una

resolución espacial de 30 x 30 metros para equiparar la estructura geométrica original de GeoBosques; segundo, se aplicó un algoritmo de mosaico espacial bajo una regla de prioridad condicional. Esta regla estableció que los datos oficiales de GeoBosques se mantuvieran inalterados como la capa base y principal del territorio, mientras que la información clasificada proveniente de GEE se utilizó de forma exclusiva para rellenar los píxeles que contenían el valor original de área no analizada (Clase 1). Este geoprocesamiento garantizó la obtención de un mapa continuo de uso de suelo, espacialmente homogéneo y técnicamente apto para la parametrización de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) en el modelo SWAT (Geobosques, 2017).

Figura 4

Evolución espacio-temporal de la cobertura y uso del suelo (2000-2020)



Nota: La imagen muestra la delimitación de Jaen con el monitoreo continuo (multicolor) y la zona sin monitoreo (blanco).

En las zonas faltantes se realizó la clasificación supervisada en la Plataforma Google Earth Engine - GEE (Google Earth Engine, s. f.) que es compacta, comandada con leguaje de programación JavaScript y utiliza algoritmos de aprendizaje automático para hacer la clasificación supervisada. Para el caso en estudio, se inició cargando puntos georreferenciados en campo con los puntos de control recogidos para cada tipo de cobertura identificada, luego se agregaron los Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI) y Índice Normalizado de Área Quemada (NBR), se consideró a la pendiente como una variable de

influencia por lo que se agregó con la función "slope" que extrajo datos del satélite Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (SRTM, s. f.) , también se consideró la corrección de escala multiplicando por 0.0000275 debido a que se está trabajando con la Landsat 8 Collection 2 Level-2 (Figura 5).

Figura 5

Código de procesamiento en Google Earth Engine para asignación de bandas, integración del Modelo Digital de Elevación y corrección de escala

```
var addIndices = function(image) {
  return image
    .addBands(image.normalizedDifference([ "NIR", "RED"])
    .rename('NDVI'))
    .addBands(image.normalizedDifference([ "GREEN", "NIR"])
    .rename('NDWI'))
    .addBands(image.normalizedDifference([ "NIR", "SWIR1"])
    .rename('NBR'));
};

var srtm=ee.Image('USGS/SRTMGL1_003');
var slope = ee.Terrain.slope(srtm).clip(bound).rename("slope");

//Funcion de preprocesamiento de datos para ajustar la escala
var scaleLTDataC02=function(image){
    return  image.multiply(0.0000275).add(-0.2);
};
```

Nota: Elaboración propia

Se consideró el enmascaramiento de nubes y sombras con la función "QA-PIXEL". La generación de la imagen de entrenamiento se realizó con colecciones Landsat 5, 7 y 8 las que mediante la función de "median" realizó una imagen única, se agregaron funciones para seleccionar bandas, filtrar por fechas, recortar al área de interés, renombrar bandas, pendiente y los índices de vegetación Figura 6.

Figura 6

Código en Google Earth Engine para la generación de imágenes compuestas mediante colecciones Landsat 5, 7 y 8.

```
var landsatCollection =ee.ImageCollection(L5coll.merge(L8coll)
                                                .merge(L7coll));


var fechaInicio="2021-01-01";
var fechaFinal="2021-12-31";
var imgClasificar=landsatCollection.filterDate(fechaInicio,fechaFinal)
                                   .median();
```

Nota: Elaboración propia

En seguida se asignaron las muestras de entrenamiento con la función "randomColumn" de manera aleatoria da valores entre 0 y 1 los que sirven para las pruebas de entrenamiento aquellos valores que son menores o iguales a 0.8 y validación los valores mayores a 0.8. En seguida se aplicó el algoritmo de clasificación "RANDOMFOREST", el cual mediante la función "confucionMatrix", sirvió para ver los errores de clasificación y la función "kappa" para ver el grado de precisión de la clasificación Figura 7. Para tener el script completo de la clasificación ver anexo 1.

Figura 7

Implementación del algoritmo Random Forest y evaluación de precisión mediante el índice Kappa

```
// Train a 10-tree random forest classifier from the training sample.
var trainedClassifier = ee.Classifier.smileRandomForest(10).train({
  features: trainingSample,
  classProperty: label,
  inputProperties: bandas
});

// Get information about the trained classifier.
print('Results of trained classifier', trainedClassifier.explain());

// Get a confusion matrix and overall accuracy for the training sample.
var trainAccuracy = trainedClassifier.confusionMatrix();
print('Training error matrix', trainAccuracy);
print('Training overall accuracy', trainAccuracy.accuracy());
print('Training Kappa',  trainAccuracy.kappa());
```

Nota: Elaboración propia

Una vez clasificada la imagen se exporto en formato RASTER y se realizaron los ajustes en QGIS 3.28.15 QGIS (2024) siguiendo los protocolos de clasificación

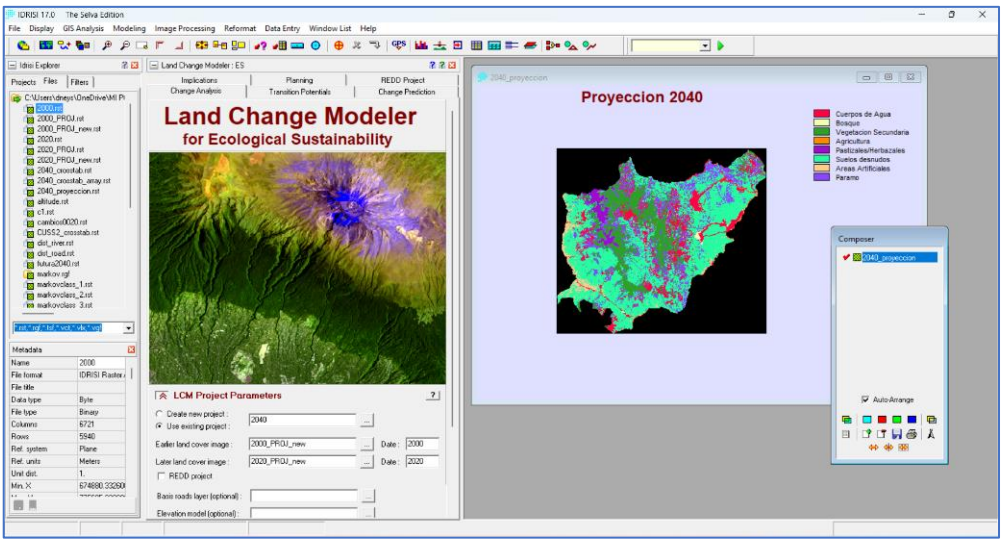
empleados por el MINAM, para luego ensamblarse con las imágenes obtenidas de la plataforma Geobosques.

Obtenido las capas de cambio de cobertura forestal y uso de suelos para los dos periodos (2000-2005 y 2018-2020) sé procedió a realizar la estimación futura al año 2040.

Se utilizó el módulo Land Change Modeler (LCM), para hacer los análisis de proyección al 2040, se utilizó el módulo Markov para analizar las probabilidades de cambio entre clases y CA- Markov para hacer la estimación futura, todo esto dentro del Software IDRISI Selva 17.0 (Figura 8) (CIESIN, 2016).

Figura 8

Proyección espacial de cobertura al año 2040 mediante el módulo Land Change Modeler



Nota: Elaboración propia

El análisis de la dinámica de cambio de cobertura se realizó para el periodo 2000-2022, ajustado desde el plan original (1990-2020) para asegurar la disponibilidad y consistencia de los datos satelitales a través de la plataforma Google Earth Engine

5.4.3.3. Modelamiento hidrológico SWAT

Para el diseño del modelo hidrológico se utilizó el modelo matricial o distribuido, corrido en SWATeditor-Database-Qswat V2.0.1 de la interfaz de QGIS 3.28.15 (*QSWAT*,

2012).El cual después de ajustar los parámetros de entrada del modelo (reasignación de proyecciones y conversión de información de vectores a ráster), se establecieron las condiciones de tiempo de simulación para un periodo de 19 años, incluyendo un periodo de calentamiento de 3 años para estabilizar el modelo y permitir que reconozca los datos. El objetivo fue obtener variables de salidas para los parámetros subcuencas, HRUs, sedimentos, escorrentía, entre otras. El balance hídrico se determinó con la ecuación del equilibrio de agua tomado de Neitsch et al. (2005) (Ecuación 1)

$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{t}(Rday - Qsurf - Ea - Wseep - Qgw)$

Ecuación (2)

Dónde:

SW_t = Contenido final de agua en el suelo (mm H2O)

SW_0 = Contenido inicial de agua del suelo en un día i (mm H2O)

t = Tiempo (días)

R_{day} = Cantidad de precipitación en un día i (mm H2O)

Q_{surf} = Cantidad de escorrentía de la superficie en un día i (mm H2O)

E_a = Cantidad de evapotranspiración en día i (Mm H2O)

W_{seep} = Cantidad de agua que percola en el perfil del suelo en un día i (mm H2O)

Q_{gw} = Cantidad de flujo de retorno en un día i (mm H2O).

El modelo creado para estimar la cantidad de suelo perdido por escurrimiento se calculó utilizando la ecuación universal de pérdida de suelo modificada (MUSLE), según (Martínez, 2019). Esta ecuación es una adaptación del modelo USLE y se formula de la siguiente manera (Neitsch et al. 2005):

$\mathbf{S}_{ed} = 11.8(Q_{surf} + q_{peak} + Área_{hru})^{0.56} * K * C * P * LS * CFRG$ Ecuación (3)

Donde:

S_{ed} = Producción de sedimentos después de un evento de lluvia (Ton).

Q_{surf} = Escorrentía Superficial (mm_{H2O}/Ha).

q_{peak}= Caudal Pico ($m^3\ s^{-1}$).

$Área_{hru}$= Área de la Unidad de Respuesta Hidrológica (Ha)

K= Factor de Erodabilidad del suelo (0.013 ton^{-1} m^{-2} hr/ (m^3 ton cm))

C= Factor de uso de suelo (adimensional).

P= Factor prácticas de conservación del suelo (adimensional).

LS= Factor topográfico (adimensional).

CFRG= Factor de fragmentación de la tierra (adimensional)

Una vez obtenidos los resultados de la Producción de Sedimentos (SYLD) del modelo SWAT, expresados en toneladas por hectárea al año (t/ha/año), se procedió a clasificar estos valores cuantitativos en niveles de severidad cualitativos.

Para este fin, se adoptaron los criterios definidos en la Nota Técnica 02-SENAMHI-DHI-2017, la cual fue desarrollada para el "Atlas de Erosión de Suelos por Regiones Hidrológicas del Perú", según la tabla 1

Tabla 1

Clasificación de Erosión del Suelo según Criterios del SENAMHI

Rango de Erosión (t/ha/año)	Nivel de Severidad
0 - 10	Muy Leve
10 - 50	Leve
50 - 100	Moderado
100 - 200	Severo
> 200	Muy Severo

5.4.3.3.1. Adquisición de insumos satelitales y cartográficos

El modelo hidrológico SWAT necesita varios datos de entrada, como coberturas, suelos, clima y pendiente, para simular los procesos físicos relacionados con la hidrología, climatología, y generar resultados de erosión y producción de sedimentos a nivel de cuencas y HRU. Los datos que alimentan el modelo determinan las interrelaciones internas y externas de las unidades hidrológicas. Las fuentes de obtención y sus características se describen en la Tabla 2

Tabla 2

Insumos del modelo SWAT

Tipo de datos	Datos usados	Descripción general	Fuente
Espaciales	ASTER GDEM	Resolución espacial (30 x 30 m) Formato ráster	Fuente: plataforma EARTHDATA de la NASA https://search.earthdata.nasa.gov/search
	Tipo de suelo	Suelo Food and Agriculture Organization (FAO), resampleado a 30x30 m, Formato ráster	Fuente: plataforma SOILGRIDS https://soilgrids.org/
	Uso de suelo	Mapa de uso de suelos 2000-2004, 2018-2020 Resolución espacial (30 x 30 m) Formato ráster	Fuente: Módulo de Monitoreo de la Cobertura de Bosques (MMCB) y Clasificación supervisada en Google Earth Engine con imágenes Landsat https://geobosques.minam.gob.pe/geobosque/view/descargas.php?122345gxxe345w34gg https://earthengine.google.com/
Meteorológicos	Precipitación Temperatura	Registros diarios desde 01/01/2001 hasta 12/31/2020	Base de datos 9 estaciones meteorológicas sintéticas extraídas de Plataforma W3S

Los códigos de uso de suelo fueron reclasificados según SWAT utilizando la metodología descrita por (Martínez, 2019). La edafología de las cuencas se extrajo de la base de datos SOILGRIDS SoilGrids (s. f.), que recoge las unidades de suelo (código) establecidas en la FAO (1990) y World Reference Base for Soil Resources WRB (2014), estos códigos de suelo fueron incluidos en la base de datos de SWAT. La pendiente fue dividida en siete clases (0-4%, 4-8%, 8-15%, 15-25%, 25-50%, 50-75% y >75%) de acuerdo con el Anexo IV: Guía de Clasificación de los Parámetros Edáficos, del

Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor, aprobado por D.S. Nº 017-2009/AG (Alcántara, 2011)

La cartografía de cobertura de la tierra, descargada del portal Geobosques del MINAM y clasificación supervisada en Google Earth Engine (GEE), corresponde al año 2020. La Tabla 3 detalla la clasificación inicial de las coberturas utilizadas y los códigos SWAT correspondientes asignados a cada tipo de cobertura.

Tabla 3

Asignado de código SWAT a las coberturas de suelo

Codigo	**Categoría**
WATR	Cuerpos de Agua
FRST	Bosque mixto
RNGB	Vegetación Secundaria
CRGR	Agricultura
MIGS	Pastizales/Herbazales
BARR	Suelo desnudo
URLD	Área urbana
VEPA	Páramo

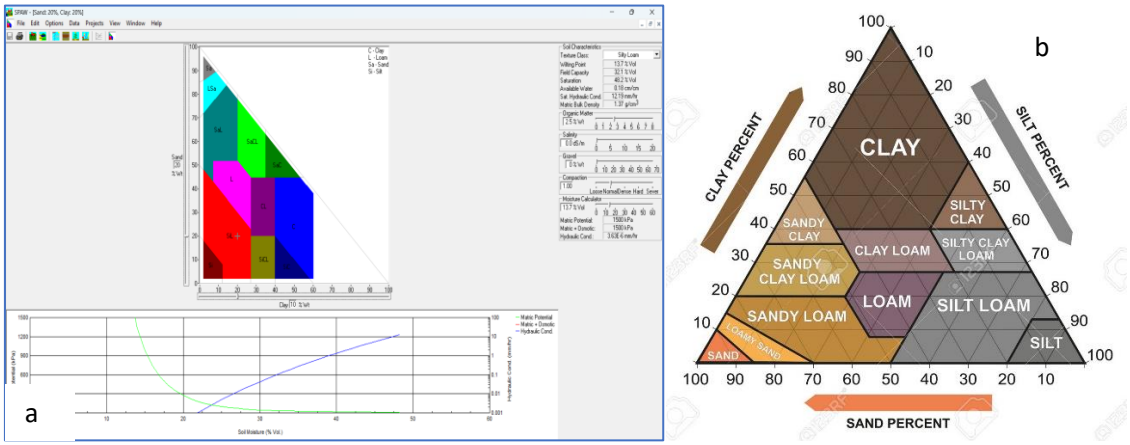
Las cuencas se delimitaron en base a criterios técnicos que toman en cuenta las características topográficas e hidrológicas. La Codificación se realizó en base a la desarrollada por la Oficina de Hidrogeomática de la Dirección de Conservación y Planeamiento de los Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) (ANA, 2011a).

La densidad aparente, la capacidad de agua disponible, la conductividad hidráulica saturada, se determinaron en el programa SPAW-USDA (Figura 9), este programa simula procesos hidrológicos, determinando el contenido hídrico, tensión, punto de marchitez, capacidad de campo, saturación y conductividad hidráulica del suelo, a partir del contenido de arena, limo y arcilla (Martínez, 2019). Se utilizo la plataforma digital SOILGRID *SoilGrids* (s. f.) para la descarga de datos de arcilla, arena, limo, materia orgánica a profundidades de 0-5 mm, 5-15 mm, 15-30 y 30-60 mm, los cuales se

procesaron en Qgis 3.28.15 y Microsoft Excel 365, obteniéndose datos de acuerdo con los parámetros que utiliza el software QSWAT 2.0.1

Figura 9

Caracterización edafológica mediante la interfaz del software SPAW-USDA



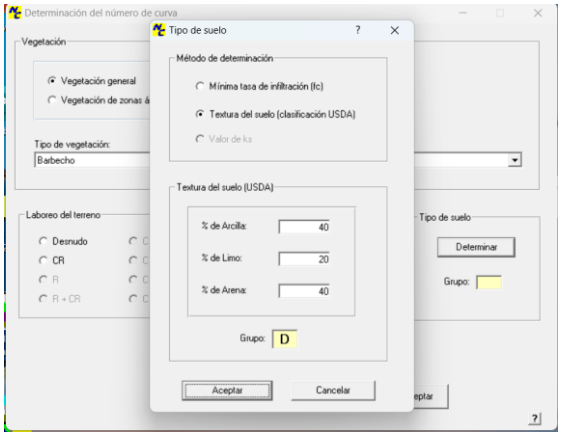
Nota: a. Interfaz principal del software, utilizado para identificar las características fisicoquímicas de los suelos, incluyendo propiedades hídricas y de textura. b. Diagrama triangular de clasificación textural USDA, que representa visualmente las proporciones de arena, limo (silt) y arcilla (clay), componentes clave para la evaluación del modelo SPAW-USDA.

Nota: SPAW-USDA, utilizado para identificar las características fisicoquímicas de los suelos.

Los grupos hidrológicos a los que pertenecen los suelos se determinaron con programa NumCur (Figura 10) y se describen en el anexo 2. La erodabilidad de suelo, albedo húmedo de suelo, contenido de carbono orgánico, se determinaron a partir de la USLE-K en Excel.

Figura 10

Determinación del grupo hidrológico de suelos mediante el software NumCur



Nota: El software NumCur sirvió para determinar el grupo hidrológico, un factor crucial en la estimación de la escorrentía superficial en el modelo hidrológico.

Las propiedades y método de obtención necesarios para SWAT se detallan en la Tabla 4

Tabla 4

Parámetros fisicoquímicos de suelos requeridos por SWAT

PARAMETROS	DESCRIPCION	METODO DE OBTENCION
SOL_SMX	Máxima profundidad del perfil del suelo con presencia de raíces (mm)	
ANION_EXCL	Fracción de porosidad desde donde los aniones son excluidos	Se utilizo la constante de 0,5. Valores opcionales
SOL_CRK	Fracción del volumen de rompimiento potencial o máximo del perfil del suelo	
SOL_Z	Profundidad desde la superficie del suelo hasta el fondo del horizonte	
SOL_BD	Densidad real (mg/m^3 o gr/cm^3)	
SOL_AWC	Capacidad de disponibilidad del agua del horizonte de suelo (mm H20/mm soil)	SPAW Hydrology utilizando datos de

		textura y % Materia Orgánica
SOL_K	Conductividad hidráulica saturada (mm/hr)	
SOL_CBN	Contenido de carbono orgánico (% del peso del suelo)	Se obtuvo a partir de la Materia orgánica. SOL_CBN=M.O/1,724
SOL_ALB	Albedo del suelo húmedo	
SOL_EC	Conductividad eléctrica (dS/m)	
USLE_K	Factor USLE de erodabilidad del suelo	Tabla K_USLE.xlsx
CLAY	Contenido de arcilla (% del del suelo)	
SILT	Contenido de limo (% del del suelo)	Se obtuvo de plataforma Soilgrid
SAND	Contenido de arena (% del del suelo)	
ROCK	Contenido de fragmentos de roca (% del peso del suelo)	
HYDGRR	Grupo hidrológico del suelo	NumCur a partir de datos de textura (ver: Anexo 2)

El suelo es un factor determinante para los procesos hidrológicos, como Escorrentía superficial, infiltración, agua disponible para cultivos, conservación de humedad (Arriaga, 2021) . El tipo de suelo fue obtenido de la plataforma Soilgrid, y la Tabla 5 proporciona el nombre de cada tipo de suelo, la Figura 11 muestra la distribución espacial de los suelos a nivel de toda la provincia y anexo 3 hace una descripción general por cada tipo de suelo.

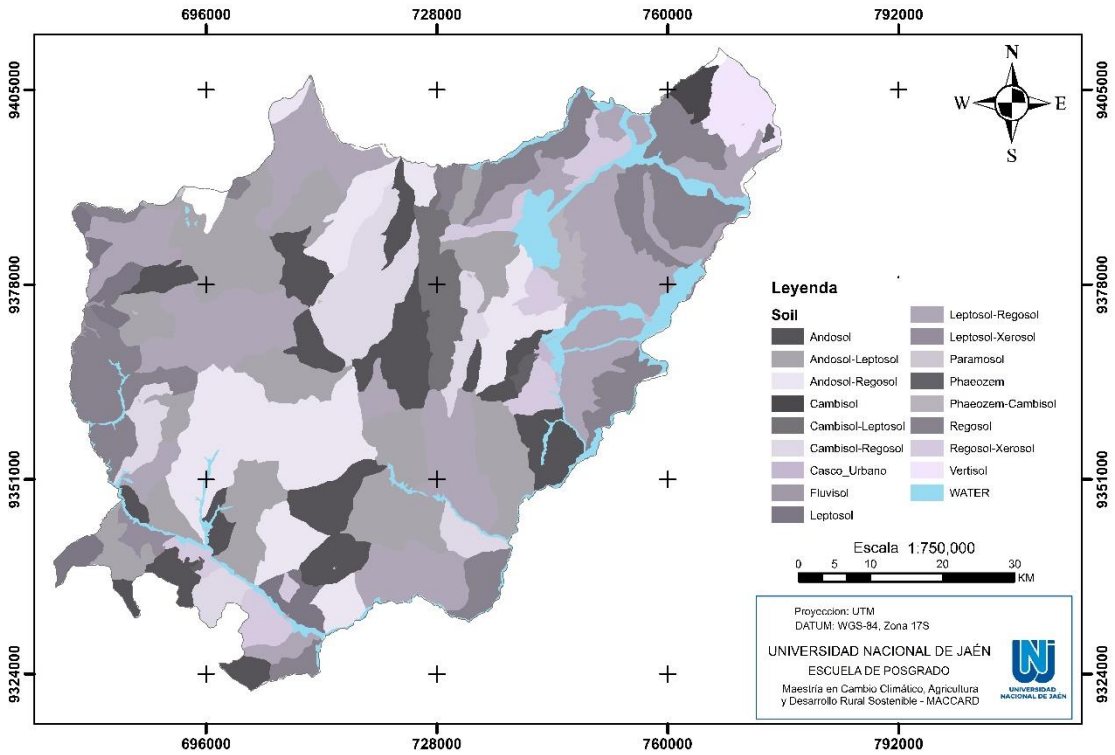
Tabla 5

Tipos de suelo identificados para la Provincia de Jaen

N°	Tipo de suelo		
1	Andosol	10	Leptosol
2	Andosol-Leptosol	11	Leptosol-Regosol
3	Andosol-Regosol	12	Leptosol-Xerosol
4	Cambisol	13	Paramosol
5	Cambisol-Leptosol	14	Phaeozem
6	Cambisol-Regosol	15	Phaeozem-Cambisol
7	Casco_Urbano	16	Regosol
8	Water	17	Regosol-Xerosol
9	Fluvisol	18	Vertisol

Figura 11

Distribución espacial de las unidades edafológicas en la provincia de Jaén



SWAT necesita datos meteorológicos diarios como datos de entrada para simular los procesos del ciclo hidrológico. Estos datos permiten determinar internamente los

procesos de enrutamiento del rendimiento y el transporte de sedimentos desde su origen hasta su deposición final en cauces y embalses hídricos.

Se utilizaron datos de precipitación y temperatura registrados durante un periodo de 19 años (2001-2020). Con estas dos variables, se creó la Macro de clima WEN_user para su uso en el generador climático, el cual requiere al menos 3 estaciones meteorológicas para funcionar (Teodor, 2022). En este caso, se emplearon 9 estaciones meteorológicas para que SWAT pudiera simular el comportamiento climático de la cuenca. El proceso de obtención de la información climática se describe a continuación. Primero, se localizaron las estaciones más cercanas a la zona de estudio en la plataforma de datos meteorológicos globales para SWAT. Se seleccionaron nueve estaciones climáticas (Tabla 6) y se obtuvieron sus coordenadas geográficas, las cuales se ubicaron en la plataforma W3S para extraer los datos de las variables de interés.

Tabla 6

Ubicación geográfica de estaciones meteorológicas

ID	Latitud	Longitud	Elevación
Estación 1	-6.088	-79.375	3106
Estación 2	-6.088	-79.063	1708
estación 3	-5.776	-79.375	2076
estación 4	-5.776	-79.063	2067
estación 5	-5.776	-78.75	790
estación 6	-5.464	-79.375	1931
estación 7	-5.464	-79.063	1283
estación 8	-5.464	-78.75	641
estación 9	-5.464	-78.438	625

Para encontrar las anomalías climáticas, se utilizaron datos de precipitación y temperatura para el periodo de referencia (1970-2000) y periodo futuro (2021-2040), bajo los escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5 proveniente de las reducciones de escala dinámica con WRF de los modelos globales del MPI-ESM1-2-HR, MPI-ESM1-2-LR y FIO-ESM-2-0; mediante un ensamble de media aritmética donde cada modelo y variable se obtuvieron datos únicos, la fuente de datos fue la plataforma Worldclim 2.1 WorldClim (2022) a una resolución de 1 km2, para el procesamiento y extracción de datos se realizó con líneas de código en el software R Studio 4.3.1 (RStudio, 2023).

Las anomalías climáticas se refieren a las variaciones en los niveles de precipitación o temperatura, ya sean aumentos o disminuciones, bajo diferentes escenarios climáticos y modelos de circulación general. Estas anomalías representan el comportamiento proyectado de las variables climáticas para un año específico.

La elección de los modelos se realizó por las siguientes razones: Los modelos MPI-ESM1-2-HR y MPI-ESM1-2-LR, desarrollados por el Instituto Max Planck, son reconocidos por su capacidad para simular de manera efectiva la circulación atmosférica y oceánica, así como las interacciones entre el océano y la atmósfera. Esto es particularmente relevante para la región andina, donde las condiciones climáticas están fuertemente influenciadas por estas interacciones.

En cuanto a la aplicabilidad de los modelos en el Perú se encontraron las siguientes investigaciones: Un estudio realizado por (Acuña et al. 2019) utilizó el modelo MPI-ESM-LR para estimar cambios en la temperatura y precipitación en localidades de Cusco, Urubamba y la granja Kcayra, para el período 2016-2045 bajo el escenario de alta emisión SSP 5-8.5

Gutiérrez et al. (2024) analizaron la capacidad de modelos climáticos regionales, forzados por modelos globales como MPI-ESM1-2-HR y FIO-ESM-2-0, para simular la climatología de precipitaciones en la compleja región de transición entre los Andes y la Amazonía. Este estudio resalta la importancia de seleccionar modelos globales adecuados para obtener proyecciones regionales precisas.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Cambios en la cobertura y uso del suelo

6.1.1. Identificación y características de las categorías:

Se identificaron ocho categorías principales de cobertura y uso del suelo en la Provincia de Jaén, clasificadas según el sistema CORINE Land Cover (CLC). Estas categorías presentan características distintivas y tienen relevancia particular en el contexto hidrológico y de erosión de las cuencas

6.1.1.1. Áreas artificiales

Comprenden zonas urbanas y periurbanas con predominio de superficies construidas y redes de infraestructura. Su expansión se vincula al crecimiento poblacional y representan áreas con mínima infiltración y alta generación de escorrentía superficial. Se distribuyen a lo largo de la provincia (Figura 12).

Figura 12

Caracterización y expansión territorial de las áreas artificiales.



Nota: a. La ciudad de Jaén (zona urbana) se caracteriza por un predominio de superficies construidas y redes de infraestructura. b. La Comunidad rural San José de la Alianza muestra la expansión de estas superficies, las cuales se vinculan al crecimiento poblacional.

6.1.1.2. Cuerpos de agua

Incluyen masas de agua superficiales naturales (ríos, lagunas) y artificiales. No contribuyen a la infiltración de precipitación directa, sino que actúan como receptores y transportadores de flujos de agua y sedimentos dentro de las cuencas (Figura 13).

Figura 13

Tipología y distribución de los cuerpos de agua en el área de estudio



Nota: Las imágenes hacen referencia a los diversos cuerpos de agua que se encuentran en la Provincia de Jaén.

6.1.1.3. Bosque

Cobertura vegetal densa con dosel arbóreo continuo (más del 70% de cobertura) y altura superior a cinco metros. Son ecosistemas cruciales para la producción de recurso hídrico y se ubican principalmente en partes altas (>1900 msnm). Favorecen la infiltración y reducen la escorrentía. (Figura 14).

Figura 14

Caracterización fisonómica de la cobertura forestal



Nota: La imagen representa a los bosques de Huamantanga, naciente del rio Amojú que recorre la totalidad de la cuenca Amojú

6.1.1.4. Vegetación secundaria

Áreas que han sido previamente alteradas (deforestadas para agricultura/ganadería) y se encuentran en proceso de recuperación o abandono. Su estructura vegetal es menos densa que el bosque maduro, con variabilidad en su capacidad de regulación hídrica y susceptibilidad a la erosión (Figura 15).

Figura 15

Dinámica de transición y características del paisaje de vegetación secundaria



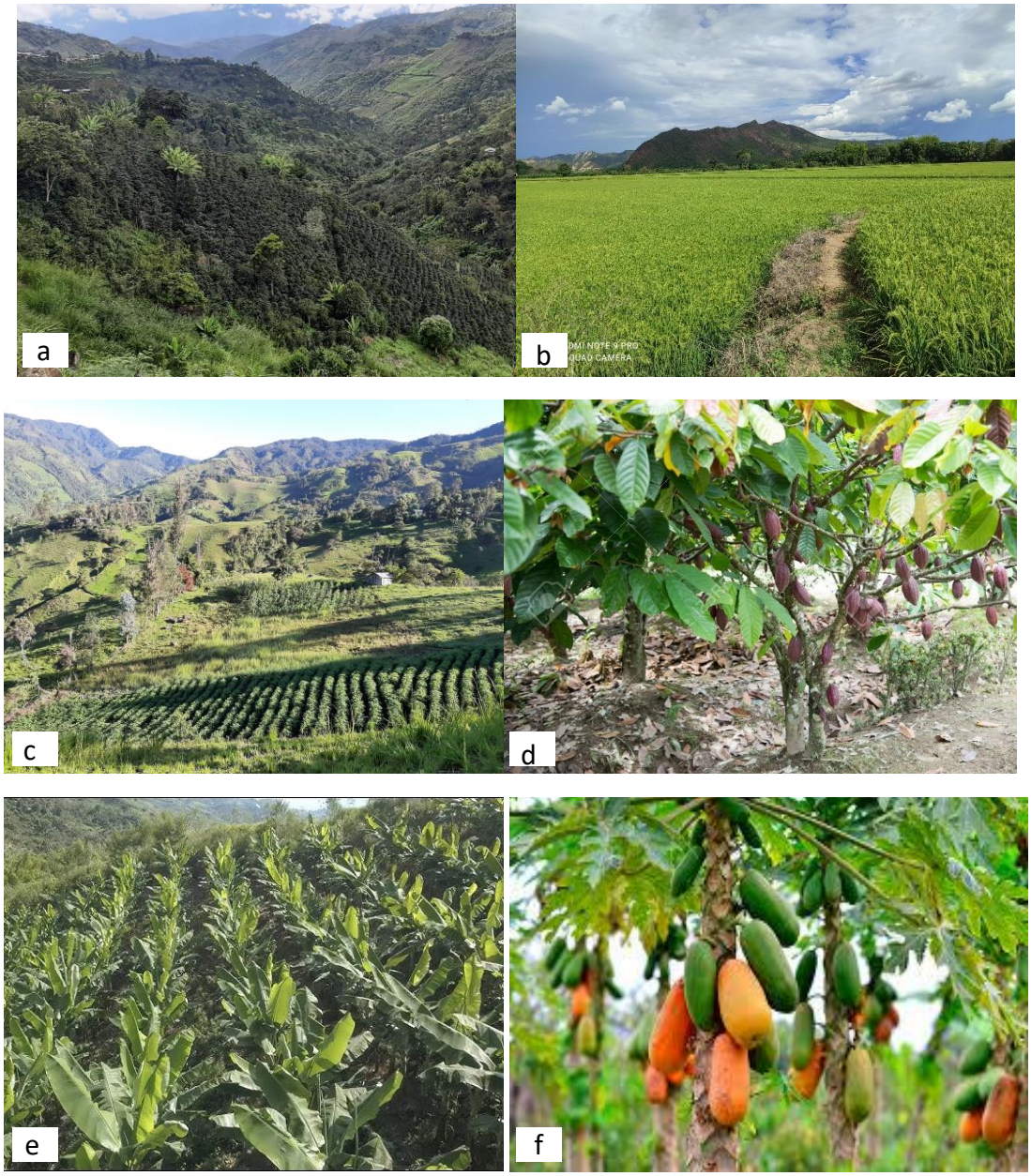
Nota: La imagen muestra un área en proceso de regeneración o vegetación secundaria y al fondo diversas áreas agrícolas, artificiales y pastizales.

6.1.1.5. Agricultura

Terrenos dedicados a cultivos, tanto anuales (arroz, maíz, yuca) como permanentes (café, cacao, plátano). La demanda hídrica varía según el tipo de cultivo y su ubicación (zonas bajas para arroz, zonas altas para café en secano). La preparación del suelo y los tipos de cultivo influyen en la erosión (Figura 16).

Figura 16

Tipología de cultivos agrícolas y su impacto visual en el ecosistema edáfico.



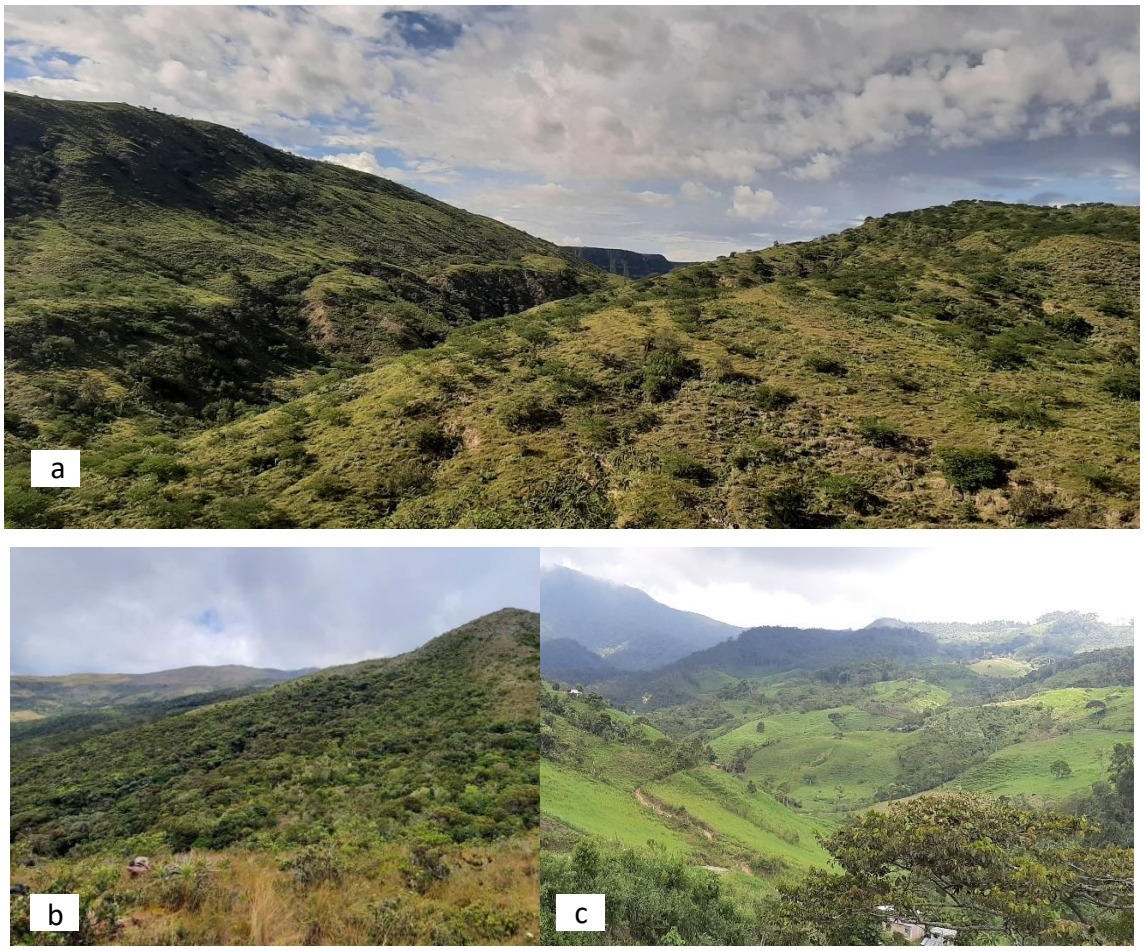
Nota: la figura 16 hace referencia a las principales actividades agrícolas en la Provincia de Jaen. (a) Plantaciones de Café, (b) Cultivo de Arroz, (c) cultivos de pan llevar principalmente estacionales, (d) Cultivos de cacao, (e) Cultivo de plátano y (f) Cultivo de frutales.

6.1.1.6. Pastizales/Herbazales

Áreas cubiertas por vegetación herbácea y arbustiva de forma natural, con densidad variable. Se encuentran en diversos pisos altitudinales. Su impacto en la hidrología y erosión depende de la densidad de la cubierta y las prácticas de manejo (Figura 17).

Figura 17

Distribución de la cobertura tipo pastizal y herbazal según características geomorfológicas y altitudinales.



Nota: a. Cobertura de vegetación herbácea y arbustiva natural en pendientes moderadas. b. Vegetación de tipo herbazal denso, indicativa de pisos altitudinales superiores o zonas de transición c. Paisaje de pastizal/herbazal en área de ladera, donde se observa la influencia de prácticas de manejo (ganaderas y agrícolas), lo cual afecta la hidrología y la susceptibilidad a la erosión.

6.1.1.7. Suelos desnudos

Zonas con vegetación escasa o inexistente, compuestas principalmente por suelo expuesto, áreas quemadas, arena o afloramientos rocosos. Son altamente susceptibles a la erosión hídrica directa debido a la falta de protección vegetal (Figura 18).

Figura 18

Presencia de suelos desnudos identificados en ecosistemas de laderas y valles.



Nota: Vista panorámica de un paisaje altamente susceptible a la erosión hídrica, caracterizado por afloramientos rocosos y suelo expuesto en las laderas.

6.1.1.8. Páramo

Ecosistema de alta montaña (>3000 msnm) caracterizado por clima frío, neblina frecuente y suelos con gruesa capa orgánica. Actúan como importantes reguladores hídricos naturales, con alta capacidad de absorción y liberación lenta de agua, reduciendo la escorrentía superficial. (Figura 19).

Figura 19

Cobertura de páramos andinos y su contexto de recarga hidrológica.



Nota: Vista del ecosistema de alta montaña (superior a 3000 msnm), caracterizado por el clima frío, la neblina y la presencia de suelos con una gruesa capa orgánica.

6.1.2. Análisis de cambios históricos (2000-2020)

El análisis multitemporal de la cobertura y uso del suelo en la Provincia de Jaén durante el periodo 2000-2020 evidencia transformaciones significativas en el paisaje. La Tabla 7 resume la superficie y el porcentaje de ocupación de cada categoría para los periodos 2000-2005 y 2018-2020.

Durante este periodo, los cambios más notables se observan en el incremento de la superficie de Pastizales/herbazales y Áreas Artificiales, en contraste con la disminución de Bosque, Vegetación Secundaria y Agricultura. Los Pastizales/herbazales experimentaron una ganancia significativa de 17,001.9 ha, pasando de representar el 44.1% al 51.4% del territorio provincial. Este incremento podría deberse a la expansión de las prácticas ganaderas extensivas o procesos de regeneración natural en áreas previamente degradadas. Las Áreas Artificiales casi duplicaron su extensión, con una ganancia neta de 2,211.2 ha (del 0.3% al 0.8%), lo que refleja un proceso de urbanización y desarrollo infraestructural. El Suelo desnudo también mostró un incremento de 4,212.1 ha (del 2.3% al 3.1%), posiblemente relacionado con actividades extractivas o erosión.

Por otro lado, la superficie dedicada a la Agricultura presentó una reducción destacable de 32,513.1 ha (del 13.4% al 7.0%), reflejando una posible conversión de

tierras agrícolas hacia otros usos, como pastizales, lo que podría vincularse al abandono de tierras o una transición al modelo ganadero. Las áreas de Bosque disminuyeron en 32,513 ha (del 18.3% al 17.1%), indicativo de procesos de deforestación. La Vegetación Secundaria también se redujo en 4,390.2 ha (del 18.6% al 17.8%), evidenciando la degradación de áreas en recuperación. Las categorías de Páramo y Cuerpos de Agua mostraron variaciones mínimas, sugiriendo una relativa estabilidad en estos ecosistemas durante el periodo estudiado.

Tabla 7

Ocupación (%) de cobertura y uso del suelo para el periodo 2000-2020

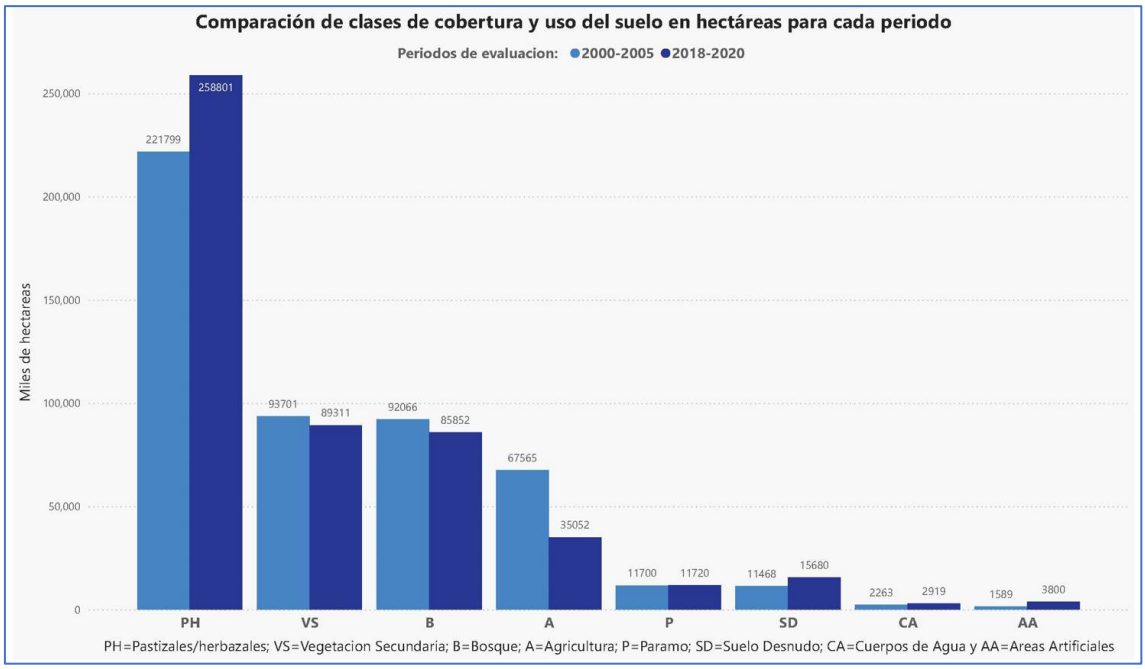
Cobertura y uso del suelo	2000-2005		2018-2020	
	ha	%	ha	%
Bosque mixto	92066.4	18.3	85852.4	17.1
Vegetación Secundaria	93700.8	18.6	89310.5	17.8
Agricultura	67565.3	13.4	35052.2	7.0
Pastizales/herbazales	221798.8	44.1	258800.6	51.4
Cuerpos de Agua	2263.3	0.6	2918.6	0.6
Áreas Artificiales	1589.2	0.3	3800.4	0.8
Páramo	11700.2	2.3	11719.7	2.3
Suelo desnudo	11467.8	2.3	15679.9	3.1
Total	**502151.8**	**100.0**	**503134.4**	**100.0**

Nota: Elaboración Propia.

La representatividad de cada categoría en hectáreas para ambos periodos se visualiza en la Figura 20 y la distribución espacial de las categorías de cobertura y usos del suelo para los años 2000 y 2020 se visualiza en los Mapa de Usos y Coberturas del Suelo (Figuras 21 y 22). Estos mapas a escala 1:800000, muestran claramente que la categoría Pastizales/herbazales fue la más representativa en ambos periodos y experimentó el mayor aumento en términos de área. Su distribución abarcó ampliamente toda el área de estudio, concentrándose principalmente en los distritos de Jaén, Colasay, Pomahuaca y Pucara. Este patrón espacial sugiere que la expansión de esta cobertura está extendida por gran parte del territorio provincial.

Figura 20

Representatividad espacial de las categorías de uso de suelo por periodo de evaluación.

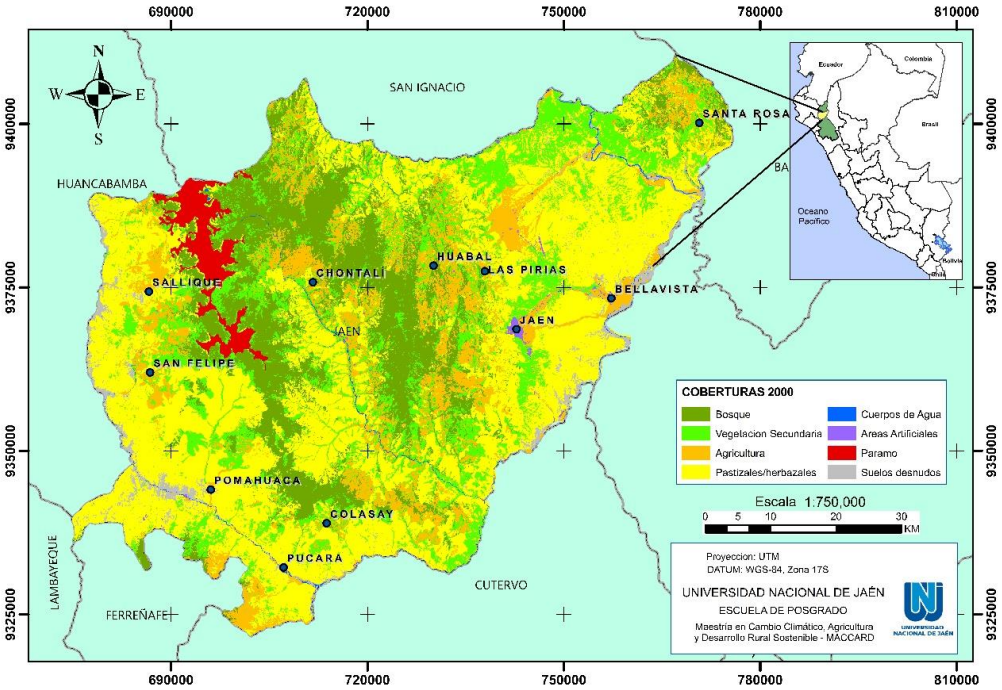


Nota: Elaboración propia

Las áreas de Páramos, ecosistemas de alta montaña importantes para la regulación hídrica, se localizaron de manera más restringida al Noroeste de la provincia, específicamente entre los distritos de San Felipe y Sallique. Por otro lado, las áreas clasificadas como Suelos desnudos se concentraron en sectores específicos de los distritos de Jaén, Bellavista, Pucara y Pomahuaca. Estas áreas, con poca o escasa vegetación, representan zonas con mayor susceptibilidad a la erosión y podrían estar asociadas a condiciones de degradación o actividades que remueven la cubierta vegetal.

Figura 21

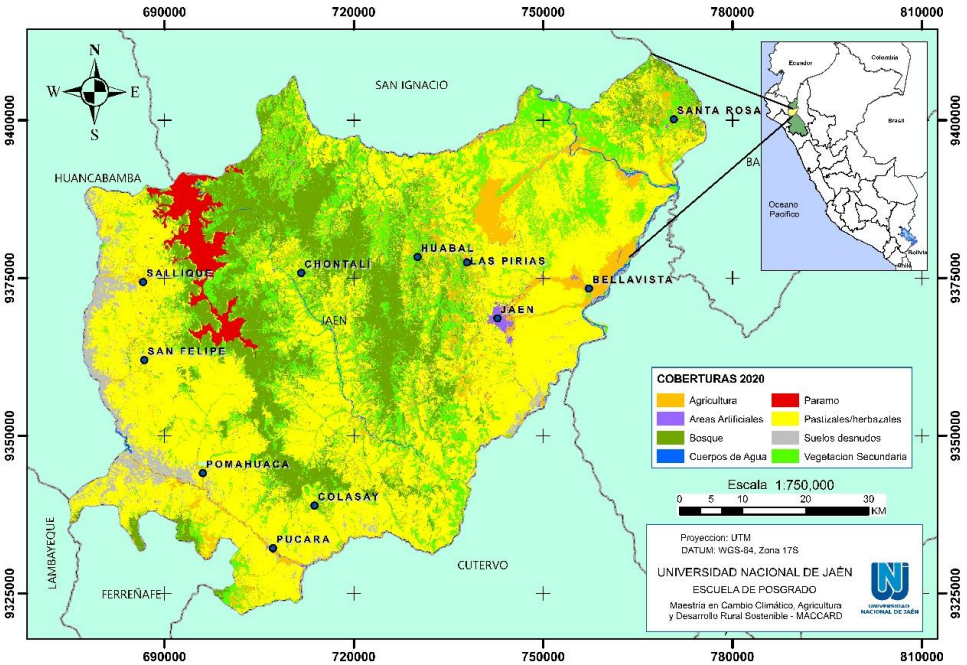
Distribución espacial del uso y cobertura del suelo en el periodo 2000-2005



Nota: Elaboración Propia

Figura 22

Distribución espacial del uso y cobertura del suelo en el periodo 2018-2020



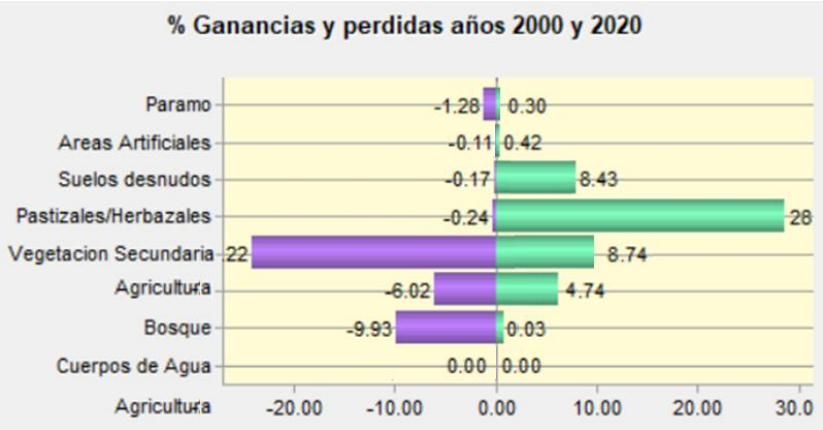
Nota: Elaboración Propia

El análisis de las ganancias y pérdidas brutas entre 2000 y 2020 se distribuyen de la siguiente manera según la figura 23: La categoría de Pastizales/Herbazales presenta una ganancia notable del 28%, lo que denota una expansión considerable de estas áreas. De manera similar, los Suelos Desnudos registran una ganancia significativa, del 8.43%, lo cual podría estar asociado con la progresiva exposición de superficies debido a procesos de erosión o a la conversión de zonas previamente cubiertas por vegetación.

En contraste, se observan reducciones marcadas en otras categorías. La Vegetación Secundaria exhibe una pérdida considerable del 22%, evidenciando una degradación de áreas en proceso de regeneración, que podría estar vinculada a la expansión de usos agrícolas o ganaderos sobre territorios en recuperación. Asimismo, la categoría de Bosque muestra una pérdida del 9.93%, lo cual resulta indicativo de procesos de deforestación o de un mayor aprovechamiento de estas áreas para usos productivos que comprometen su extensión original. La Agricultura también presenta un balance negativo, con una pérdida del 6.02%, a pesar de que se registra una ganancia complementaria del 4.74%, lo cual sugiere la existencia de un comportamiento heterogéneo en el sector agrícola, en el que algunas áreas se expanden mientras otras disminuyen.

Figura 23

Dinámica de ganancias y pérdidas porcentuales en categorías de cobertura terrestre (2000-2020)



Nota: Elaboración Propia

Por otro lado, las variaciones en Áreas Artificiales, Páramo y Cuerpos de Agua son relativamente menores. Las Áreas Artificiales reflejan cambios leves (con una

pérdida del 0.11% contrarrestada por una ganancia del 0.42%), lo que indica un ajuste o recategorización en la clasificación de desarrollos infraestructurales. Del mismo modo, las fluctuaciones en Páramo y Cuerpos de Agua sugieren una estabilidad relativa en estas clases, pese a registrar leves variaciones, las cuales podrían estar relacionadas con condiciones locales o metodológicas en la detección y clasificación satelital (Figura 23).

El análisis de la dinámica territorial de la provincia de Jaén entre los años 2000 y 2020 revela una profunda reconfiguración del paisaje. El hallazgo principal es una marcada expansión de los Pastizales/herbazales, que ganaron más de 17,000 hectáreas, convirtiéndose en la cobertura dominante con más de la mitad del territorio provincial. Este crecimiento, junto con el de Áreas Artificiales y Suelo desnudo, ocurrió a expensas de una notable reducción en la superficie de Agricultura (-12,513 ha), Vegetación Secundaria y Bosque. El análisis de ganancias y pérdidas confirma que la vegetación en regeneración y los bosques fueron las coberturas con mayores porcentajes de pérdida neta, evidenciando una presión constante sobre los ecosistemas naturales de la provincia.

6.1.3. Proyección de cambios futuros (2020-2040)

La proyección de la cobertura y uso del suelo al año 2040, realizada mediante el módulo Land Change Modeler, permite anticipar las tendencias de transformación del territorio. La Tabla 8 presenta un comparativo de la superficie de cada categoría en los periodos históricos (2000-2005 y 2018-2020) y la superficie proyectada para 2040, mostrando las diferencias netas entre estos periodos.

Las proyecciones al año 2040 sugieren que la tendencia de cambio de uso y cobertura del suelo observada en el periodo histórico (2000-2020) en gran medida continuará. Se proyecta una disminución continuada de la superficie de Bosque, con una pérdida adicional de 8,338.5 ha entre 2020 y 2040, sumándose a las pérdidas históricas para alcanzar una reducción total de 14,552.4 ha respecto al año 2000. La Vegetación Secundaria también seguirá una tendencia de disminución, con una pérdida proyectada de 17,761.7 ha en el mismo periodo.

En contraste, se espera que la superficie de Pastizales/herbazales continúe expandiéndose significativamente, proyectando una ganancia adicional de 23,031.5 ha entre 2020 y 2040, lo que representa la mayor ganancia absoluta proyectada para este

periodo. Las Áreas Artificiales también seguirán aumentando, con una ganancia proyectada de 1,845.1 ha, evidenciando la persistencia de los procesos de urbanización. La superficie de Suelo desnudo también proyecta un incremento adicional de 1,713.7 ha.

La Agricultura muestra un comportamiento proyectado ligeramente diferente a la tendencia histórica, con una ganancia proyectada de 1,623.6 ha entre 2020 y 2040, aunque la superficie en 2040 (56,675.8 ha) seguiría siendo menor que en el año 2000. Las categorías de Páramo y Cuerpos de Agua proyectan pérdidas netas, aunque de menor magnitud (1,986 ha y 128.1 ha respectivamente), lo que advierte una posible vulnerabilidad futura incluso en estos ecosistemas relativamente estables en el pasado.

Tabla 8

Comparativo en hectáreas para el 2000-2020 y proyectado al 2040

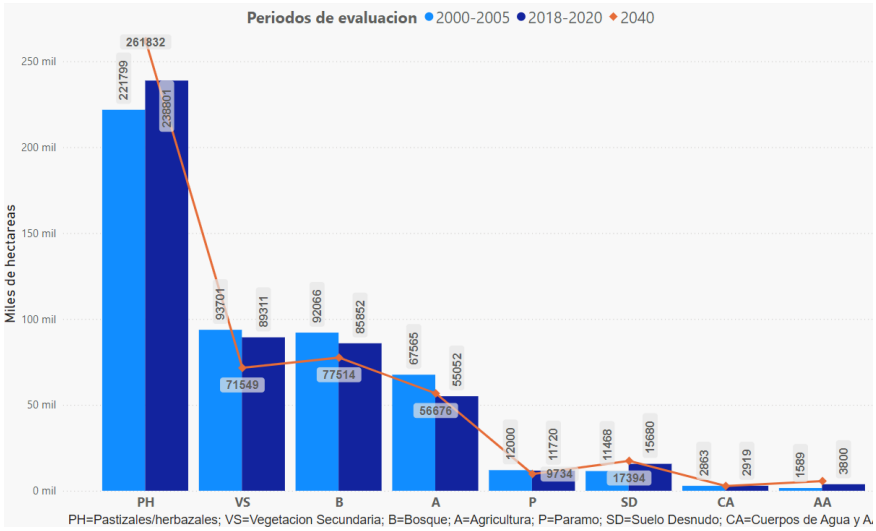
Cobertura y uso del suelo	2000-2005	2018-2020		2040		
	ha	ha	Diferencia 2000-2020	ha	Diferencia 2020-2040	Diferencia 2000-2040
Bosque mixto	92066.4	85852.4	-6214	77514	-8338.5	-14552.4
Vegetación Secundaria	93700.8	89310.5	-4390.2	71548.9	-17761.7	-22151.9
Agricultura	67565.3	55052.2	-12513.1	56675.8	1623.6	-10889.5
Pastizales/herbazales	221798.8	238800.6	17001.9	261832.2	23031.5	40033.4
Cuerpos de Agua	2863.3	2918.6	55.3	2790.5	-128.1	-72.9
Áreas Artificiales	1589.2	3800.4	2211.2	5645.5	1845.1	4056.3
Páramo	12000.2	11719.7	-280.6	9733.7	-1986	-2266.5
Suelo desnudo	11467.8	15679.9	4212.1	17393.6	1713.7	5925.8
Total	**503051.8**	**503134.4**	-	**503134.2**	-	-

Nota: Los valores negativos (-) de diferencias son perdidas de cobertura mientras que los positivos son ganancias de cobertura.

La representación en hectáreas proyectada para 2040 en comparación con los periodos históricos se visualiza en la (Figura 24) y la distribución espacial de las categorías de cobertura y usos del suelo proyectado al 2040 (Figura 25) muestra los resultados de estas tendencias, donde los Pastizales/herbazales continúan siendo la cobertura dominante.

Figura 24

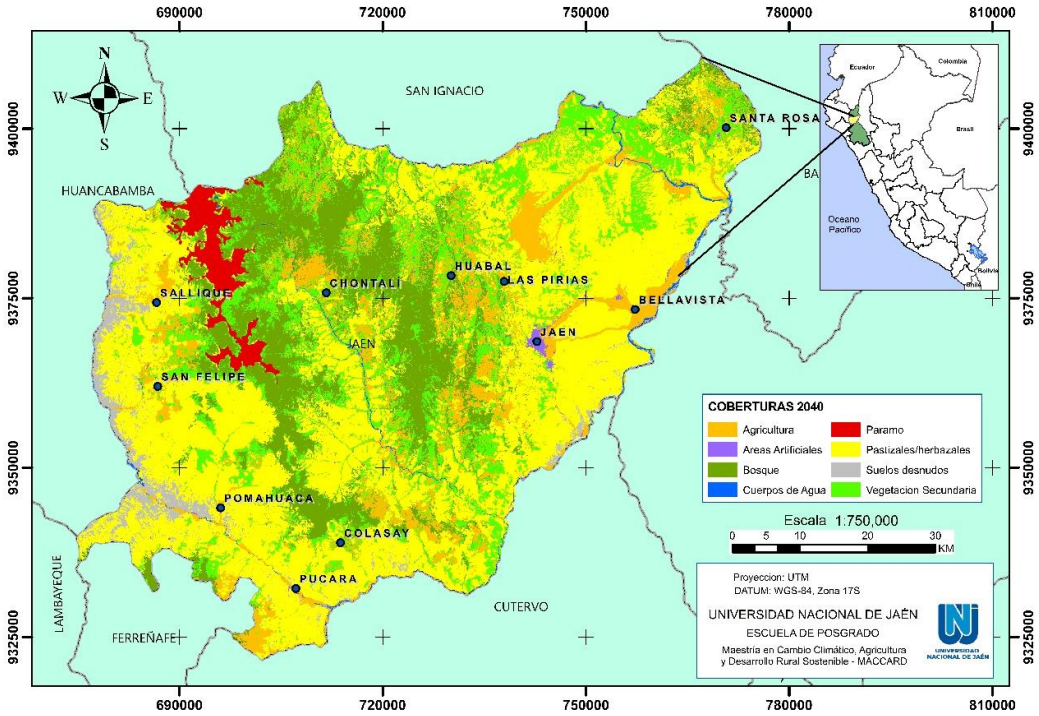
Variación temporal de la superficie territorial: periodos históricos y proyección climática.



Nota: Elaboración propia

Figura 25

Proyección espacial del uso y cobertura del suelo bajo escenarios climáticos al año 2040.



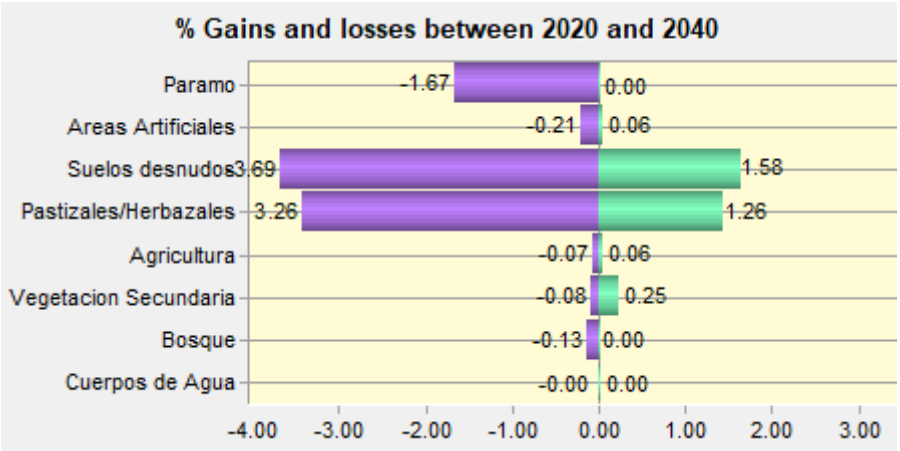
Nota: Elaboración propia

Las ganancias y pérdidas proyectadas al 2040 se presentan en la figura 26 y se distribuyen de la siguiente manera: La categoría del Páramo se proyecta con una pérdida del 1.67%, lo que sugiere una contracción en la extensión de este ecosistema. Por otro lado, las Áreas Artificiales presentan una pérdida marginal del 0.21%. Esta disminución relativamente leve podría interpretarse como resultado de una consolidación del parque urbano e infraestructura existente, sin una expansión significativa de nuevos desarrollos.

En el caso de los Suelos Desnudos, la proyección indica un proceso dual: se observa una pérdida del 3.69% contrapuesta a una ganancia del 1.58%. Esta dualidad sugiere escenarios complejos en los que, por un lado, se evidencia la degradación o la erosión del suelo, mientras que, por otro, ciertas áreas podrían experimentar procesos de revegetación o reordenación territorial, lo que da cuenta de la heterogeneidad de los factores que inciden en este componente del paisaje. De manera similar, la categoría de Pastizales/Herbazales exhibe una dinámica mixta, con una pérdida proyectada del 3.26% y, simultáneamente, una ganancia del 1.26%.

Figura 26

Proyección de ganancias y pérdidas porcentuales de la cobertura terrestre al año 2040



Nota: Elaboración propia

En relación con la Agricultura, las proyecciones muestran estabilidad relativa, evidenciada por una pérdida insignificante del 0.07 frente a una ganancia del 0.06%. Asimismo, la Vegetación Secundaria proyecta una ligera pérdida del 0.08%, compensada por un crecimiento del 0.25%. En el caso del Bosque, se observa una pérdida proyectada del 0.13%, lo que, aunque moderado, implica una posible contracción en la extensión de

este ecosistema fundamental, probablemente como consecuencia de la conversión de áreas para otros usos o de procesos de degradación que aún persisten.

Finalmente, los Cuerpos de Agua se proyectan con una pérdida mínima del 0.06%, reflejando que, si bien se producen algunas variaciones en las áreas hidrológicas, estas son relativamente estables y pueden estar sujetas tanto a factores climáticos como a los ajustes inherentes a los métodos de demarcación.

La proyección al año 2040 sugiere una continuación e intensificación de las tendencias históricas observadas en el periodo 2000-2020. El escenario futuro anticipa que los Pastizales/herbazales seguirán siendo la categoría de mayor expansión, con una ganancia adicional proyectada de más de 23,000 hectáreas. Este crecimiento, sumado al aumento constante de las Áreas Artificiales, se producirá a costa de una pérdida continua de ecosistemas clave, principalmente Vegetación Secundaria (-17,761 ha) y Bosque (-8,338 ha). Estos resultados indican que, de mantenerse las dinámicas actuales, la presión sobre los ecosistemas naturales de la provincia de Jaén no solo persistirá, sino que se agudizará en las próximas dos décadas.

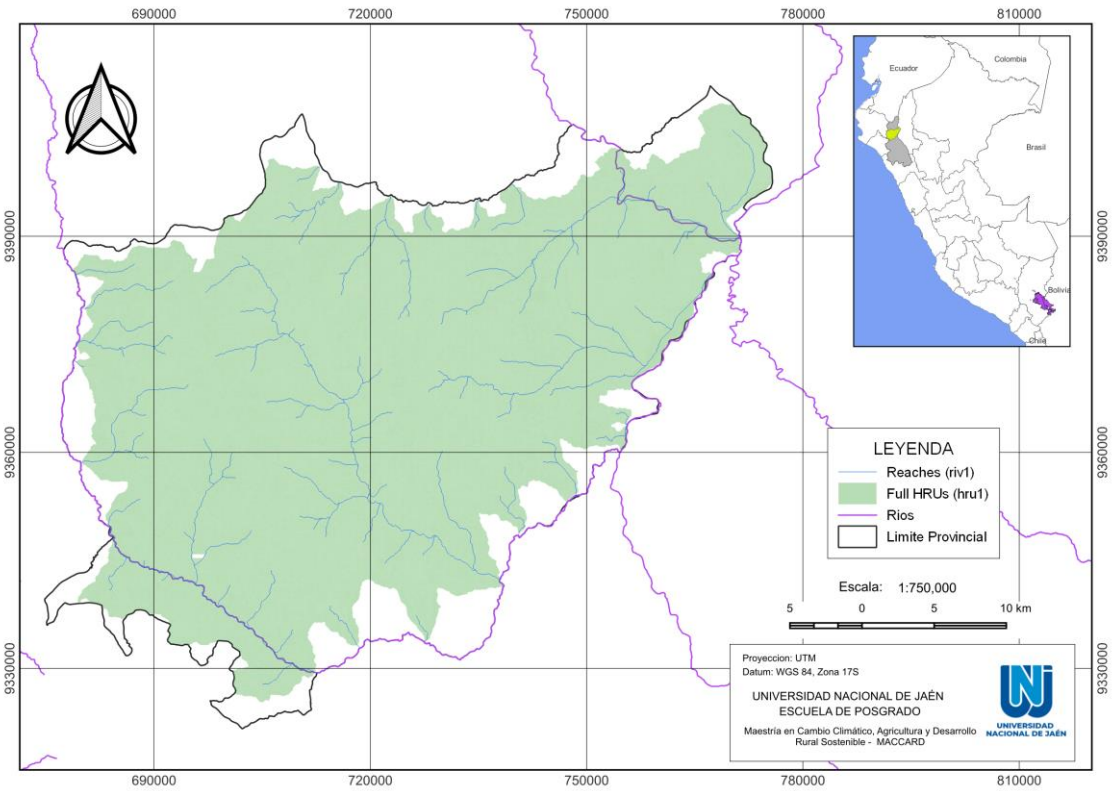
6.2. Modelación hidrológica: Línea base (2000-2020)

6.2.1. Área de estudio y configuración del modelo

El área de estudio comprende a la totalidad de la Provincia de Jaen. La delimitación de estas cuencas se realizó utilizando el software QSWAT 2.0.1 en QGIS 3.28.15, para la cual se tuvo en consideración el umbral mínimo de drenaje de 15 km. La distribución espacial el área modelada se muestra en la Figura 27.

Figura 27

Ámbito geográfico de simulación hidrológica en la provincia de Jaén



Nota: Elaboración propia

La extensión superficial modelada es 433173.84 has. La cual representa el 85.7% del total del territorio provincial.

Tabla 9

Parámetros geofísicos del área evaluada

Cuenca	Área (ha)	Área analizada (%)	Subcuenca	HRU
Área modelada	433173.84	85.7%	168	4045
Provincia Jaén	505700	100	-	-

Nota: Elaboración propia

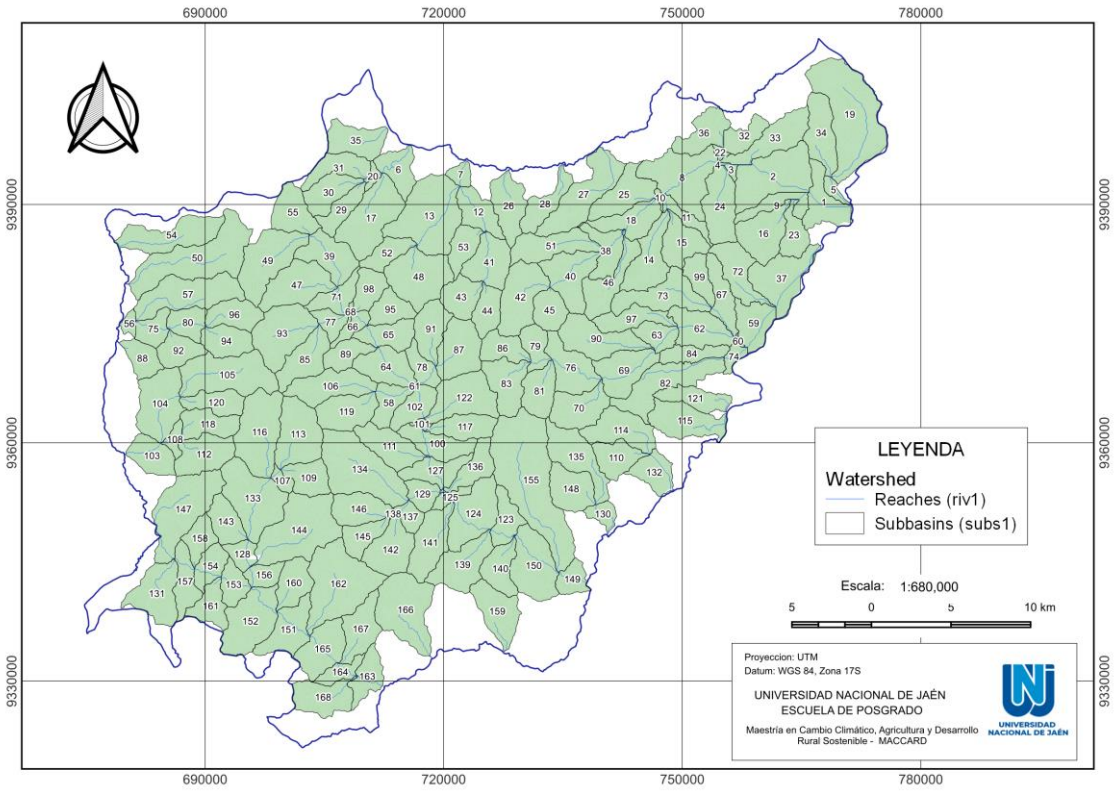
Para la simulación hidrológica, el modelo SWAT subdividió en subcuencas y, a su vez, en Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs), que son agrupaciones homogéneas de uso del suelo, tipo de suelo y pendiente. La Tabla 9 muestra los principales parámetros geofísicos (número de subcuencas y HRUs) generadas en la

modelación hidrológica y muestran 168 subcuencas y 4045 HRUs. La distribución espacial de subcuencas se ilustra en la Figura 28.

Es fundamental precisar que estas 168 subcuencas hidrológicas generadas por el modelo corresponden exactamente a las 168 unidades hidrográficas analizadas y caracterizadas a lo largo de esta investigación, y que se detallan de forma macro en la primera conclusión de este documento. Esta discretización del territorio en 168 unidades operativas fue indispensable para desarrollar un enfoque semi-distribuido, permitiendo capturar con alta resolución la heterogeneidad espacial de las pendientes, las propiedades edáficas y las dinámicas de la cobertura forestal específicas de la Provincia de Jaén.

Figura 28

Discretización espacial de unidades hidrográficas y subcuencas modeladas



Nota: Elaboración propia

6.2.2. Componentes del balance hidrológico de la Línea Base (2003–2020)

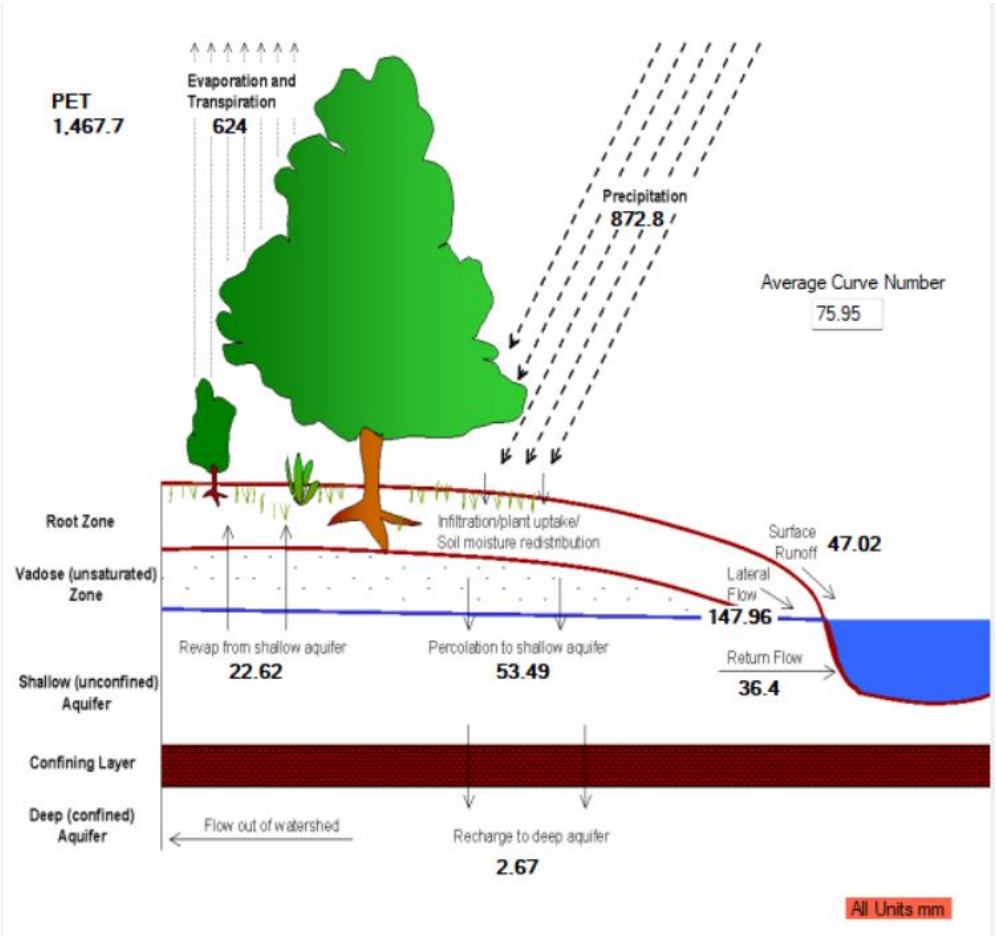
En la simulación anualizada del balance hidrológico promedio inicial para el periodo (2003-2020), se esquematiza en la figura 29. En donde la precipitación total es

872.8 mm, de los cuales 624 mm se pierden por evapotranspiración. La escorrentía superficial es de 47.02 mm, el flujo lateral asciende a 147.96 mm y el flujo de retorno es 36.4mm. Además, se infiltran 53.49 mm al acuífero, mientras 22.62 mm retornan a la zona radicular. Únicamente 2.67 mm recargan el acuífero profundo. El Número de Curva promedio (75.95) refleja una infiltración moderada y un potencial de escorrentía significativo.

Los valores de precipitación se encuentran comprendido entre el rango de 200 a 1500 mm los cuales están dentro de la media anual reportado por el (ANA, 2011b) quien cita al Programa de prevención y Medidas de Mitigación ante desastres de la Ciudad de Cajamarca del 2005.

Figura 29

Componentes del balance hidrológico anual promedio en el área de estudio



Nota: Elaboración propia

La producción de agua para la provincia de Jaen es 231.28 mm, lo que equivale al 27% de la precipitación simulada (Tabla 10). Estos parámetros se determina de la sumatoria del flujo lateral, flujo de retorno y escorrentía superficial (Arriaga Pérez, 2021).

Para la estimación y análisis de los componentes del balance hidrológico en las 168 unidades hidrográficas de la Provincia de Jaén, se introdujeron los registros climáticos diarios correspondientes al periodo histórico continuo de 21 años (2000–2020). Con la finalidad de inicializar los estados de almacenamiento de agua en el perfil del suelo, mitigar las condiciones de incertidumbre iniciales del modelamiento y garantizar la estabilización de los parámetros hidrológicos del modelo SWAT, se configuró un periodo de calentamiento (warm-up period) de tres (3) años, correspondientes a las variables temporales del 2000, 2001 y 2002. En consecuencia, los valores numéricos, tasas promediadas y análisis espacial de los componentes del balance hídrico (precipitación, evapotranspiración real, escorrentía superficial, percolación y recarga de acuíferos) presentados en esta sección extraen sus estadísticas rigurosas del periodo estabilizado comprendido entre los años 2003 y 2020. De este modo, la exclusión estricta del periodo de calentamiento en los reportes analíticos subsiguientes garantiza la eliminación de anomalías numéricas artificiales, asegurando que el balance hídrico final constituya una representación estadísticamente robusta y fiel de la dinámica ambiental de la cuenca.

Tabla 10

Cálculos de componentes del balance hidrológico

Abreviación	**Valores**	**% de precipitación ocurrida**
Precipitación (PRECIPmm)	872.8	
Evapotranspiración (ETmm)	624	
Escorrentía superficial (SURQmm) (a)	47.02	
Flujo Lateral (LAT_Qmm) (b)	147.96	
Agua Subterránea (GW_Qmm) (c)	36.4	
Producción de agua (WYLDmm) (a+b+c)	231.28	27%
SYLDt_ha	14.95	

Nota: En base a promedios de la modelación hidrología en SWAT, en donde: PRECIPmm= Precipitación, ETmm= Evapotranspiración, SURQmm= Escorrentía superficial, LAT_Qmm= Flujo lateral, GW_Qmm= Agua subterránea, WYLDmm= Producción de agua, SYLDt_ha= Erosión hídrica; en la fila WYLDmm se representa el x% de la relación Producción de Agua (WYLDmm) entre la precipitación (PRECIPmm).

6.2.3. Producción de sedimentos (SYLD - Línea base)

La modelación hidrológica con SWAT determinó que la producción de sedimentos para la provincia de Jaen es 14.95 t/ha, teniendo en consideración que el 78.2 % del territorio se encuentra en pendientes mayores a 25% (Figura 30)

Figura 30

Clasificación y distribución porcentual de pendientes topográficas

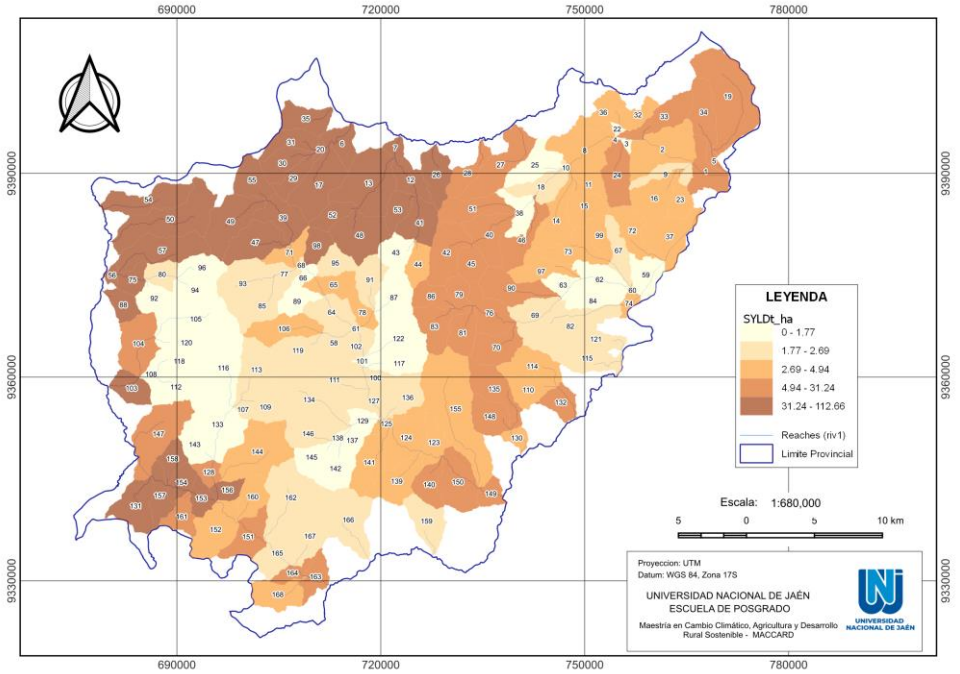
Slope (%)	Area (ha)	%Watershed
0 - 4	15945.5	3.7
4 - 8	12720	2.9
8 - 15	22769.4	5.3
15 - 25	43177.8	10.0
25 - 50	151266.4	34.9
50 - 75	137369.7	31.7
>75	49925.1	11.5

Nota: Elaboración propia

La distribución espacial de la producción de sedimentos (SYLDt_ha) para la provincia se representan en la figura 31.

Figura 31

Distribución espacial de la tasa de producción de sedimentos



Nota: Elaboración propia

La tabla 11 presenta el top 15 de las subcuencas con mayor aporte de sedimentos, la cual hace la representación del 9% del total del territorio, las cuales producen el 46.8% sedimentos (77.2 t/ha) y en área tienen una representación del 0.07% del total del territorio. El anexo 4 lista el total de subcuencas.

Tabla 11

Aporte de Sedimentos de las 15 Subcuencas Prioritarias en la Provincia de Jaén

N° Orden	Subbasin	AREAkm2	SYLDt_ha	% Representatividad
1	41	29	112.7	4.48%
2	56	5	111.3	4.43%
3	26	28	105.6	4.20%
4	12	22	99.2	3.95%
5	154	16	77.7	3.09%
6	75	14	76.0	3.03%
7	6	20	75.3	3.00%
8	7	7	72.6	2.89%
9	13	64	68.1	2.71%
10	157	20	64.7	2.58%
11	131	35	64.3	2.56%
12	17	48	62.0	2.47%
13	35	26	60.3	2.40%
14	20	3	54.0	2.15%
15	30	23	53.7	2.14%
	9%	**0.07%**	**77.2**	**46.08%**

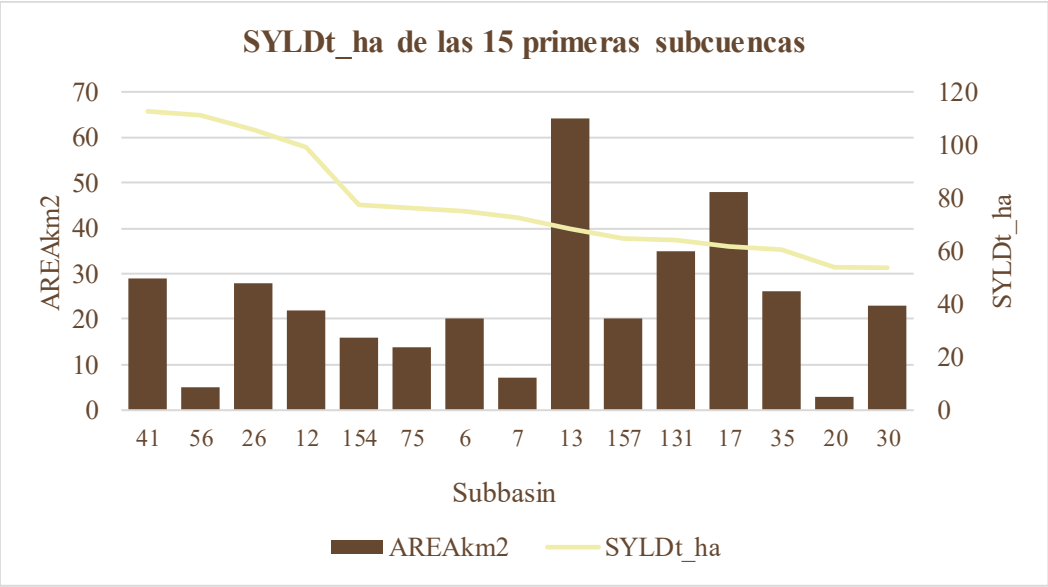
Nota: Elaboración propia

Se observa que la subcuenca 41, a pesar de no ser la más extensa (29 km²), es la que genera la mayor cantidad de sedimentos por hectárea. En contraste, la subcuenca 13, que es la más grande de este grupo con un área aprox. a los 64 km², ocupa el noveno lugar en términos de tasa de erosión (SYLDt_ha). Asimismo, subcuencas relativamente pequeñas en área, como la 56 (5 km²) y la 26 (28 km²), se posicionan como la segunda y tercera mayores productoras de sedimentos por hectárea, respectivamente. (Figura 32).

Esta falta de relación sugiere que la producción de sedimentos en las subcuencas más críticas está determinada predominantemente por otros factores biofísicos, tales como el tipo y uso del suelo, la pendiente del terreno, las prácticas de manejo agrícola y la intensidad de la precipitación, más que por su extensión territorial.

Figura 32

Relación entre la producción de sedimentos y la superficie de las subcuencas prioritarias

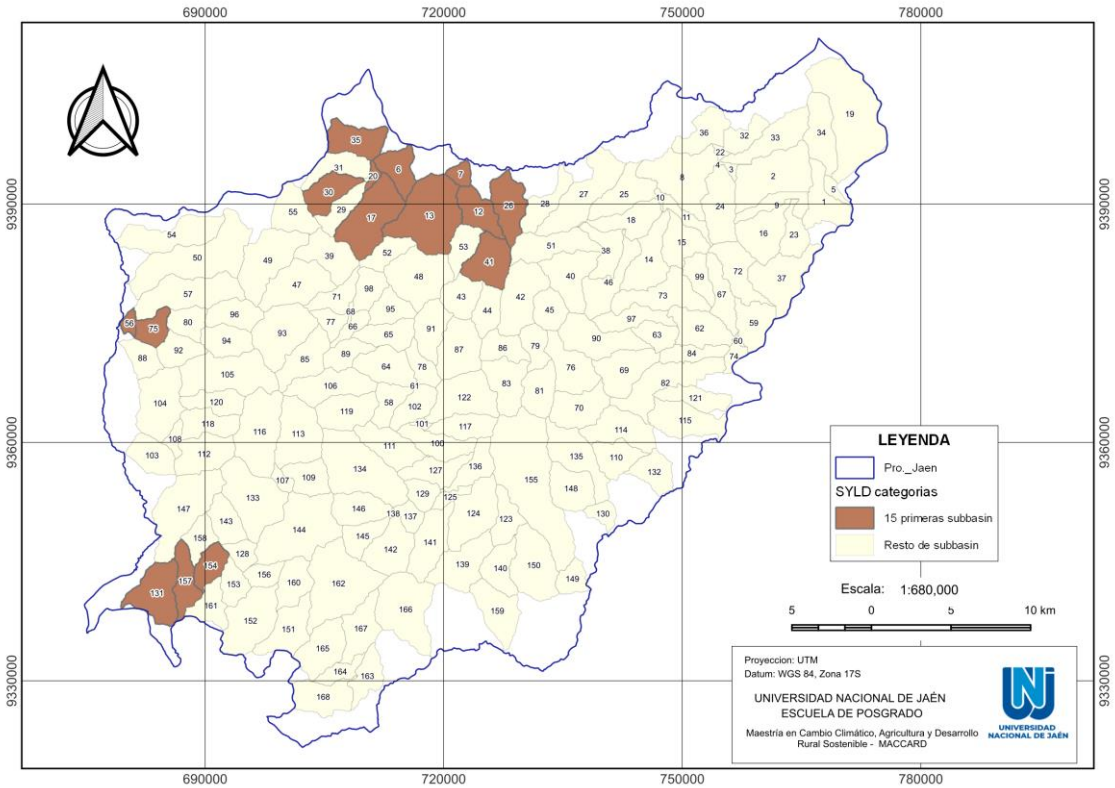


Nota: Elaboración propia

La figura 33, representa la distribución geográfica de las 15 subcuencas que han sido identificadas como las principales fuentes de producción de sedimentos dentro del área de estudio. Se observa una notable concentración de subcuencas críticas en la porción central y norte de la cuenca. Este grupo es el más numeroso e incluye subcuencas clave como la 26, 12, 13, 7, y 6, indicando que esta zona es la principal aportante de sedimentos en la provincia. Un segundo grupo importante se localiza en la zona suroeste, donde se encuentran las subcuencas 154, 157, 131 y 17. Adicionalmente se identifican focos de erosión más aislados en el extremo oeste (subcuenca 90) y noroeste (subcuenca 35).

Figura 33

Identificación de subcuencas con nivel crítico en la producción de sedimentos



Nota: Elaboración propia

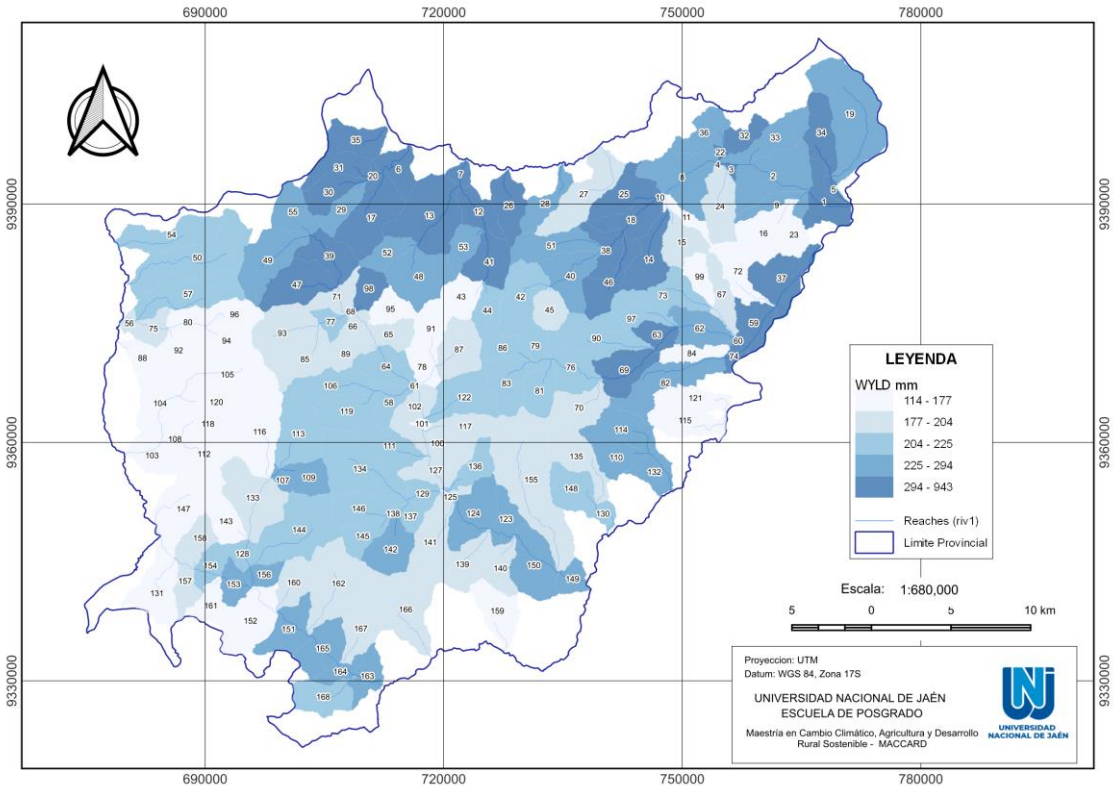
6.2.4. Percolación (PERCmm - Línea base)

La figura 34 presenta un mapa de distribución espacial de la percolación media anual, expresada en milímetros (PERCmm), para cada una de las subcuencas modeladas en la provincia de Jaén.

Las tasas más elevadas de percolación se concentran al norte y noreste de la provincia, así como en un área significativa en la zona centro-occidental. Por el contrario, las áreas con las menores tasas de percolación se localizan en la zona sureste y en algunas subcuencas del oeste

Figura 34

Distribución espacial de las tasas de percolación en el subsuelo



Nota: Elaboración propia

El análisis del mapa revela una heterogeneidad espacial significativa en la capacidad de recarga hídrica a lo largo de la provincia. La percolación no se distribuye de manera uniforme, sino que se concentra en zonas geográficas específicas, lo que permite identificar las principales áreas de recarga de acuíferos.

La tabla 12 presenta una clasificación jerárquica de las 15 subcuencas con las mayores tasas de percolación (PERCmm). La percolación es el proceso clave de la recarga hídrica, es decir, el volumen de agua que se infiltra a través del perfil del suelo para alimentar los acuíferos, el anexo 5 presenta la totalidad de cuencas aportantes de percolación.

Tabla 12

Aporte de Percolación de las 15 Subcuencas Prioritarias en la Provincia de Jaén

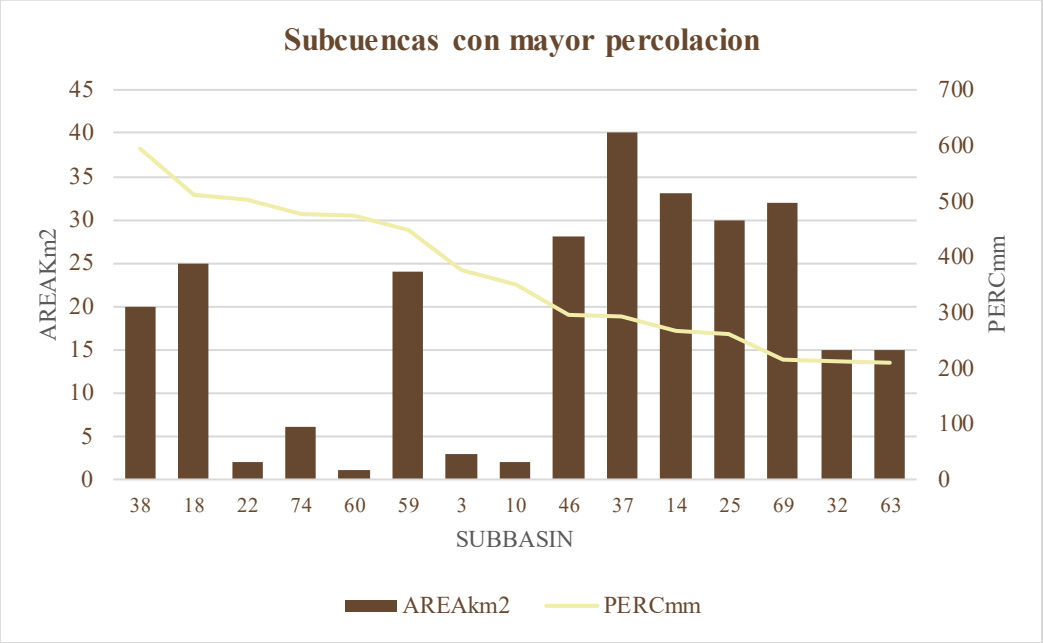
N° Orden	Subbasin	AREAkm2	PERCmm	% Representatividad
1	38	20	594.38	5.1%
2	18	25	510.44	4.3%
3	22	2	501.81	4.3%
4	74	6	476.98	4.1%
5	60	1	475.29	4.0%
6	59	24	447.66	3.8%
7	3	3	376.10	3.2%
8	10	2	350.86	3.0%
9	46	28	295.30	2.5%
10	37	40	293.39	2.5%
11	14	33	265.58	2.3%
12	25	30	260.71	2.2%
13	69	32	216.41	1.8%
14	32	15	212.54	1.8%
15	63	15	209.76	1.8%
	9%	**5.5%**	**365.81**	**46.7%**

Nota: Elaboración propia

El resultado más significativo es que estas 15 subcuencas, que representan una 9% del total, son responsables de casi la mitad (46.7%) del volumen total de agua que recarga los acuíferos en toda la provincia. Esto demuestra que el proceso de recarga hídrica no es homogéneo, sino que está altamente concentrado en zonas específicas que poseen condiciones biofísicas óptimas.

Figura 35

Relación entre la tasa de percolación y la extensión territorial de subcuencas prioritarias



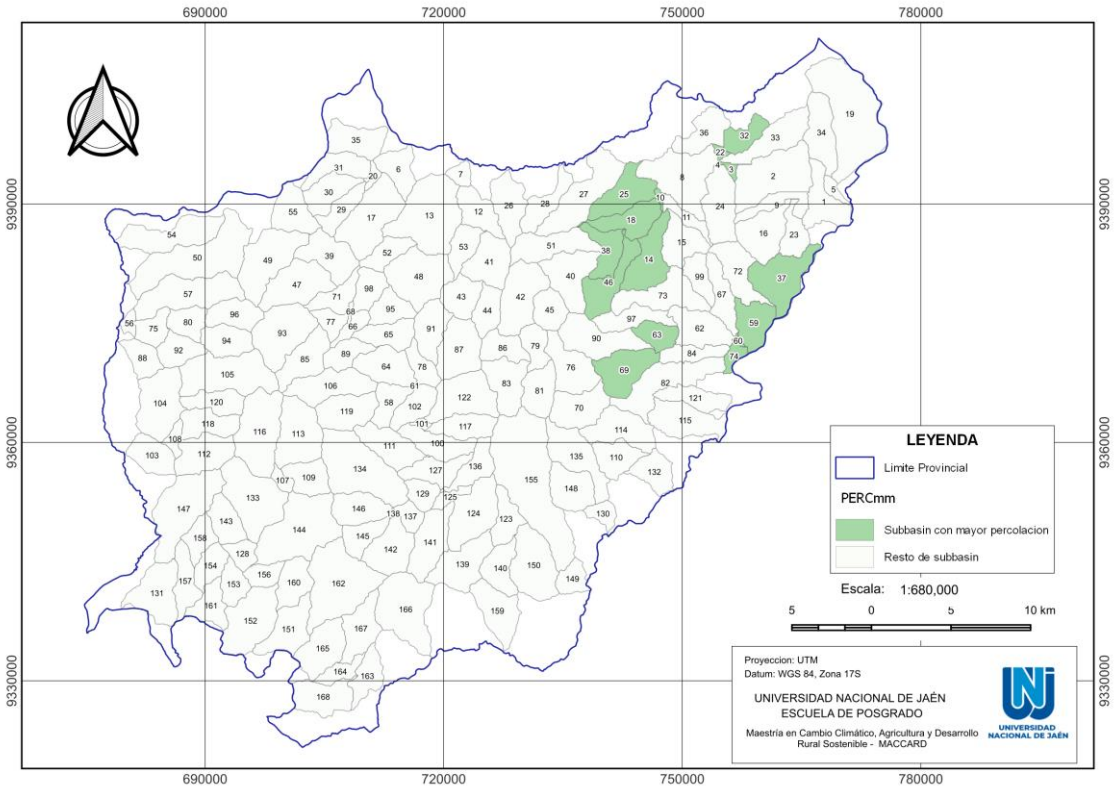
Nota: Elaboración propia

Se observa que las tasas más altas de percolación no corresponden necesariamente a las subcuencas de mayor tamaño. Por ejemplo, la subcuenca 37, con 40 km², es la más extensa de la lista, pero ocupa el décimo lugar en la clasificación. En cambio, subcuencas mucho más pequeñas como la 60 (1 km²) y la 22 (2 km²) se encuentran en las 5 primeras. Esta evidencia confirma que los factores determinantes de la percolación no son la extensión del terreno, sino las propiedades intrínsecas del terreno, tales como: Tipos de suelo de alta permeabilidad, Cobertura vegetal densa que promueve la infiltración y Pendientes suaves (Figura 35).

El mapa que se muestra en la figura 36 ilustra la localización geográfica de las 15 subcuencas identificadas con las mayores tasas de percolación (PERCmm) dentro de la Provincia de Jaén.

Figura 36

Localización de las subcuencas con mayor capacidad de percolación



Nota: Elaboración propia

Las subcuencas con mayor potencial de recarga no están dispersas al azar, sino que se agrupan principalmente en la región noreste de la provincia, con algunas apariciones en la zona central y occidental. Este patrón de agrupamiento sugiere que las condiciones biofísicas que favorecen la alta percolación, tales como suelos permeables, cobertura forestal densa y pendientes moderadas, predominan en estas áreas específicas (Figura 36)

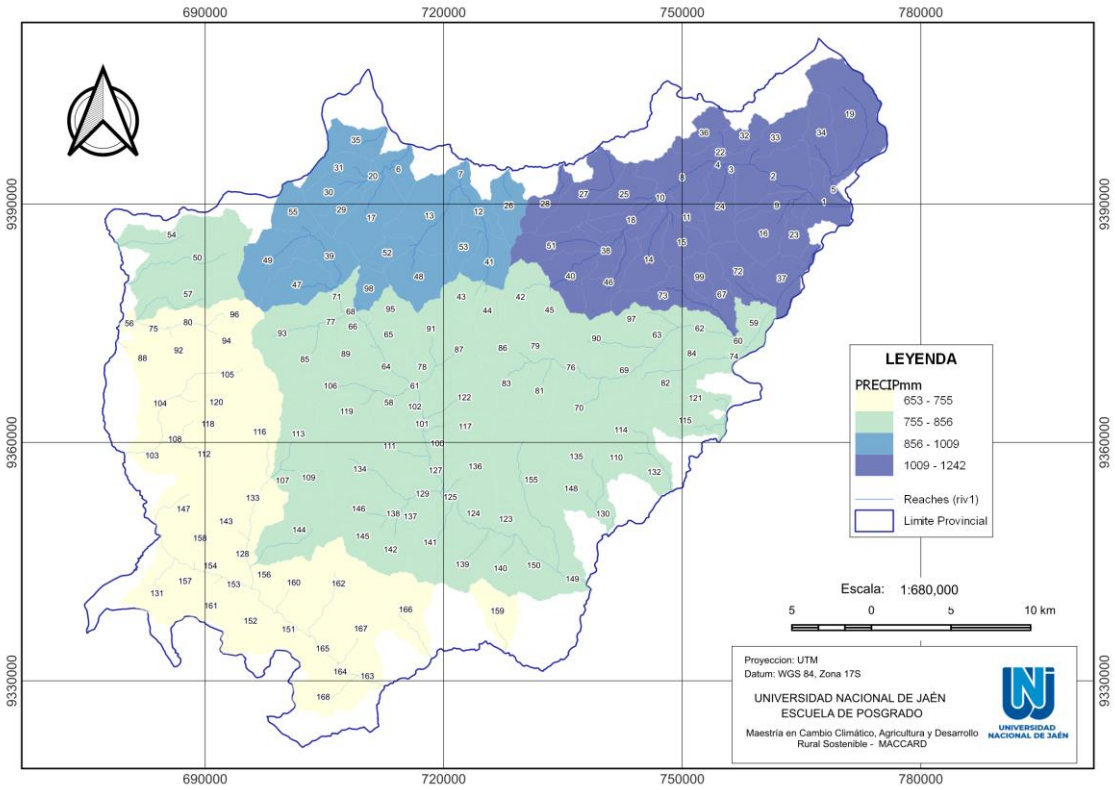
La figura 37, muestra la distribución espacial de la precipitación media anual (PRECIPmm) en la provincia de Jaén, resultado de la entrada de datos climáticos en el modelo SWAT.

La precipitación constituye el insumo climático primordial que actúa como el motor de la respuesta hidrológica en las cuencas de Jaén. Lejos de ser uniforme, su distribución espacial exhibe un gradiente bien definido, concentrando los mayores volúmenes anuales en la zona norte y noreste. Esta variabilidad geográfica es de suma

importancia, pues condiciona de manera directa dos procesos hidrológicos que son cruciales para la gestión del territorio. Por un lado, la alta energía de la lluvia en la zona noreste la convierte con mayor potencial para la erosión hídrica y, consecuentemente, para la producción de sedimentos (SYLD).

Figura 37

Dinámica espacial de la precipitación media anual



Nota: Elaboración propia

Por otro lado, esta misma abundancia de agua la establece como el área con la mayor disponibilidad de recurso para la percolación (PERC) y la recarga de los sistemas de agua subterránea, siempre que las condiciones de suelo y cobertura lo permitan.

El balance general de la erosión en el área de estudio indica una condición predominantemente estable. La Tabla 13 muestra que el nivel de erosión Muy Leve abarca 279,579.6 ha, lo que corresponde al 70% del territorio. Las categorías Leve y Moderado representan cada una un 10% del área, mientras que los niveles más críticos, Severo (9%) y Muy Severo (1%), en conjunto, constituyen un 10% de la superficie provincial (40,444.24 ha)

Tabla 13

Niveles de erosión y distribución de área en la zona de estudio

Niveles erosión	Área (ha)	Niveles erosión % de área	Donde se ubica la erosión
Muy Leve	279579.6	70%	Baja, Media, Alta
Leve	39321.05	10%	Baja, Media, Alta
Moderado	41553.87	10%	Baja, Media, Alta
Severo	37392.17	9%	Baja, Media, Alta
Muy Severo	3052.07	1%	Baja, Media

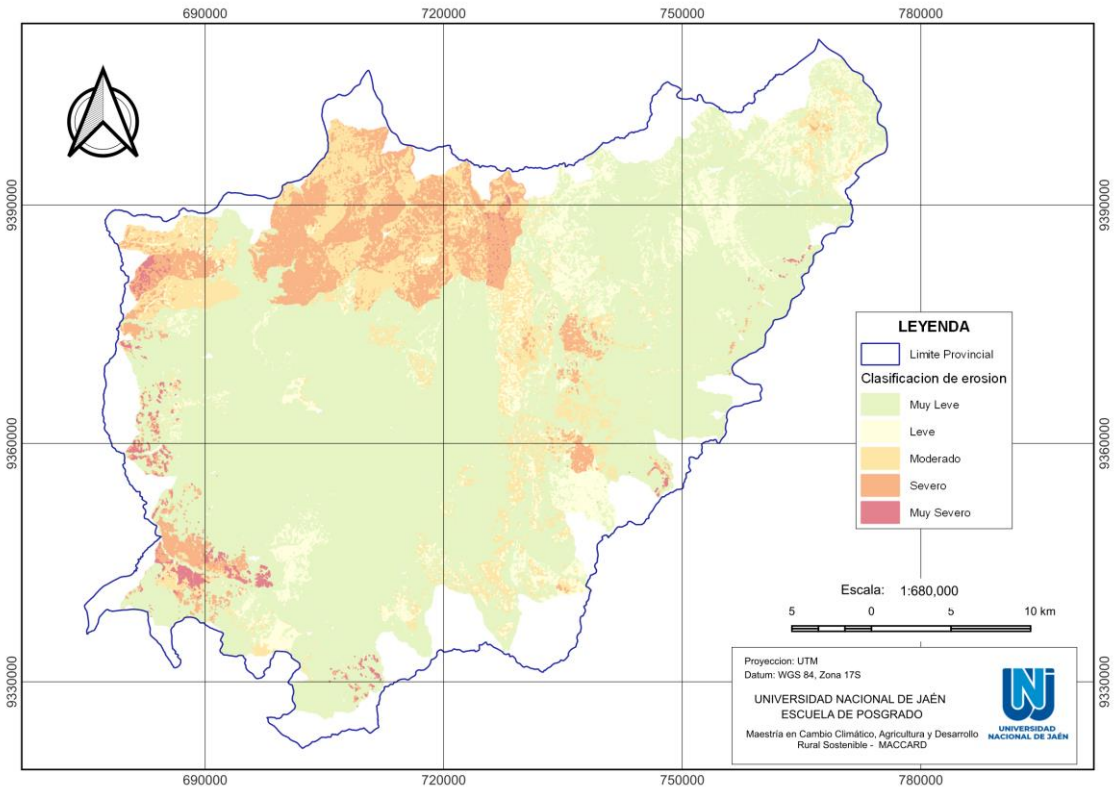
Nota: Elaboración propia

No obstante, el 30% restante del área presenta niveles de erosión que van de leves a muy severos. Las categorías Leve y Moderado ocupan extensiones similares, con 39,321.05 ha (10%) y 41,553.87 ha (10%) respectivamente.

La Figura 38 ilustra que estas áreas de alta degradación no son aleatorias, sino que se concentran en "puntos calientes" (hotspots), principalmente en las zonas noroccidental y suroccidental.

Figura 38

Clasificación espacial de la vulnerabilidad a la erosión hídrica



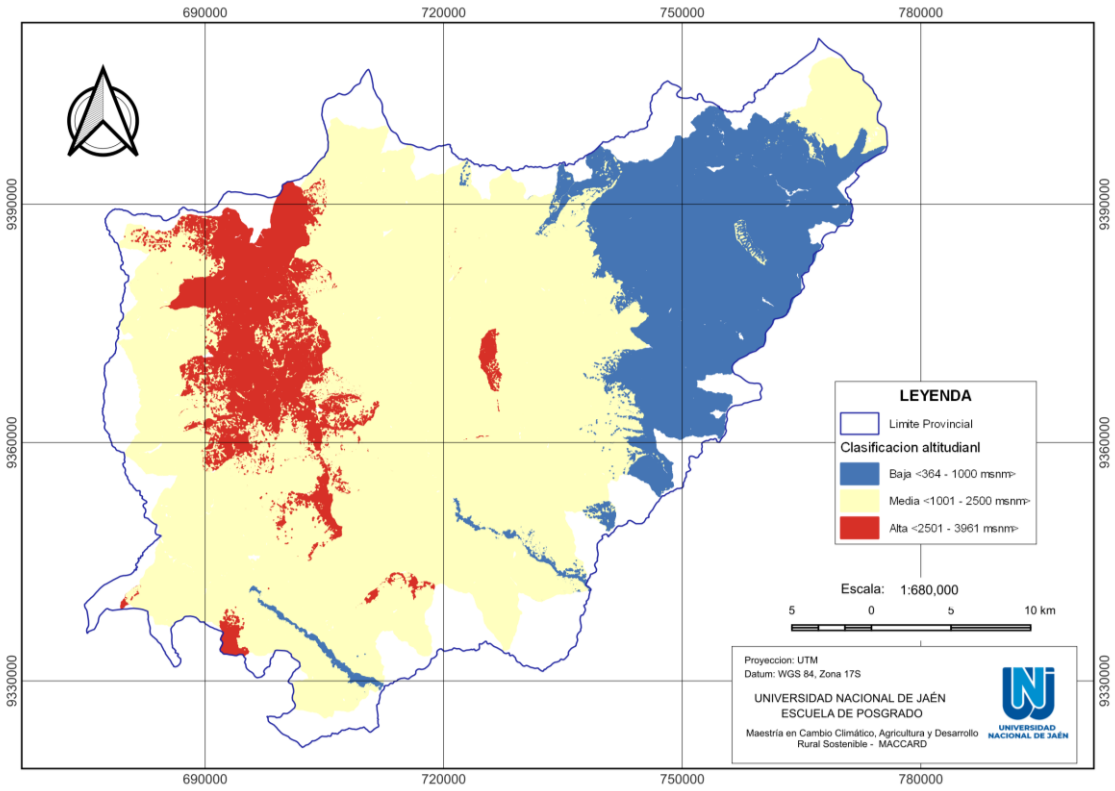
Nota: Elaboración propia

El análisis se profundiza al cruzar estos niveles de erosión y pendiente (Tabla 14) con las variables topográficas de altitud (Figura 39).

Mientras que los niveles de erosión de Leve a Severo se registran en todas las franjas altitudinales (Baja, Media y Alta), es notable que la erosión Muy Severa se restringe a las zonas de altitud Baja y Media.

Figura 39

Modelo Digital de Elevación y clasificación de pisos altitudinales



Nota: Elaboración propia

La pendiente del terreno demuestra ser un factor de control fundamental. La erosión Muy Leve es la única categoría presente en las pendientes más suaves (0-4%). A medida que la pendiente aumenta, aparecen niveles de erosión más altos. El hallazgo más significativo es que la erosión Muy Severa ocurre exclusivamente en los rangos de pendiente más elevados: 50-75% y >75%. Estos dos rangos de pendiente, aunque solo representan el 44.9% del área total, son los únicos escenarios donde se manifiesta la máxima degradación del suelo.

Tabla 14

Niveles de erosión por rangos de pendientes

Rangos/ %pendiente	0-4 (2.8)	4-8 (2.3)	8-15 (4.2)	15-25 (9.4)	25-50 (36.3)	50-75 (33.2)	>75 (11.7)
Muy Leve	x	x	x	x	x	x	x
Leve		x	x	x	x	x	x
Moderado		x	x	x	x	x	x
Severo			x	x	x	x	x
Muy Severo						x	x

Nota: Elaboración propia

El uso del suelo en la provincia está dominado por Pastizales/Herbazales (MIGS), que cubren el 52.1% del territorio, seguido por el Bosque mixto (FRST) con un 18.9% y la Vegetación Secundaria (RNGB) con un 17.9%. Usos como la Agricultura (CRGR) y el Suelo desnudo (BARR) ocupan áreas considerablemente menores, con un 6.7% y 1.7% respectivamente (Tabla 15).

El análisis de la contribución de cada uso a la erosión total revela disparidades críticas que son fundamentales para entender la dinámica de los sedimentos:

Principales Fuentes de Erosión: El Suelo desnudo (BARR), a pesar de cubrir tan solo el 1.7% del área, es responsable del 34.1% de la erosión total de la provincia. De manera similar, la Agricultura (CRGR), con el 6.7% del área, genera el 17.0% de la erosión. Estos dos usos del suelo son, por tanto, desproporcionadamente degradantes.

Coberturas Protectoras: En marcado contraste, el Bosque mixto (FRST), que ocupa el 18.9% del territorio, contribuye con apenas el 9.5% de la erosión. La cobertura más eficiente es el Páramo (VEPA), que ocupando el 2.3% del área genera un insignificante 0.3% de la erosión total.

Estos hallazgos sobre el uso del suelo, sumados a los análisis previos, establecen que la erosión severa se manifiesta cuando un uso de suelo vulnerable se localiza en una topografía de alto riesgo (pendientes >50% en altitudes bajas y medias).

El panorama de la percolación, sin embargo, es marcadamente diferente. Como se detalla en la Tabla 15, la contribución al volumen total de agua percolada está

directamente relacionada con la extensión de la cobertura. Los Pastizales/Herbazales (MIGS), al ser el uso más extendido (52.1% del área), se constituyen como la principal fuente de recarga hídrica subsuperficial, aportando el 54.4% del volumen total. Le siguen en importancia el Bosque mixto (FRST) con un 19.8% y la Vegetación Secundaria (RNGB) con un 18.0%, ambos con contribuciones proporcionales a su superficie.

Es notable que los usos más erosivos, Suelo desnudo y Agricultura, tienen una participación minoritaria en el balance de la percolación, con solo el 3.5% y 7.9% del total, respectivamente.

La modelación integrada demuestra que la gestión del territorio en Jaén debe basarse en esta comprensión funcional del paisaje. Las estrategias de conservación deben ir más allá de simplemente controlar la erosión, buscando optimizar el balance entre los servicios ecosistémicos. Esto implica una restauración activa de las áreas de Suelo desnudo y una reconversión de las prácticas agrícolas en las zonas de alto riesgo, al tiempo que se protege rigurosamente la integridad de los bosques y páramos, que constituyen la infraestructura natural que garantiza la estabilidad y la provisión de agua de la provincia a largo plazo.

Tabla 15

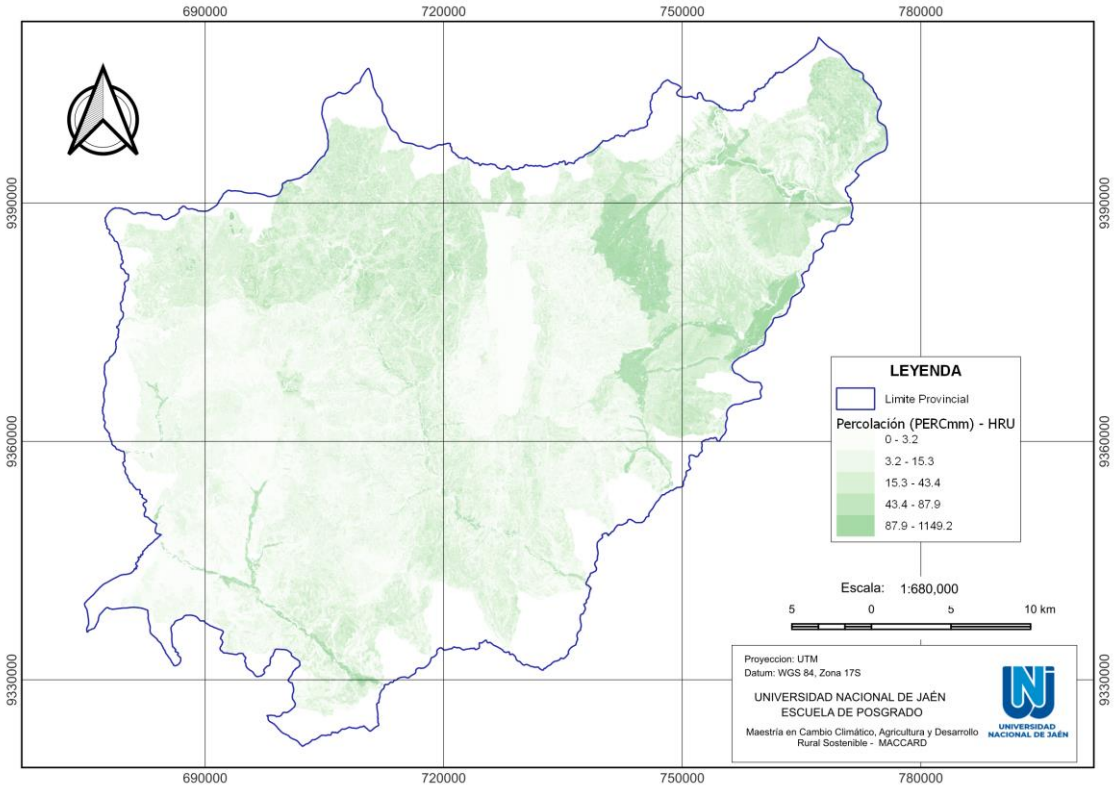
Distribución de usos y coberturas y/o otras características de la zona de estudio

Uso de Suelo	Descripción	Área (Ha)	Área (Km)	Área de uso (%)	SYLDt_ha	PERCmm	Erosión por uso (%)	Percolación total (%)
BARR	Suelo desnudo	8,597.35	85.97	1.7	336318.9	405342.4	34.1	5.6%
URLD	Área urbana	1,517.18	15.17	0.3	1658.9	242809.8	0.2	3.4%
CRGR	Agricultura	33,883.68	338.84	6.7	167180.2	2293461.9	17.0	31.8%
FRST	Bosque mixto	95,582.31	955.82	18.9	93845.0	203637.5	9.5	2.8%
MIGS	Pastizales/Herbazales	263,483.51	2,634.84	52.1	203258.4	2028710.5	20.6	28.2%
RNGB	Vegetación Secundaria	90,525.04	905.25	17.9	180597.2	1951424.3	18.3	27.1%
VEPA	Páramo	11,631.71	116.32	2.3	3183.3	75442.8	0.3	1.0%
WATR	Cuerpos de Agua	505.73	5.06	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0%
	Total, general	505,726.51	5,057.27	100	986042.0	7200829.2	100	100%

Para comprender la distribución espacial de la recarga potencial de acuíferos, se analizó la percolación promedio anual a nivel de Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) para el periodo 2000-2020 (Ver Figura 40). El mapa revela un patrón geográfico claramente definido, donde la percolación no es homogénea en el territorio.

Figura 40

Tasas de percolación modeladas a escala de Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU)



Nota: Elaboración propia

Contrario a lo esperado, las tasas más altas de percolación, con valores que superan los 400 y 500 mm/año, se concentran de manera notable en las zonas bajas del valle de Jaén, específicamente en las áreas llanas y de menor pendiente. Esta alta percolación coincide directamente con la ubicación de los cultivos de arroz y zonas de agricultura de riego intensivo. Este fenómeno se explica por la práctica de inundación constante de las parcelas arroceras, que genera una lámina de agua permanente y facilita una infiltración profunda y sostenida en el tiempo.

Por otro lado, los valores de percolación más bajos a moderados (entre 100 y 300 mm/año) se distribuyen ampliamente en las laderas y zonas de montaña, abarcando áreas

con cobertura de Bosque, Pastizales/herbazales y Vegetación Secundaria. Las zonas con los valores más bajos (0-100 mm/año) corresponden a las Áreas Artificiales y a ciertas zonas de pastizales compactados, donde la impermeabilización del suelo limita significativamente la capacidad de infiltración.

Este mapa revela que, en la provincia de Jaén, las prácticas agrícolas intensivas de las zonas bajas, como el cultivo de arroz, son un factor dominante en la dinámica de la percolación, generando "puntos calientes" de recarga inducida que superan a los de los ecosistemas naturales en las cabeceras de cuenca.

6.3. Proyecciones bajo escenarios de Cambio Climático (2040)

6.3.1. Anomalías climáticas proyectadas (2021-2040)

Para evaluar el impacto del cambio climático en los procesos hidrológicos, se analizaron las anomalías proyectadas para el horizonte temporal 2021-2040 bajo dos escenarios de emisiones socioeconómicas: el SSP2-4.5, que representa una ruta de emisiones intermedias y estabilizadas, y el SSP5-8.5, que representa un escenario pesimista con altas emisiones. La Tabla 16 resume las variaciones esperadas en precipitación y temperaturas máxima y mínima con respecto al periodo base.

Tabla 16

Anomalías climáticas, para los escenarios SPP2-4.5 y SPP5-8.5

Precipitación (mm)		**Temperatura Máxima (°C)**		**Temperatura Mínima (°C)**	
SSP2-4.5	**SSP5-8.5**	**SSP2-4.5**	**SSP5-8.5**	**SSP2-4.5**	**SSP5-8.5**
-1.45	0.64	0.85	0.92	0.89	1.02

Nota: Elaboración propia

Las proyecciones de precipitación muestran tendencias divergentes y de magnitud relativamente modesta:

- Bajo el escenario SSP2-4.5, se proyecta una ligera disminución en la precipitación media, con una anomalía negativa de -1.45 mm.
- En contraste, el escenario SSP5-8.5 proyecta un leve aumento, con una anomalía positiva de +0.64 mm.

Estos resultados sugieren que, aunque no se esperan cambios drásticos en el volumen total de lluvia, la dirección del cambio (hacia condiciones ligeramente más secas o húmedas) dependerá de la trayectoria de las emisiones globales.

El calentamiento es una tendencia clara y consistente en ambos escenarios, afectando tanto a las temperaturas máximas como a las mínimas:

- Temperatura Máxima: Se proyecta un incremento de +0.85 °C en el escenario SSP2-4.5 y de +0.92 °C en el SSP5-8.5.
- Temperatura Mínima: El aumento es aún más pronunciado para las temperaturas mínimas, con un incremento de +0.89 °C en el escenario SSP2-4.5 y de +1.02 °C en el SSP5-8.5.

6.3.2. Impacto en los componentes del balance hidrológico

La respuesta hidrológica de la provincia a los futuros escenarios climáticos no puede entenderse sin considerar las transformaciones que ya ha experimentado su paisaje. El análisis integrado de las tendencias históricas de cambio de cobertura (Tabla 7), las anomalías climáticas proyectadas (Tabla 16) y los resultados del modelo hidrológico (Tablas 17 y 18) revela una cuenca bajo una presión creciente y multifactorial.

Entre 2000 y 2020, el paisaje de la provincia experimentó cambios significativos. Se observa una notable reducción de las coberturas naturales, con una pérdida de más de 6,200 ha de Bosque mixto y 4,390 ha de Vegetación Secundaria. Simultáneamente, se produjo una expansión considerable de Pastizales/Herbazales (+17,000 ha), Suelo desnudo (+4,200 ha) y Áreas Artificiales (+2,200 ha). Y siguiendo con esta lógica de cambio el panorama es muy similar para el escenario proyectado al 2040. Esta transición hacia coberturas con menor capacidad de retención de agua y mayor exposición del suelo establece una condición de vulnerabilidad previa a los impactos del cambio climático.

Sobre este paisaje ya alterado, se proyecta un futuro climáticamente más adverso. El motor del cambio es el aumento de la temperatura (hasta +1.02 °C), que impulsa un incremento de la Evapotranspiración Potencial (PET) de hasta el 3.2%. Esta mayor "sed"

atmosférica, combinada con las modestas variaciones en la precipitación, incrementando el estrés hídrico.

La respuesta del sistema es una aridización generalizada:

- La Evapotranspiración Real (ET) aumenta hasta en un 1.5% para satisfacer la demanda atmosférica.
- Esta pérdida de agua se extrae del suelo, provocando una drástica disminución de la Humedad del Suelo (SWmm) de hasta un 6.4%.
- Como consecuencia, los flujos que dependen del agua almacenada disminuyen, con una reducción de la Percolación (PERCmm) de hasta un 2.8% y del Flujo Subterráneo (GW_Q) de hasta un 2.9%.

Tabla 17

Comparativo de escenarios actual, SPP2-4.5 y SPP5-8.5

Abreviación	Actual	SPP2-4.5	SPP5-8.5
PRECIPmm	870.28	870.07	882.85
PETmm	1463.19	1507.41	1511.08
ETmm	609.20	613.34	618.49
SWmm	348.83	327.94	335.12
PERCmm	69.87	67.95	69.91
SURQmm	48.73	46.49	49.65
GW_Qmm	51.49	50.02	51.40
WYLDmm	245.76	241.73	248.87
SYLDt_ha	14.95	13.79	14.53

Nota: Elaboración propia

La integración de los datos muestra un doble impacto. Por un lado, la degradación histórica de las coberturas naturales ha reducido la capacidad de las cuencas para regular el comportamiento hidrológico. Por otro, el futuro climático proyectado impondrá una mayor demanda hídrica sobre este sistema ya debilitado. El resultado es una trayectoria clara hacia una menor disponibilidad de agua almacenada (humedad del suelo y recarga

subterránea), lo que aumenta la vulnerabilidad de los ecosistemas y las actividades productivas de la provincia.

Tabla 18

Variación (%) de los escenarios SPP2-4.5 y SPP5-8.5 versus el escenario actual

Abreviación	SPP2-4.5	SPP5-8.5
PRECIPmm	0.0%	1.4%
PETmm	2.9%	3.2%
ETmm	0.7%	1.5%
SWmm	-6.4%	-4.1%
PERCmm	-2.8%	0.1%
SURQmm	-4.8%	1.8%
GW_Qmm	-2.9%	-0.2%
WYLDmm	-1.7%	1.3%
SYLDt_ha	-8.5%	-2.9%

Nota: Elaboración propia

6.3.3. Impacto en la recarga hídrica (GW_Q)

El Aporte de Agua Subterránea al Caudal (GW_Q), o flujo base, es el componente que garantiza la disponibilidad de agua en los ríos durante las épocas secas, reflejando la salud de las reservas subterráneas. El análisis integrado revela que esta función vital se encuentra amenazada tanto por las transformaciones históricas y proyectadas del paisaje como por las presiones climáticas futuras.

El punto de partida es una cuenca cuya capacidad para regular el agua ya ha sido comprometida. La pérdida de más de 10,600 hectáreas de Bosque y Vegetación Secundaria entre 2000 y 2020, y su reemplazo por coberturas como Pastizales y Suelo desnudo (+21,200 ha combinadas), ha mermado la capacidad natural del paisaje para promover la infiltración y recarga de acuíferos. Las coberturas forestales actúan como esponjas, mientras que los pastizales compactados y el suelo desnudo favorecen la escorrentía superficial en detrimento de la recarga profunda.

El análisis integrado de las tendencias históricas de cambio de cobertura (Tabla 7), las anomalías climáticas proyectadas (Tabla 16) y los resultados del modelo hidrológico (Tablas 17 y 18) revela una disminución del flujo base en ambos escenarios climáticos, aunque con diferente magnitud:

Sobre este sistema ya vulnerable, los escenarios climáticos para 2040 proyectan una disminución del flujo base. La reducción es más notable en el escenario intermedio SSP2-4.5, con una caída del 2.9%, mientras que en el escenario pesimista SSP5-8.5 la disminución es del 0.2%.

La causa directa de esta tendencia es la reducción de los insumos que alimentan el agua subterránea. El modelo proyecta una disminución de la percolación (PERCmm) de hasta un 2.8% y de la humedad del suelo (SWmm) de hasta un 6.4%. Este déficit hídrico es una consecuencia directa del aumento de la temperatura y la evapotranspiración, que extraen más agua del sistema. Con menos agua infiltrándose y almacenándose, la contribución de los acuíferos a los ríos (GW_Q) inevitablemente se reduce.

La disminución del flujo base es el resultado de un doble impacto: un paisaje degradado con menor capacidad de infiltración y un clima futuro más cálido y demandante. Esta sinergia negativa amenaza directamente la resiliencia hídrica de la provincia, apuntando a un futuro con menor disponibilidad de agua durante los periodos de estiaje y una mayor dependencia de los eventos de lluvia irregulares, comprometiendo la sostenibilidad de los ecosistemas y las actividades productivas.

6.3.4. Dinámica de la percolación (PERCmm)

La percolación (PERCmm) es el proceso que define la recarga de las reservas de agua subterránea a largo plazo, siendo un pilar para la sostenibilidad hídrica de la cuenca. El análisis integrado de las tendencias históricas de cambio de cobertura (Tabla 7), las anomalías climáticas proyectadas (Tabla 16) y los resultados del modelo hidrológico (Tablas 17 y 18) revela una función comprometida, debilitada tanto por la degradación histórica del paisaje como por el estrés hídrico inducido por el clima futuro.

La capacidad inherente del territorio para facilitar la percolación ha sido modificada por los cambios de uso de suelo ocurridos entre 2000 y 2020. La sustitución

de más de 10,600 hectáreas de coberturas forestales y vegetación secundaria, que promueven la infiltración lenta, por Pastizales (+17,000 ha) y Suelo desnudo (+4,212 ha), que tienden a compactarse y generar escorrentía, ha creado un paisaje menos eficiente para la recarga de acuíferos.

Sobre este escenario, las proyecciones climáticas para 2040 imponen una presión adicional que limita aún más la percolación:

- Bajo el escenario intermedio SSP2-4.5, se proyecta una disminución neta de la percolación del 2.8%.
- Bajo el escenario de altas emisiones SSP5-8.5, la percolación se mantiene prácticamente estable, con una variación insignificante de +0.1%.

La principal causa de esta tendencia es el déficit hídrico en el perfil del suelo. El aumento de la temperatura y la evapotranspiración provocan una caída drástica de la humedad del suelo (SWmm) de hasta un 6.4% en el escenario SSP2-4.5. Con un suelo significativamente más seco, una mayor proporción del agua de lluvia se retiene en las capas superficiales para satisfacer este déficit de humedad, dejando un menor excedente de agua disponible para infiltrarse hacia las capas profundas y recargar los acuíferos.

Incluso en el escenario SSP5-8.5, donde un ligero aumento de la precipitación podría sugerir más agua disponible, el incremento de la evapotranspiración es tal que la percolación apenas logra mantenerse en equilibrio.

La dinámica de la percolación es una de las señales de alerta más claras sobre la futura vulnerabilidad hídrica de la provincia. La combinación de un paisaje con una capacidad de infiltración ya reducida y un clima futuro que secará los suelos apunta directamente a una menor recarga de las reservas de agua subterránea. Esto compromete la sostenibilidad del recurso a largo plazo, reduciendo la capacidad de la cuenca para regular los caudales y resistir periodos de sequía.

6.3.5. *Impacto en la producción de sedimentos (SYLD)*

La Producción de Sedimentos (SYLD) es el resultado directo de la interacción entre la energía erosiva del agua y la vulnerabilidad del paisaje. El análisis integrado de las tendencias históricas de cambio de cobertura (Tabla 7), las anomalías climáticas

proyectadas (Tabla 16) y los resultados del modelo hidrológico (Tablas 17 y 18) revela una dinámica compleja, donde un paisaje cada vez más degradado se enfrenta a un régimen hidrológico alterado.

El punto de partida es un territorio cuya susceptibilidad a la erosión se ha incrementado notablemente entre 2000 y 2020. La expansión del Suelo desnudo (+4,212 ha) y la pérdida de más de 6,200 ha de Bosque mixto han dejado una mayor superficie desprotegida y vulnerable. Esta degradación histórica del paisaje crea una condición de alto riesgo inherente, donde cualquier evento de lluvia intenso tiene el potencial de generar una alta producción de sedimentos.

A pesar de la creciente vulnerabilidad del paisaje, el modelo proyecta una disminución en la producción de sedimentos promedio para el año 2040 en ambos escenarios climáticos:

- Bajo el escenario SSP2-4.5, la erosión disminuye de forma significativa en un 8.5%.
- Bajo el escenario SSP5-8.5, la reducción es más modesta, del 2.9%.

Esta aparente contradicción, un suelo más vulnerable pero menos erosionado, se explica porque el principal motor de la erosión, la escorrentía superficial (SURQ), se reduce o se mantiene controlado en los escenarios futuros.

La drástica disminución de la erosión (-8.5%) en el escenario SSP2-4.5 está directamente ligada a la reducción de la escorrentía superficial en un 4.8%. En este futuro, la combinación de un suelo más seco (humedad -6.4%) y una mayor evapotranspiración hace que el sistema hidrológico sea menos "explosivo". Se genera menos flujo superficial, lo que reduce la capacidad del agua para desprender y transportar el suelo, a pesar de que el suelo en sí mismo está más expuesto que en el pasado.

En el escenario SSP5-8.5, la dinámica es un equilibrio más fino. El ligero aumento de la precipitación (+1.4%) provoca un pequeño incremento en la escorrentía (+1.8%). Sin embargo, este aumento no es suficiente para desencadenar un proceso erosivo mayor, resultando todavía en una ligera disminución neta de la producción de sedimentos (-2.9%).

Los resultados exponen una paradoja crítica para la gestión de cuencas. Si bien la degradación del paisaje por el cambio de uso de suelo ha aumentado el riesgo potencial de erosión, el cambio climático proyectado (especialmente el escenario intermedio) paradójicamente mitiga este riesgo al reducir el principal agente erosivo: la escorrentía superficial. Esto no significa que la cuenca sea más saludable, sino que la amenaza se desplaza de la erosión hídrica hacia la aridez y el estrés hídrico.

6.3.6. Dinámica de la escorrentía superficial (SURQ)

La Escorrentía Superficial (SURQ) es el componente más reactivo del balance hídrico, reflejando la interacción inmediata entre la precipitación y las condiciones de la superficie terrestre. El análisis de su comportamiento futuro debe considerar tanto las proyecciones climáticas como el estado actual y la trayectoria de cambio de la cobertura del suelo en la provincia.

El paisaje de la provincia ha evolucionado hacia una condición que intrínsecamente favorece una mayor escorrentía. La pérdida de más de 10,600 ha de coberturas forestales y de vegetación secundaria entre 2000 y 2020 ha disminuido la capacidad del terreno para interceptar la lluvia e infiltrar el agua. El reemplazo de estas coberturas por Pastizales (+17,000 ha), que pueden compactarse, y Suelo desnudo (+4,212 ha), que es propenso al sellado superficial, crea las condiciones ideales para que una mayor proporción de la lluvia se convierta en escorrentía.

El análisis integrado de las tendencias históricas de cambio de cobertura (Tabla 7), las anomalías climáticas proyectadas (Tabla 16) y los resultados del modelo hidrológico (Tablas 17 y 18), revela que sobre este paisaje alterado, las proyecciones para 2040 muestran tendencias opuestas para la escorrentía, dependiendo del escenario climático:

- Bajo el escenario intermedio SSP2-4.5, se proyecta una disminución de la escorrentía superficial del 4.8%.
- Bajo el escenario de altas emisiones SSP5-8.5, se proyecta un aumento del 1.8%

Estas tendencias opuestas se explican directamente por el balance entre la precipitación entrante y la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo.

La reducción de la escorrentía en el escenario SSP2-4.5 se explica porque el principal factor limitante es la aridez. Con una disminución de la humedad del suelo del 6.4% y una precipitación estable (0.0%), el suelo actúa como una "esponja seca" con una alta capacidad de absorción inicial. Una mayor parte de la lluvia se destina a recargar la humedad del suelo antes de que se pueda generar flujo superficial.

Por el contrario, el aumento de la escorrentía en el escenario SSP5-8.5 sugiere que el incremento de la precipitación (+1.4%) es suficiente para superar la capacidad de infiltración del suelo, a pesar de que este también está más seco que en la línea base (-4.1% de humedad). Esto podría indicar un cambio hacia eventos de lluvia más intensos. En un paisaje con una capacidad de regulación ya disminuida por la pérdida de bosques, este aumento de la escorrentía incrementa el riesgo de crecidas rápidas y procesos erosivos.

La dinámica de la escorrentía superficial refleja la creciente vulnerabilidad de la cuenca. El escenario intermedio apunta a una menor generación de flujo debido a la aridez, mientras que el escenario pesimista, al combinar un paisaje degradado con un ligero aumento de las lluvias, crea un escenario de mayor riesgo de inundaciones repentinas y erosión acelerada.

6.4. Discusiones

En este capítulo se interpretan los hallazgos de la investigación, se contrastan con la literatura científica pertinente y se analizan las implicaciones de los resultados para la provincia de Jaén. La discusión se estructura en torno a los tres ejes centrales del estudio: la dinámica de transformación del paisaje, su impacto hidrológico consecuente y la presión adicional impuesta por el cambio climático.

6.4.1. La expansión de pastizales como principal motor de cambio territorial

Los resultados confirman que la provincia de Jaén ha experimentado una profunda reconfiguración de su paisaje entre 2000 y 2020, una tendencia que se proyecta se intensificará hacia 2040. El hallazgo principal no es la deforestación en sí, sino el proceso subyacente: la sustitución de coberturas naturales y agrícolas por pastizales/herbazales. Este patrón es consistente con estudios en otras regiones de la selva alta peruana y los

Andes tropicales, donde la ganadería extensiva es reconocida como uno de los principales impulsores de la deforestación (Maquera Callo, 2020; Zumaeta Lozano, 2019).

Un aspecto notable de los resultados es la disminución de la superficie de Agricultura en el periodo histórico. Esto podría parecer contraintuitivo en una región cafetalera como Jaén. Sin embargo, la matriz de transición sugiere una dinámica compleja donde las tierras agrícolas podrían estar degradándose o siendo abandonadas para luego ser convertidas en pastizales, un uso del suelo a menudo menos exigente en términos de manejo. Esta dinámica refleja un posible ciclo de "agricultura itinerante-degradación-pastoreo" que acelera la pérdida de ecosistemas resilientes. La proyección a 2040, que muestra una continuación de esta expansión de pastizales a costa de bosque y vegetación secundaria, pinta un futuro preocupante para la integridad de los ecosistemas locales y los servicios que proveen.

6.4.2. La conexión causa-efecto: Cómo la transformación del paisaje degrada los servicios hídricos

Esta investigación logró establecer una conexión cuantitativa directa entre el cambio de cobertura y la alteración de la respuesta hidrológica, validando la hipótesis central. La modelación con SWAT demostró que el Bosque actúa como una cobertura protectora fundamental, presentando la menor producción de sedimentos (SYLD) y la mayor recarga hídrica (GW_Q). Este comportamiento es consistente con principios hidrológicos bien establecidos: el dosel del bosque intercepta la lluvia, sus raíces aumentan la macroporosidad del suelo favoreciendo la infiltración, y la materia orgánica estabiliza los agregados del suelo, protegiéndolo de la erosión (Achkar et al. 2014).

Por el contrario, los Pastizales/herbazales, la cobertura en expansión, mostraron un comportamiento hidrológico degradado, con tasas de erosión significativamente mayores y una menor contribución a la recarga. Esto se debe a la compactación del suelo por el pisoteo del ganado y a una menor profundidad radicular, lo que reduce la capacidad de infiltración y aumenta la escorrentía superficial. Por lo tanto, cada hectárea de bosque convertida a pastizal no es solo una pérdida de biodiversidad, sino una pérdida directa de la capacidad del territorio para regular el agua, lo que se traduce en un doble impacto negativo: (1) mayor riesgo de azolvamiento de ríos aguas abajo y (2) menor disponibilidad de agua en los acuíferos para sostener los caudales en la estación seca.

6.4.3. El rol paradójico de la agricultura intensiva: Los arrozales como "Puntos Calientes" de recarga inducida

Uno de los hallazgos más contraintuitivos de esta investigación fue la identificación de las zonas bajas de cultivo de arroz como los puntos con mayor tasa de percolación en toda la provincia, superando incluso a los ecosistemas de bosque y páramo. Este resultado contradice la premisa general de que la agricultura invariablemente reduce la recarga hídrica. La explicación radica en la gestión del riego: la inundación constante de las parcelas arroceras genera una lámina de agua que ejerce una presión hidráulica sostenida, forzando una infiltración profunda y continua que hemos denominado "recarga inducida".

Si bien este fenómeno representa una entrada de agua significativa a los acuíferos, debe ser discutido con una perspectiva crítica que considere sus implicaciones y potenciales riesgos:

1) Calidad vs. Cantidad: A diferencia de la percolación en bosques, que filtra agua de alta calidad, la recarga en los arrozales ocurre con agua que ha estado en contacto con agroquímicos. Esto introduce un riesgo significativo de contaminación de las aguas subterráneas por lixiviación de fertilizantes (nitratos, fosfatos) y pesticidas, lo cual no fue evaluado en este estudio, pero representa una amenaza latente para la calidad del agua a largo plazo.

2) Sostenibilidad del Balance Hídrico: Esta alta percolación puede ser, en parte, un indicador de una baja eficiencia en el uso del agua de riego. El agua que se infiltra profundamente ya no está disponible para el cultivo y debe ser compensada con mayores volúmenes de captación de los ríos. Por tanto, es crucial cuestionar si este proceso representa un beneficio neto para el sistema hídrico de la cuenca o si simplemente traslada agua de la superficie al subsuelo a costa de una mayor demanda sobre las fuentes superficiales.

3) Resiliencia del Sistema: La recarga proveniente de ecosistemas naturales es un proceso resiliente y autorregulado. En cambio, la recarga inducida en los arrozales es completamente dependiente de la actividad humana y la disponibilidad de agua para el riego. En un escenario futuro con mayor estrés hídrico por el cambio

climático, la posible reducción de los caudales disponibles para el riego podría eliminar abruptamente esta importante vía de recarga, evidenciando su vulnerabilidad.

6.4.4. Cambio Climático: Un multiplicador del riesgo hídrico

El análisis de los escenarios climáticos añade una capa crítica de complejidad y urgencia. Los resultados demuestran que el cambio climático no actuará en el vacío, sino que amplificará las vulnerabilidades ya creadas por el cambio de uso de suelo. El aumento proyectado de la evapotranspiración en ambos escenarios es una certeza que apunta a un mayor estrés hídrico general para la vegetación y los cultivos.

La divergencia en la respuesta hidrológica entre los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 es particularmente reveladora. El escenario intermedio (SSP2-4.5) sugiere un futuro más árido, donde la menor recarga hídrica (-5.60%) podría comprometer la seguridad hídrica para el consumo y la agricultura. Por otro lado, el escenario de altas emisiones (SSP5-8.5) sugiere un futuro de extremos, donde periodos de sequía podrían alternarse con eventos de lluvia más intensos que, al caer sobre un paisaje ya degradado, generarían picos de escorrentía y erosión (+4.35%). Se crea así un círculo vicioso: la deforestación reduce la resiliencia del paisaje, y el cambio climático somete a este paisaje debilitado a choques más intensos.

6.4.5. Limitaciones de la investigación y futuras direcciones

Si bien la metodología empleada es robusta, es importante reconocer las limitaciones del estudio. La modelación hidrológica se basa en parámetros y datos de entrada que conllevan incertidumbres inherentes; la calibración del modelo SWAT con datos observados de caudal de estaciones locales podría refinar aún más la precisión de las simulaciones. Asimismo, las proyecciones de cambio de cobertura se basan en tendencias históricas y no pueden prever cambios abruptos en las políticas socioeconómicas o en los precios de los productos agrícolas que podrían alterar las decisiones de los actores locales.

Estas limitaciones abren nuevas vías de investigación. Sería de gran valor incorporar un análisis socioeconómico para entender los factores de decisión que llevan a los agricultores a preferir ciertos usos del suelo. Además, estudios a escala de

microcuenca con monitoreo de campo permitirían validar los hallazgos de este estudio y diseñar intervenciones de manejo del paisaje más específicas.

VII. CONCLUSIONES

1. Se delimitó y caracterizó con éxito el área de estudio, estableciendo un total de 168 unidades hidrográficas que drenan el territorio de la provincia de Jaén. Esta delimitación, realizada mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica, constituyó la unidad de análisis fundamental sobre la cual se evaluaron tanto las dinámicas de cambio de cobertura como sus consecuentes impactos hidrológicos, permitiendo un análisis espacialmente explícito y territorialmente pertinente.

2. La dinámica territorial de la provincia de Jaén durante el periodo 2000-2020 estuvo gobernada por un proceso dominante de expansión de los pastizales y herbazales, que ganaron 37,001.8 ha y pasaron de ocupar el 44.1% al 51.4% del territorio, consolidándose como la cobertura predominante. Esta expansión ocurrió a expensas de las coberturas naturales y agrícolas: el bosque mixto registró una pérdida neta de 6,214 ha, la vegetación secundaria en regeneración disminuyó en 4,390.2 ha y la agricultura se contrajo en 32,513.1 ha, configurando un ciclo de degradación, abandono de tierras agrícolas desgastadas y su conversión a pastizales de baja productividad. Las proyecciones al año 2040 anticipan la intensificación de esta tendencia, con una pérdida adicional de 8,338.5 ha de bosque mixto, lo que confirma que la conversión de ecosistemas naturales hacia usos agropecuarios constituye el principal motor de transformación del paisaje provincial.

3. La transformación del paisaje tiene un impacto hidrológico complejo y diferenciado según la zona. En las laderas y zonas de montaña, la sustitución de bosques por pastizales provoca un aumento de la erosión hídrica y una disminución de la recarga natural, degradando los servicios ecosistémicos. Sin embargo, en las zonas bajas del valle, se concluye que las prácticas de riego intensivo, como el cultivo de arroz, generan zonas de alta percolación inducida, alterando el balance hídrico local de una manera que requiere un análisis cuidadoso sobre la calidad y sostenibilidad de esta recarga artificial.

4. La interacción entre la dinámica territorial y el uso del suelo en la provincia de Jaén altera de manera compleja y significativa la seguridad hídrica del territorio. Esta investigación demostró que, si bien la sustitución de bosques por pastizales en las laderas degrada los servicios de regulación hídrica, la agricultura de riego intensivo en los valles crea un sistema hidrológico artificial que, aunque genera una alta recarga, introduce serios interrogantes sobre la calidad del agua y su sostenibilidad a largo plazo. Sumado a las presiones del cambio climático, este panorama heterogéneo subraya la urgencia de implementar políticas de ordenamiento territorial que gestionen de manera diferenciada tanto la conservación de los ecosistemas naturales en las cabeceras como el manejo sostenible del agua en las zonas agrícolas intensivas.

VIII. RECOMENDACIONES

Basado en los hallazgos de esta investigación, que evidencian una progresiva degradación de los servicios ecosistémicos hídricos en la provincia de Jaén debido al cambio de uso de suelo y a las presiones del cambio climático, se emiten las siguientes recomendaciones dirigidas a los actores clave para la gestión sostenible del territorio:

8.1. Para los gobiernos locales y regionales

1. Utilizar los resultados como insumo para el Ordenamiento Territorial: Se recomienda incorporar los mapas de cobertura, dinámicas de cambio y vulnerabilidad hídrica generados en esta tesis como un insumo técnico fundamental para la actualización de los planes de Zonificación Ecológica y Económica (ZEE) y el Plan de Desarrollo Urbano y Territorial. La identificación de las unidades hidrográficas más afectadas debe guiar la priorización de áreas de conservación.

2. Diseñar e Implementar Mecanismos de Retribución por Servicios Ecosistémicos (MERESE): Fomentar la creación de programas que ofrezcan incentivos económicos directos a los agricultores y comunidades que conserven y restauren los bosques en las cabeceras de cuenca. Estos programas pueden ser financiados a través de las tarifas de agua, demostrando que la inversión en "infraestructura verde" es crucial para la seguridad hídrica.

3. Promover Sistemas Productivos Sostenibles: En lugar de políticas que favorezcan la ganadería extensiva, se debe impulsar activamente la adopción de sistemas silvopastoriles (combinación de pastos con árboles) y agroforestales (como el café de sombra). Estos sistemas productivos han demostrado reducir la erosión, mejorar la infiltración de agua y diversificar los ingresos de los productores, abordando la causa raíz del problema.

4. Gestión Integrada del Agua en Zonas de Riego Intensivo: Dado que los cultivos de arroz en el valle de Jaén actúan como zonas de alta percolación inducida, es crucial que la Autoridad Local del Agua (ALA) y la junta de usuarios implementen un plan de gestión integrada para estas áreas. Este plan debe enfocarse en dos aspectos críticos:

a) Calidad del Agua: Iniciar un programa de monitoreo de la calidad del agua subterránea en las zonas arroceras para evaluar la posible lixiviación de agroquímicos (fertilizantes y pesticidas) hacia los acuíferos.

b) Eficiencia del Riego: Evaluar la eficiencia del uso del agua en estos sistemas. Si bien la percolación es alta, puede representar una pérdida de agua productiva para el cultivo. Promover técnicas que optimicen el riego sin eliminar completamente la función de recarga.

8.2. Para el sector productivo

1. Capacitación en Buenas Prácticas de Manejo de Suelo y Agua: Implementar programas de extensión agraria enfocados en técnicas de conservación de suelos, como la siembra en curvas de nivel, la construcción de zanjas de infiltración y el uso de coberturas vegetales para reducir la erosión, especialmente en las zonas agrícolas y de pastoreo con pendientes pronunciadas.

2. Diversificación Productiva: Fomentar la transición de monocultivos de pasto hacia sistemas más diversificados y resilientes. La reincorporación del componente arbóreo en las parcelas no solo provee beneficios hidrológicos, sino que también puede generar ingresos adicionales a través de la madera, frutos o leña, reduciendo la vulnerabilidad económica de los productores.

3. Fomento de Prácticas Agrícolas que Optimicen la Relación Riego-Recarga: Se recomienda trabajar con las asociaciones de productores de arroz para promover prácticas de manejo de agua y nutrientes más eficientes. Esto incluye la capacitación en el uso racional de fertilizantes para minimizar la contaminación de las aguas que se infiltran y la exploración de calendarios de riego que mantengan la productividad del cultivo mientras se gestiona de manera consciente la recarga a los acuíferos.

8.3. Para la academia y futuras investigaciones

1. Establecer un Observatorio de Monitoreo Territorial: Se recomienda utilizar la metodología de esta tesis para establecer un sistema de monitoreo a largo plazo de los cambios de cobertura y uso del suelo en la provincia. Actualizar el análisis cada 5 años permitiría evaluar el impacto de las políticas implementadas y anticipar nuevas tendencias de degradación.

2. Validación de Modelos con Datos de Campo: Promover la instalación de estaciones hidrométricas y meteorológicas en cuencas representativas para la recolección de datos de caudal y sedimentos. Esta información es crucial para calibrar y validar los modelos hidrológicos como SWAT, aumentando la precisión de futuras simulaciones y proyecciones.

3. Profundizar en los Impulsores Socioeconómicos: Realizar estudios complementarios que analicen los factores socioeconómicos, culturales y políticos que impulsan las decisiones de los agricultores sobre el uso de la tierra. Comprender el "porqué" detrás de la expansión de los pastizales es fundamental para diseñar políticas públicas que sean efectivas y socialmente aceptadas.

4. En la presente investigación, la clasificación de pendientes se basó en la normativa nacional (D.S. Nº 017-2009/AG), un estándar adecuado para la clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor en el contexto peruano. Sin embargo, para futuras investigaciones enfocadas específicamente en la modelación de procesos hidrológicos, se recomienda explorar el uso de sistemas de clasificación de pendientes con mayor reconocimiento internacional y desarrollados con un enfoque

en la respuesta hidrológica, como los propuestos por la (FAO) o el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Estas clasificaciones presentan rangos de pendiente que se alinean de manera más directa con los umbrales físicos que gobiernan los procesos de escorrentía, infiltración y erosión. La adopción de estos estándares en futuros estudios hidrológicos en la provincia no solo podría mejorar la precisión y la representación física de los modelos, sino que también facilitaría la comparación de los resultados con investigaciones realizadas en otras latitudes, fortaleciendo así la robustez y la aplicabilidad de los hallazgos.

5. Estudiar la Hidrología de los Agroecosistemas de Riego Intensivo: Este estudio reveló el rol inesperado de los arrozales como "puntos calientes" de percolación. Se recomienda que futuras investigaciones se centren en cuantificar en detalle el balance hídrico de estos sistemas. Esto debe incluir estudios de campo para:

a) Medir la calidad del agua percolada.

b) Determinar si esta recarga inducida contribuye de manera efectiva al flujo base de los ríos o si se queda en acuíferos someros.

c) Evaluar la sostenibilidad de esta recarga artificial en el contexto de la demanda de agua y los impactos del cambio climático.

6. La presente investigación identificó al ecosistema de páramo como una de las coberturas con mayor capacidad de regulación hídrica, presentando altos valores de percolación (PERC) y recarga de acuíferos (GW_Q), solo superado por el bosque. Sin embargo, la función hidrológica de los páramos, y en particular la de sus suelos orgánicos (Andosoles e Histosoles), es excepcionalmente compleja y va más allá de lo que un modelo a escala regional puede capturar en detalle.

Por ello, se recomienda enfáticamente que futuras investigaciones se centren en el estudio específico de la influencia del páramo en la percolación profunda y los flujos subsuperficiales. Esto debería incluir:

a) Caracterización in situ de las propiedades hidráulicas de los suelos de páramo, midiendo parámetros clave como la conductividad hidráulica saturada, la porosidad y las curvas de retención de humedad.

b) Monitoreo de campo del contenido de humedad del suelo a diferentes profundidades para entender los tiempos de residencia y las vías de flujo preferencial del agua.

c) Calibración específica de los parámetros edáficos en el modelo SWAT con datos locales de páramo para representar de manera más fidedigna la capacidad única de "esponja" que tienen estos ecosistemas, la cual es fundamental para sostener los caudales base de los ríos durante las épocas secas.

Un entendimiento más profundo de estos procesos es crucial para formular estrategias de conservación efectivas, especialmente en un contexto de cambio climático donde la capacidad de los páramos para garantizar la provisión de agua será de vital importancia para la seguridad hídrica de la provincia.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Achkar, M., Altesor, A., Brazeiro, A., Buonomo, M., Caballero, N., & Cáceres, D. (2014). *Memoria de los foros técnicos sobre servísios ecosistémicos en Uruguay* (No. 1; Memoria de los Foros Técnicos sobre servicios ecosistémicos en Uruguay / IICA – Montevideo: IICA, 2014, p. 80). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). http://pastizales.fcien.edu.uy/wp-content/uploads/2018/11/Memorias%20de%20los%20Foros%20sobre%20Servicios%20Ecosist%C3%A9micos%20en%20Uruguay.pdf

Acuña, D., Flores Villanueva, W., Llacza Rodríguez, A., & Rorher, M. (2019). Escenarios futuros de cambio climático desde modelos globales para localidades de los Andes centrales. *Repositorio Institucional - SENAMHI*. https://doi.org/10.21704/ac.v80i2.1482

Alcántara Boñón, G. H. (2011). *Pendiente de los suelos del Departamento de Cajamarca*. https://zeeot.regioncajamarca.gob.pe/sites/default/files/Pendiente.pdf

Araque Arellano, M., Vásconez, M., Mancheno, A., Álvarez, C., Prehn, C., Cevallos, C., & Ortiz, L. (2019). *Cuencas Hidrográficas* (1.ª ed.). Editorial Abya-Yala. https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19038

Arriaga Pérez, N. (2021). *Comportamiento de la erosión y sedimentos por escorrentía superficial sobre las obras de cosecha de agua tipo reservorio, en la subcuenca río Coco-Somoto, Corredor Seco de Nicaragua–Centroamérica* [Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE)]. https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/11591

Arteaga Madera, M. A. (2024). *Análisis de la oferta hídrica bajo escenarios de cambio climático en la cuenca del rio San Pedro, Municipio de Puerto Libertador.*

[Universidad de Córdoba]. https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstreams/52c46a76-9450-42e2-80b5-9b22393a87f2/download

Barrenechea Riveros, F., & Álvarez Flores, F. (2019). Análisis Multi-Temporal del uso de suelo. Valle Lo Campino, Quilicura. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, *55*(1), 45-57. https://doi.org/10.23854/07199562.2019551.Alvarez45

Boscherini, F., & Poma, L. (2000). *Territorio, conocimiento y competitividad de las empresas: El rol de las instituciones en el espacio global*. Miño y Dávila.

Cambio Climático Global. (2024). Modelo de Clima Global (MCG). https://cambioclimaticoglobal.com/modelo-de-clima-global-mcg

Carrera Molina, L. M. (2021). *Análisis de los NDVI para determinar situaciones de estrés en el cultivo de maíz en la parroquia Aláquez 2020.* [masterThesis, Universidad Técnica de Cotopaxi]. http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/7614

Casal, J., & Mateu, E. (2003). Tipos de muestreo. *Rev. Epidem. Med. Prev*, *1*(1), 3-7. https://www.academia.edu/download/55524032/TiposMuestreo1.pdf

Climate Model—Surface Temperature Change: SSP2 (Middle of the Road)—2015—2100. (2021, diciembre 17). Science On a Sphere. https://sos.noaa.gov/catalog/datasets/climate-model-surface-temperature-change-ssp2-middle-road-2015-2100/

Codificación y clasificación de cursos de agua superficiales del Perú (p. 76). (2011a). [Informe Final]. Autoridad Nacional del Agua. https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/596/ANA0000382.pdf

Consortium for International Earth Science Information Network (Versión 17.0). (2016). [Software].

Cuchia Usa, J. A., & Flórez Yepes, G. Y. (2022). *Identificación de conflictos socioambientales en el Parque Nacional Natural La Paya mediante el análisis de*

variables geográficas durante el período 2015-2020. 26. https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/6040

Diagnóstico de Problemas y Conflictos en la Gestión de los Recursos Hídricos en la cuenca Chinchipe – Chamaya. (p. 298). (2011b). Autoridad Nacional del Agua. https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/publication/files/estudio_final_2011-chinchipe-chamaya_0.pdf

Duque, A., Barahona Rosales, R., & Cerón Muñoz, M. (2016). Variation in the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in dairy farms in northern Antioquia. *Livestock Research for Rural Development*, *28*(3), 43.

Flores Rodriguez, E. (2020). *Análisis del efecto del cambio de uso de suelo en la escorrentía de cuencas usando el modelo SWAT* [Universidad Nacional Autonoma de Mexico]. https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000804873/3/0804873.pdf

Gabriel Campos, E. N. (2019). *Dinámicas territoriales por los cambios de la cobertura y uso de la tierra en la cuenca baja del río Chilca de la Región Lima*. https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/14637

Galiano Suarez, M. A., & Suarez Salazar, J. D. (2023). *Análisis del cambio de uso de suelo y proyección futura para el cantón Otavalo* [Universidad Tecnica del Norte]. https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13622

Garcia Maldonado, K. V. (2022). *Análisis del cambio de uso y cobertura de suelo en la Región este del Cantón Cuenca* [Universidad Agraria del Ecuador]. https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/GARCIA%20MALDONADO%20KEVIN%20VICENTE.pdf

Geobosques. (2017). Plataforma de monitoreo de cambios sobre la cobertura de los bosques/Descarga.https://geobosques.minam.gob.pe/geobosque/view/urlcambiar

Ghimire, U., Akhtar, T., Shrestha, N. K., Paul, P. K., Schürz, C., Srinivasan, R., & Daggupati, P. (2022). Plataforma W3S. *Water Resources Management*, *36*(14), 5695-5709. https://doi.org/10.1007/s11269-022-03328-5

Gimenez García, R., & García Marín, R. (2023). Expansión urbana y transformación de coberturas y usos de suelo en la Aglomeración Urbana de Murcia. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, *1-28*, 96. https://doi.org/10.21138/bage.3269

Global Administrative Áreas—GADM. (2022). Descargar datos GADM (versión 4.1). https://gadm.org/

Google Earth Engine. (s. f.). Recuperado 8 de septiembre de 2024, de https://earthengine.google.com

*Gobierno Regiona*l *de Cajamarca.* (2014). Estrategia Regional frente al Cambio Climático de Cajamarca. Gerencia Regional de Recursos Naturales y Gestión del Medio Ambiente.

Gutierrez, R. A., Junquas, C., Armijos, E., Sörensson, A. A., & Espinoza, J.-C. (2024). Performance of Regional Climate Model Precipitation Simulations Over the Terrain-Complex Andes-Amazon Transition Region. *Repositorio Institucional - SENAMHI*. https://doi.org/10.1029/2023JD038618

Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, *32*(1), 1-6. https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1

Integrated Development for R (Versión 4.3.1). (2023). [Software]. http://www.rstudio.com/

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2024). Cambio climático 2021. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_Spanish.pdf

Jiang, Z., Huete, A. R., Chen, J., Chen, Y., Li, J., Yan, G., & Zhang, X. (2006). Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, *101*(3), 366-378. https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.003

Liu, H., Zhang, Y., & Zhang, X. (2019). Using the RS Method to Analyse Construction Land Changes in Tongren during 2002 and 2016. *Polish Journal of Environmental Studies*, *28*(3), 1277-1286. https://doi.org/10.15244/pjoes/86221

Loayza Basan, K. J. L., Mercedes ChiritoChirito, G. M. M., Mestas Valero, R., & Quiliche Duran, J. P. J. (2017). Estudio del crecimiento urbano y modificación de cobertura vegetal mediante teledetección del Distrito de Végueta. *Big Bang Faustiniano*, *6*(1). https://doi.org/doi.org/10.51431/bbf.v6i1.46

Mahecha Ramírez, C. J. (2016). Transformaciones territoriales: Una categoría para explicar las dinámicas de conformación territorial. *Bitácora Urbano Territorial*, *26*(2), 113-120. https://doi.org/10.15446/bitacora.v26n2.57671

Mancera Sanabria, J. S. (2019). *Aporte de la geomática en el mapeo de servicios ecosistémicos para la regulación hídrica en la microcuenca del río Murca, Colombia* [Universidad Nacional de Ciencias Aplicadas y Ambientales]. https://repository.udca.edu.co/handle/11158/2724

Maquera Callo, E. A. (2020). *Análisis de los cambios de cobertura y uso del suelo en el Departamento de Tacna, periodo 2007, 2012 y 2017* [Tesis de maestria, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. http://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/UNJBG/3953

Martínez Barbáchano, R., & Solís Miranda, G. A. (2018). *Caracterización espectral y detección de Flecha Seca en palma africana en Puntarenas, Costa Rica*. *61*, 349-377. https://doi.org/10.15359/rgac.61-2.13

Martínez Solano, H. J. (2019). *Dinámica de servicios ecosistémicos y comportamiento hidrológico bajo escenarios de cambio climático en la región hidrográfica del estero de Jaltepeque, El Salvador*. https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/9257

Moreira Braz, A., Mirándola García, P. H., Luiz Pinto, A., Salinas Chávez, E., & Oliveira, I. J. de. (2020). Manejo integrado de cuencas hidrográficas: Posibilidades y avances en los análisis de uso y cobertura de la tierra. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, *29*(1), 69-85. https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.76232.

Neitsch, S., Arnold, J., & Kiniry, J. (2005). *Herramienta de evaluación de suelo y agua documentación teórica*. http://swatmodel.tamu.edu/media/46964/swat2005-theo-doc-spanish.pdf.

Paegelow, M., Camacho, M. T., & Menor, J. (2003). Cadenas de Markov, evalución multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje. *GeoFocus. International Review of Geographical Information Science and Technology*, *3*, 22-44.

QGIS Development Team (Versión 3.28.15 «Firenze»). (2024). [Software]. https://www.qgis.org/

QSWAT | SWAT | Soil & Water Assessment Tool (Versión 2.0.1). (2012). [Software]. https://swat.tamu.edu/software/qswat/

Rosero Mier, M. M. (2018). *Análisis multitemporal del uso del suelo y cobertura vegetal de la cuenca del Río Tahuando y proyección de cambios al año 2031, en el cantón*

Ibarra, provincia de Imbabura [masterThesis, Universidad Tecnica del Norte]. http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/7745

SoilGrids250m 2.0. (s. f.). Recuperado 8 de septiembre de 2024, de https://soilgrids.org

SRTM | Earthdata. (s. f.). Shuttle Radar Topography Mission. Recuperado 8 de septiembre de 2024, de https://www.earthdata.nasa.gov/sensors/srtm

Teodor Alvarado, C. J. B. (2022). *Influencia de la erosión hídrica del suelo para la producción de sedimentos en la cuenca del río Santa en el periodo: 1981–2014* [Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/5257

Vargas, S. B. (2009). Ruralidades emergentes y dinámicas territoriales: Nuevas percepciones y medios de vida. *Revista Eleuthera*, *3*, 194-205. https://revistasojs.ucaldas.edu.co/index.php/eleuthera/article/view/5441

Varillas, K. A. E. (2022). *Modelado de la erosión y el transporte de sedimentos durante eventos El Niño Extremos (EENE) en el norte del Perú–Caso embalse Gallito Ciego* [PhD Thesis, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. https://cybertesis.unmsm.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/54ea594b-6f2a-44a6-8e4e-e9e868a8f1d1/content

Veneros, J., García, L., Morales, E., Gómez, V., Torres, M., López-Morales, F., Veneros, J., García, L., Morales, E., Gómez, V., Torres, M., & López-Morales, F. (2020). Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua. *Idesia (Arica)*, *38*(4), 99-107. https://doi.org/10.4067/S0718-34292020000400099

WorldClim. (2022). International Journal of Climatology. www.worldclim.org

Zumaeta Lozano, D. L. (2019). *Análisis multitemporal y predictivo del cambio de uso del suelo y pérdida de cobertura vegetal en la microcuenca Yuyac, Amazonas, 2018*

[Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza - UNTRM]. https://repositorio.untrm.edu.pe/handle/20.500.14077/1986

X. ANEXOS

Anexo 1

Scrip de Google Earth Engine (GEE) de clasificación supervisada Random Forest

```
// Funciones de normalizacion
var addIndices = function(image) {
  return image
    .addBands(image.normalizedDifference([ "NIR", "RED"])
    .rename('NDVI'))
    .addBands(image.normalizedDifference([ "GREEN", "NIR"])
    .rename('NDWI'))
    .addBands(image.normalizedDifference([ "NIR", "SWIR1"])
    .rename('NBR'));
};

var srtm=ee.Image('USGS/SRTMGL1_003');
var slope = ee.Terrain.slope(srtm).clip(bound).rename("slope");

//Funcion de preprocesamiento de datos para ajustar la escala
var scaleLTDataC02=function(image){
    return  image.multiply(0.0000275).add(-0.2);
};

var landsatMask=function(image){

   var qa = image.select('QA_PIXEL');
   //crea una máscara de nube y sombra para una imagen determinada
   var  mask =qa.bitwiseAnd(parseInt('11010', 2)).eq(0);
   return image.updateMask(mask);

};

var imgTraining = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C02/T1_L2')
                .select(['SR.*','QA_PIXEL'])
                .filterDate("2024-01-01","2024-07-31")
                .filterMetadata("CLOUD_COVER","less_than",100)
                .map(landsatMask)
                .map(scaleLTDataC02)
                .median()
                .select(["SR_B2","SR_B3","SR_B4","SR_B5","SR_B6","SR_B7","QA_PIXEL"])
               .rename(["BLUE","GREEN","RED", "NIR","SWIR1","SWIR2","QA_PIXEL"])
               .clip(bound)
               .addBands(slope);
   imgTraining=addIndices(imgTraining);

var muestras = Bosques.merge(Vegetación_Secundaria)
                      .merge(Agricultura)
                      .merge(Pastizales/Herbazales)
                      .merge(Cuerpos_de_Agua)
                      .merge(Areas_Artificiales)
                      .merge(Suelo_desnudo);
print("muestras",muestras);

var bandas = ["BLUE","GREEN","RED",
              "NIR","SWIR1","SWIR2",
              "slope","NDWI","NBR","NDVI"];

var label = 'cobertura';

// Add land cover as a band of the reflectance image and sample 100 pixels at
// 10 m scale from each land cover class within a region of interest.
var roi = bound;
```

```
var randomMuestras=muestras.randomColumn();
var sampleTraining= randomMuestras.filter('random <= 0.8');
var sampleValidation=randomMuestras.filter('random > 0.8');

var trainingSample = imgTraining.sampleRegions({

  collection:sampleTraining,
  properties :[label],
  scale:30,
  geometries:true

});
print("trainingSample",trainingSample);

// Train a 10-tree random forest classifier from the training sample.
var trainedClassifier = ee.Classifier.smileRandomForest(10).train({
  features: trainingSample,
  classProperty: label,
  inputProperties: bandas
});

// Get information about the trained classifier.
print('Results of trained classifier', trainedClassifier.explain());

// Get a confusion matrix and overall accuracy for the training sample.
var trainAccuracy = trainedClassifier.confusionMatrix();
print('Training error matrix', trainAccuracy);
print('Training overall accuracy', trainAccuracy.accuracy());
print('Training Kappa',  trainAccuracy.kappa());

var nube=100;

var L5coll = ee.ImageCollection('LANDSAT/LT05/C02/T1_L2')
                .filterBounds(bound)
                .filterMetadata("CLOUD_COVER","less_than", nube)
                .map(landsatMask)
                .select(["SR_B1","SR_B2","SR_B3","SR_B4","SR_B5","SR_B7"],
                        ["BLUE","GREEN","RED", "NIR","SWIR1","SWIR2"]);

var L7coll =ee.ImageCollection('LANDSAT/LE07/C02/T1_L2')
                .filterBounds(bound)
                .filterMetadata("CLOUD_COVER","less_than", nube)
                .map(landsatMask)
                .select(["SR_B1","SR_B2","SR_B3","SR_B4","SR_B5","SR_B7"],
                ["BLUE","GREEN","RED", "NIR","SWIR1","SWIR2"]);

var L8coll =ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C02/T1_L2')
                .filterBounds(bound)
                .filterMetadata("CLOUD_COVER","less_than", nube)
                .map(landsatMask)
                .select(["SR_B2","SR_B3","SR_B4","SR_B5","SR_B6","SR_B7"],
                ["BLUE","GREEN","RED", "NIR","SWIR1","SWIR2"]);

var landsatCollection =ee.ImageCollection(L5coll.merge(L8coll)
                                                .merge(L7coll));

var fechaInicio="2018-01-01";
var fechaFinal="2020-12-31";
var imgClasificar=landsatCollection.filterDate(fechaInicio,fechaFinal)
                                   .median();
```

```
imgClasificar=scaleLTDataC02(imgClasificar);
imgClasificar=imgClasificar.addBands(slope);
imgClasificar=addIndices(imgClasificar);

// Classify the reflectance image from the trained classifier.
var imgClassified = ee.Image(imgClasificar).classify(trainedClassifier);

// Add the layers to the map.
var classVis = {
  min: 0,
  max: 6,
                //Gris Roca,Amarillo Dorado,Arena
               //Bosques,Vegetación_Secundaria,Agricultura
  palette: ['8B8B8B' ,'FFD700', 'C2B280',
                //Verde Claro,Verde Amarillento,Verde Oliva
               //Pastizales/Herbazales,Cuerpos_de_Agua,Areas_Artificiales
               '9ACD32', 'ADFF2F',"556B2F",
               //Azul Agua,Verde Pasto,Azul Río,Gris Urbano
               //Suelo_desnudo
               "4682B4"
               ]
};
Map.setCenter(-78.81455937405282, -5.700294308653805);
Map.addLayer(imgTraining, {bands: ['SWIR2', 'NIR', 'BLUE'], min: 0, max: 0.5}, 'image Training',false);
Map.addLayer(trainingSample, {color: 'black'}, 'Training sample', false);
Map.addLayer(imgClasificar.clip(bound), {bands: ['SWIR2', 'NIR', 'BLUE'], min: 0, max: 0.5},
               'image a clasificar '+ fechaInicio+"-"+fechaFinal,false);
Map.addLayer(imgClassified, classVis, 'Imagen clasificada '+ fechaInicio+"-"+fechaFinal);
Map.addLayer(roi, {color: 'white'}, 'ROI', false, 0.5);

var validationSample = imgClasificar.sampleRegions({

  collection:sampleValidation,
  properties :[label],
  scale:30,
  geometries:true

});

 print("validationSample",validationSample);

 // Get a confusion matrix and overall accuracy for the validation sample.
validationSample = validationSample.classify(trainedClassifier);
var validationAccuracy = validationSample.errorMatrix(label, 'classification');
print('Validation error matrix', validationAccuracy);
print('Validation accuracy', validationAccuracy.accuracy());
print('validation Kappa',  validationAccuracy.kappa());

Map.addLayer(validationSample, {color: 'white'}, 'Validation sample', false);

 Export.image.toDrive({
  image: imgClassified.add(1).clip(bound).toInt(),
  folder:'Imagen clasificada',
  scale:30,
  region:bound,
  description:'Imagen_clasificada-'+ fechaInicio+"-"+fechaFinal

});
```

Anexo 2

Descripción de Grupo Hidrológico

Grupo Hidrológico	Descripción
A	Suelos que, incluso cuando están húmedos, tienen un bajo potencial de escurrimiento. Estos suelos contienen menos del 10% de arcilla y más del 90% de arena y/o grava. Por lo tanto, presentan texturas arenosas o de grava, aunque pueden tener texturas más finas si poseen una buena estructura de agregados, baja densidad aparente y más del 35% de fragmentos rocosos.
B	Suelos con una capacidad moderada de infiltración cuando están saturados. Se caracterizan por contener entre 10% y 20% de arcilla y entre 50% a 90% de arena. Las texturas de este grupo incluyen franco-arenosa o arenosa franca, y pueden presentar texturas más finas si tienen una buena estructura de agregados, baja densidad aparente y más del 35% de fragmentos rocosos.
C	Suelos con baja capacidad de infiltración cuando están saturados. Se caracterizan por contener entre 20% y 40% de arcilla y menos de 50% de arena. Por lo tanto, presentan texturas como franca, franco-limosa, franco-arcillo-arenosa, franco-arcillosa y franco-arcillo-limosa; o texturas arcillosas, arcillo-limosa o arcillo-arenosa, si tienen una buena estructura de agregados, baja densidad aparente y más del 35% de fragmentos rocosos.
D	Suelos con un alto potencial de escorrentía cuando están completamente saturados de humedad. El movimiento del agua a través de estos suelos es limitado o muy limitado, debido a que contienen más del 40% de arcilla y menos del 50% de arena. En otras palabras, son suelos generalmente de textura arcillosa, lo que puede provocar fenómenos de expansión y contracción.

Anexo 3

Descripción del tipo de suelo y la influencia en la Modelación Hidrológica

Tipo de Suelo	Descripción e Influencia en Modelación Hidrológica
Andosol	Suelos derivados de materiales volcánicos, caracterizados por su baja densidad aparente, alta porosidad y elevado contenido de materia orgánica. Tienen una muy alta capacidad de infiltración y retención de agua, lo que reduce significativamente la escorrentía superficial y favorece la recarga de acuíferos. En modelación, se asocian con bajos coeficientes de escorrentía y alta capacidad de almacenamiento.
Andosol-Leptosol	Combinación de suelos volcánicos con suelos muy poco profundos sobre roca dura. Presentan una alta capacidad de infiltración en la porción Andosol, pero la escasa profundidad del Leptosol limita el almacenamiento total de agua y puede generar escorrentía subsuperficial o incluso superficial rápidamente una vez saturado el perfil delgado. En modelos, requiere considerar la dualidad de alta infiltración inicial y capacidad de almacenamiento restringida por la roca madre.
Andosol-Regosol	Mezcla de Andosoles con suelos muy jóvenes y poco desarrollados. Similar al Andosol-Leptosol, la porción Andosol confiere buena infiltración. Sin embargo, la presencia de Regosoles (suelos con horizontes incipientes) implica variabilidad en la profundidad efectiva y la estructura, pudiendo tener zonas con menor capacidad de retención que un Andosol puro. La modelación debe reflejar esta heterogeneidad.
Cambisol	Suelos moderadamente desarrollados con diferenciación de horizontes incipiente o moderada. Sus propiedades hidrológicas varían ampliamente dependiendo de la textura y estructura, pudiendo tener desde buena infiltración y retención en texturas medias a moderada escorrentía en texturas más finas o compactadas. En modelación, sus parámetros son intermedios en comparación con suelos muy desarrollados o incipientes.

Cambisol-Leptosol	Combinación de Cambisoles con suelos poco profundos. La influencia hidrológica estará dominada por la escasa profundidad del Leptosol, limitando la capacidad de almacenamiento y favoreciendo la escorrentía rápida, a pesar de que la porción Cambisol pueda tener una infiltración inicial moderada. Los modelos deben capturar el control de la roca madre sobre la hidrología.
Cambisol-Regosol	Mezcla de Cambisoles con Regosoles. Presentan una variabilidad en el desarrollo del perfil y la profundidad efectiva. La porción Cambisol aporta cierta estructura y desarrollo, mientras que el Regosol puede ser más propenso a la erosión y tener menor capacidad de retención. La modelación debe considerar la heterogeneidad espacial resultante de esta combinación.
Casco_Urbano	Representa áreas urbanizadas con una alta proporción de superficies impermeables (tejados, carreteras, aceras). La infiltración es mínima o nula, generando una respuesta hidrológica muy rápida con altos picos de escorrentía superficial. En modelación, se caracterizan por muy bajos o nulos coeficientes de infiltración y alta conectividad de superficies impermeables a la red de drenaje, resultando en tiempos de concentración cortos.
Water	Corresponde a cuerpos de agua superficiales (ríos, lagos, embalses). En modelación hidrológica, funcionan como elementos de almacenamiento y tránsito de flujos. La interacción con el suelo circundante (filtración) y la atmósfera (evaporación) son procesos clave a considerar. No presentan procesos de infiltración de lluvia como los suelos, sino que reciben y liberan agua.
Fluvisol	Suelos jóvenes formados por depósitos aluviales, típicamente encontrados en llanuras de inundación y terrazas fluviales. Presentan estratificación textural y perfiles irregulares de materia orgánica. Su hidrología está fuertemente influenciada por las crecidas fluviales. La infiltración y retención varían según la granulometría de las capas

	depositadas, pudiendo ser muy permeables en arenas gruesas o con limitada infiltración en arcillas finas.
Leptosol	Suelos muy poco profundos sobre roca continua o material muy rocoso. La escasa profundidad limita drásticamente la capacidad de almacenamiento de agua, llevando a una rápida saturación del perfil delgado y una generación significativa de escorrentía superficial, especialmente en pendientes. La infiltración efectiva es muy baja debido a la proximidad de la roca. En modelos, se asocian con alta escorrentía y baja capacidad de almacenamiento.
Leptosol-Regosol	Combinación de suelos muy poco profundos (Leptosol) con suelos jóvenes y poco desarrollados (Regosol). Predominan las características del Leptosol debido a la limitación de profundidad. La presencia de Regosoles puede aportar algo más de material fino, pero la hidrología sigue estando controlada por la escasa profundidad efectiva y la baja capacidad de almacenamiento, resultando en alta escorrentía.
Leptosol-Xerosol	Mezcla de suelos poco profundos (Leptosol) con suelos de regiones áridas o semiáridas con un horizonte superficial de color claro y bajo contenido de materia orgánica (Xerosol). La hidrología combina la limitación de profundidad del Leptosol con las características de aridez del Xerosol, que a menudo presentan baja infiltración inicial debido a costras superficiales o sellamiento. La escorrentía superficial puede ser significativa en eventos de lluvia intensa.
Paramosol	Suelos orgánicos de alta montaña, típicamente encontrados en páramos. Se caracterizan por un alto contenido de materia orgánica, alta porosidad y una gran capacidad de retención de agua, funcionando como importantes reguladores hídricos. Favorecen la infiltración y la liberación lenta de agua, contribuyendo al sostenimiento de caudales base. En modelación, se asocian con alta capacidad de almacenamiento y descarga diferida.

Phaeozem	Suelos con un horizonte superficial oscuro y profundo, rico en materia orgánica y con alta saturación de bases. Presentan buena estructura, alta porosidad y buena capacidad de infiltración y retención de agua. Hidrológicamente, son suelos que promueven la infiltración y reducen la escorrentía superficial en comparación con suelos menos desarrollados o con menor contenido de materia orgánica.
Phaeozem-Cambisol	Combinación de Phaeozems con Cambisoles. La hidrología refleja una mezcla de las propiedades de ambos. La porción Phaeozem aporta buena infiltración y retención en el horizonte superficial, mientras que el Cambisol subyacente o adyacente presenta propiedades moderadas. La respuesta hidrológica dependerá de la proporción y disposición espacial de ambos tipos.
Regosol	Suelos muy jóvenes con un desarrollo mínimo de horizontes. Sus propiedades hidrológicas están fuertemente influenciadas por el material parental. Pueden ser muy permeables en materiales gruesos (arenas, gravas) o tener infiltración limitada en materiales finos no estructurados. Generalmente, su capacidad de retención de agua es baja a moderada y son susceptibles a la erosión.
Regosol-Xerosol	Mezcla de Regosoles con Xerosoles. Combinan la incipiente formación de suelo del Regosol con las características de aridez del Xerosol. Presentan baja capacidad de retención de agua y pueden desarrollar costras superficiales que limitan la infiltración inicial. La escorrentía superficial puede ser significativa, especialmente en áreas con pendientes.
Vertisol	Suelos arcillosos con alto contenido de arcillas expandibles que se hinchan al humedecerse y se contraen al secarse, formando grietas profundas. Su hidrología es muy particular: en seco, las grietas permiten una rápida infiltración inicial; al humedecerse, las grietas se cierran, reduciendo drásticamente la infiltración y promoviendo la escorrentía superficial una vez saturada la capa superficial. Presentan alta capacidad de retención de agua cuando están hinchados.

Anexo 4

Aporte de sedimentos (SYLDt_ha) de las 168 Subcuencas de la Provincia de Jaén

Orden	Subbasin	AREA km2	SYLD t_ha	% Rep.	Orden	Subbasin	AREA km2	SYLD t_ha	% Rep.
1	41	29	112.66	4.48%	85	110	21	3.44	0.14%
2	56	5	111.33	4.43%	86	44	18	3.36	0.13%
3	26	28	105.56	4.20%	87	14	33	3.35	0.13%
4	12	22	99.18	3.95%	88	139	34	3.33	0.13%
5	154	16	77.70	3.09%	89	23	16	3.33	0.13%
6	75	14	76.04	3.03%	90	144	64	3.19	0.13%
7	6	20	75.28	3.00%	91	125	6	3.18	0.13%
8	7	7	72.59	2.89%	92	65	21	3.13	0.12%
9	13	64	68.07	2.71%	93	106	34	3.03	0.12%
10	157	20	64.73	2.58%	94	11	10	3.01	0.12%
11	131	35	64.35	2.56%	95	78	13	2.98	0.12%
12	17	48	62.02	2.47%	96	71	17	2.95	0.12%
13	35	26	60.29	2.40%	97	141	33	2.94	0.12%
14	20	3	53.96	2.15%	98	123	19	2.92	0.12%
15	30	23	53.70	2.14%	99	155	106	2.90	0.12%
16	31	21	52.81	2.10%	100	99	15	2.83	0.11%
17	47	38	52.09	2.07%	101	60	1	2.69	0.11%
18	55	25	50.99	2.03%	103	159	30	2.67	0.11%
19	158	16	48.76	1.94%	104	58	17	2.59	0.10%
20	39	30	48.20	1.92%	105	113	41	2.54	0.10%
21	52	16	46.89	1.87%	106	107	5	2.53	0.10%
22	48	45	46.71	1.86%	107	136	19	2.53	0.10%
23	29	16	46.41	1.85%	108	165	31	2.49	0.10%
24	88	16	45.08	1.79%	109	119	29	2.48	0.10%
25	98	17	43.28	1.72%	110	67	21	2.48	0.10%
26	53	17	41.10	1.64%	111	9	16	2.41	0.10%
27	153	15	41.05	1.63%	112	134	64	2.27	0.09%
28	50	68	39.42	1.57%	113	162	66	2.26	0.09%
29	49	45	36.95	1.47%	114	109	20	2.25	0.09%
30	156	12	35.39	1.41%	115	166	52	2.23	0.09%
31	54	39	34.86	1.39%	116	69	32	2.22	0.09%
32	21	0	32.77	1.30%	117	80	16	2.21	0.09%
33	57	47	32.74	1.30%	118	102	19	2.18	0.09%
34	103	22	31.72	1.26%	119	121	20	2.15	0.09%
35	147	56	30.52	1.22%	120	146	25	2.13	0.08%
36	42	40	17.10	0.68%	121	111	28	2.13	0.08%
37	40	34	13.42	0.53%	122	167	27	2.10	0.08%
38	90	37	12.30	0.49%	123	64	28	2.09	0.08%
39	128	11	12.00	0.48%	124	95	18	2.07	0.08%
40	45	18	11.63	0.46%	125	18	25	2.06	0.08%

41	132	20	11.23	0.45%	126	82	43	2.06	0.08%
42	34	30	11.14	0.44%	127	91	25	2.04	0.08%
43	163	19	10.73	0.43%	128	93	44	2.01	0.08%
44	76	31	10.54	0.42%	129	127	21	1.99	0.08%
45	164	11	10.53	0.42%	130	68	1	1.99	0.08%
46	19	84	10.49	0.42%	131	85	28	1.97	0.08%
47	135	35	9.94	0.40%	132	115	34	1.95	0.08%
48	51	31	9.74	0.39%	133	10	2	1.92	0.08%
49	28	21	9.60	0.38%	134	77	11	1.86	0.07%
50	79	15	9.10	0.36%	135	100	24	1.79	0.07%
51	70	30	8.73	0.35%	136	108	6	1.76	0.07%
52	104	41	8.45	0.34%	137	129	13	1.70	0.07%
53	86	18	8.34	0.33%	138	25	30	1.69	0.07%
54	5	5	7.82	0.31%	139	84	15	1.67	0.07%
55	161	18	7.36	0.29%	140	43	21	1.65	0.07%
56	149	13	7.12	0.28%	141	142	31	1.64	0.07%
57	1	27	6.32	0.25%	142	137	9	1.64	0.07%
58	24	33	6.17	0.25%	143	92	18	1.59	0.06%
59	83	29	5.95	0.24%	144	138	1	1.57	0.06%
60	151	29	5.80	0.23%	145	62	29	1.56	0.06%
61	140	21	5.72	0.23%	146	112	30	1.54	0.06%
62	46	28	5.59	0.22%	147	63	15	1.52	0.06%
63	33	31	5.44	0.22%	148	145	17	1.51	0.06%
64	27	47	5.33	0.21%	149	87	34	1.46	0.06%
65	150	42	5.30	0.21%	150	38	20	1.46	0.06%
66	148	27	5.16	0.21%	151	66	9	1.46	0.06%
67	81	23	5.15	0.20%	152	122	39	1.43	0.06%
68	2	53	4.88	0.19%	153	89	16	1.40	0.06%
69	97	21	4.83	0.19%	154	3	3	1.38	0.06%
70	130	9	4.66	0.19%	155	101	2	1.37	0.05%
71	37	40	4.50	0.18%	156	118	22	1.32	0.05%
72	8	50	4.22	0.17%	157	59	24	1.31	0.05%
73	72	28	3.98	0.16%	158	22	2	1.28	0.05%
74	114	33	3.89	0.15%	159	117	21	1.27	0.05%
75	73	36	3.89	0.15%	160	116	50	1.26	0.05%
76	32	15	3.88	0.15%	161	133	51	1.12	0.04%
77	124	39	3.85	0.15%	162	120	19	1.11	0.04%
78	36	24	3.75	0.15%	163	143	20	1.10	0.04%
79	74	6	3.72	0.15%	164	96	22	0.89	0.04%
80	15	25	3.72	0.15%	165	61	0	0.82	0.03%
81	168	28	3.64	0.14%	166	94	22	0.69	0.03%
82	152	44	3.61	0.14%	167	126	0	0.66	0.03%
83	16	32	3.55	0.14%	168	105	53	0.52	0.02%
84	160	22	3.49	0.14%					

Anexo 5

Aporte de percolación (PERCmm) de las 168 Subcuencas de la Provincia de Jaén

Orden	Subbasin	AREA km2	PERC mm	% Rep.	Orden	Subbasin	AREA km2	PERC mm	% Rep.
1	38	20	594.38	5.1%	85	24	33	28.14	0.2%
2	18	25	510.44	4.3%	86	150	42	28.08	0.2%
3	22	2	501.81	4.3%	87	133	51	27.83	0.2%
4	74	6	476.98	4.1%	88	141	33	27.30	0.2%
5	60	1	475.29	4.0%	89	125	6	27.18	0.2%
6	59	24	447.66	3.8%	90	152	44	27.03	0.2%
7	3	3	376.10	3.2%	91	65	21	26.84	0.2%
8	10	2	350.86	3.0%	92	57	47	24.89	0.2%
9	46	28	295.30	2.5%	93	139	34	21.84	0.2%
10	37	40	293.39	2.5%	95	64	28	21.60	0.2%
11	14	33	265.58	2.3%	96	127	21	21.25	0.2%
12	25	30	260.71	2.2%	97	40	34	20.88	0.2%
13	69	32	216.41	1.8%	98	144	64	20.62	0.2%
14	32	15	212.54	1.8%	99	68	1	20.32	0.2%
15	63	15	209.76	1.8%	100	54	39	19.94	0.2%
16	62	29	197.79	1.7%	101	100	24	19.57	0.2%
17	1	27	197.18	1.7%	102	140	21	18.61	0.2%
18	9	16	184.44	1.6%	103	102	19	18.43	0.2%
19	82	43	144.96	1.2%	104	71	17	17.56	0.1%
20	163	19	120.55	1.0%	105	108	6	17.03	0.1%
21	2	53	116.01	1.0%	106	168	28	16.96	0.1%
22	36	24	106.17	0.9%	107	166	52	16.72	0.1%
23	33	31	102.81	0.9%	108	147	56	16.60	0.1%
24	8	50	94.92	0.8%	109	159	30	16.54	0.1%
25	67	21	92.54	0.8%	110	87	34	16.34	0.1%
26	164	11	85.35	0.7%	111	160	22	15.62	0.1%
27	156	12	78.45	0.7%	112	106	34	15.11	0.1%
28	153	15	78.18	0.7%	113	167	27	14.81	0.1%
29	5	5	76.38	0.7%	114	155	106	14.60	0.1%
30	73	36	74.91	0.6%	115	45	18	14.58	0.1%
31	61	0	73.70	0.6%	116	136	19	14.50	0.1%
32	23	16	73.00	0.6%	117	70	30	14.27	0.1%
33	126	0	72.70	0.6%	118	129	13	14.14	0.1%
34	98	17	70.84	0.6%	119	138	1	13.83	0.1%
35	132	20	70.56	0.6%	120	135	35	13.24	0.1%
36	165	31	69.80	0.6%	121	66	9	12.95	0.1%
37	53	17	68.03	0.6%	122	120	19	12.90	0.1%
38	48	45	66.45	0.6%	123	28	21	12.86	0.1%
39	19	84	64.74	0.6%	124	103	22	12.82	0.1%
40	21	0	62.90	0.5%	125	58	17	12.78	0.1%
41	128	11	61.11	0.5%	126	117	21	12.50	0.1%

42	149	13	58.16	0.5%	127	85	28	12.39	0.1%
43	124	39	54.63	0.5%	128	162	66	11.25	0.1%
44	151	29	52.59	0.4%	129	118	22	10.92	0.1%
45	110	21	51.64	0.4%	130	79	15	10.77	0.1%
46	20	3	49.44	0.4%	131	89	16	10.46	0.1%
47	13	64	49.03	0.4%	132	157	20	10.43	0.1%
48	114	33	48.61	0.4%	133	92	18	10.25	0.1%
49	31	21	48.37	0.4%	134	119	29	10.16	0.1%
50	16	32	48.31	0.4%	135	137	9	10.06	0.1%
51	47	38	46.59	0.4%	136	111	28	9.98	0.1%
52	35	26	46.44	0.4%	137	134	64	9.91	0.1%
53	52	16	46.09	0.4%	138	80	16	9.63	0.1%
54	115	34	45.75	0.4%	139	145	17	9.34	0.1%
55	49	45	45.67	0.4%	140	112	30	9.23	0.1%
56	34	30	45.43	0.4%	141	90	37	9.19	0.1%
57	30	23	44.92	0.4%	142	77	11	9.14	0.1%
58	27	47	43.07	0.4%	143	161	18	8.95	0.1%
59	84	15	42.57	0.4%	144	81	23	8.92	0.1%
60	29	16	42.36	0.4%	145	93	44	8.88	0.1%
61	17	48	41.60	0.4%	146	146	25	8.75	0.1%
62	7	7	41.59	0.4%	147	130	9	8.62	0.1%
63	55	25	41.14	0.4%	148	122	39	8.43	0.1%
64	50	68	41.02	0.3%	149	113	41	8.13	0.1%
65	121	20	40.44	0.3%	150	88	16	8.04	0.1%
66	99	15	39.10	0.3%	151	148	27	7.75	0.1%
67	15	25	38.15	0.3%	152	109	20	6.85	0.1%
68	39	30	38.03	0.3%	153	142	31	6.74	0.1%
69	78	13	37.39	0.3%	154	75	14	6.49	0.1%
70	101	2	36.86	0.3%	155	76	31	6.31	0.1%
71	51	31	36.16	0.3%	156	143	20	5.57	0.0%
72	26	28	36.07	0.3%	157	107	5	5.03	0.0%
73	97	21	36.01	0.3%	158	44	18	4.72	0.0%
74	12	22	35.47	0.3%	159	94	22	4.69	0.0%
75	6	20	34.72	0.3%	160	96	22	4.06	0.0%
76	104	41	33.95	0.3%	161	56	5	4.02	0.0%
77	91	25	33.86	0.3%	162	158	16	3.76	0.0%
78	95	18	33.43	0.3%	163	42	40	3.55	0.0%
79	154	16	33.43	0.3%	164	116	50	3.53	0.0%
80	123	19	33.06	0.3%	165	131	35	3.46	0.0%
81	72	28	32.16	0.3%	166	86	18	3.37	0.0%
82	11	10	30.10	0.3%	167	105	53	2.93	0.0%
83	43	21	29.70	0.3%	168	83	29	1.86	0.0%
84	41	29	28.99	0.2%					