



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES
CARRERA RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DE LA COBERTURA VEGETAL
EN EL BALANCE HÍDRICO DEL VOLCÁN IGUALATA EN EL
PERIODO 1990-2020

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

AUTOR:

RONALD NICOLAY GUAMANÍ HIDALGO

Riobamba – Ecuador

2024



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES
CARRERA RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DE LA COBERTURA VEGETAL
EN EL BALANCE HÍDRICO DEL VOLCÁN IGUALATA EN EL
PERIODO 1990-2020

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

AUTOR: RONALD NICOLAY GUAMANÍ HIDALGO

DIRECTOR: ING. JORGE DANIEL CÓRDOVA LLIQUIN

Riobamba – Ecuador

2024

© 2024, **Ronald Nicolay Guamaní Hidalgo**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Ronald Nicolay Huamaní Hidalgo, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 7 de mayo de 2024



Ronald Nicolay Guamaní Hidalgo

0550655401

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES
CARRERA RECURSOS NATURALES RENOVABLES

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación, **ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DE LA COBERTURA VEGETAL EN EL BALANCE HÍDRICO DEL VOLCÁN IGUALATA EN EL PERIODO 1990-2020**, realizado por el señor: **RONALD NICOLAY GUAMANÍ HIDALGO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Alex Vinicio Gavilanes Montoya PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2024-05-07
Ing. Jorge Daniel Córdova Lliquín DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2024-05-07
Ing. Adriana Catalina Guzmán Guaraca ASESORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2024-05-07

DEDICATORIA

Dedicado a mis abuelitas.

Ronald

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres, hermanas y familia más cercana por ser mis acompañantes incondicionales en todo tipo de situaciones durante mi vida universitaria. De igual forma estoy sumamente agradecido con mi director Daniel Córdova y mi asesora Adriana Guzmán por guiarme y ayudarme en la presente investigación. Muchas gracias también a la ingeniera Jessica Velarde, mi mejor amiga.

Ronald

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	x
ÍNDICE DE ANEXOS	xii
RESUMEN	xiii
SUMMARY / ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1.	PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	3
1.1	Planteamiento del problema.....	3
1.2	Objetivos.....	4
1.2.1	<i>Objetivo general</i>	4
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	4
1.3	Justificación.....	4
1.4	Pregunta de investigación	5

CAPÍTULO II

2.	MARCO TEÓRICO.....	6
2.1	Balance hídrico	6
2.1.1	<i>Precipitación</i>	7
2.1.2	<i>Evaporación</i>	7
2.1.3	<i>Transpiración</i>	7
2.1.4	<i>Evapotranspiración</i>	7
2.1.5	<i>Radiación solar</i>	8
2.1.6	<i>Temperatura</i>	8
2.1.7	<i>Humedad</i>	8
2.1.8	<i>Índice de calor</i>	9
2.1.9	<i>Exceso hídrico</i>	9
2.1.10	<i>Déficit hídrico</i>	9
2.1.11	<i>Zona de recarga hídrica</i>	9
2.2	Suelo.....	9

2.2.1	<i>Propiedades del suelo</i>	9
2.2.2	<i>Pendiente</i>	10
2.2.3	<i>Cobertura vegetal</i>	10
2.2.4	<i>Uso de suelo</i>	10
2.3	Teledetección	11
2.3.1	Índices de vegetación	11
2.4	Sistema de información geográfica	12
2.4.1	<i>Análisis espacial</i>	13
2.4.2	<i>Análisis multitemporal</i>	13
2.4.3	<i>Reclasificación</i>	13
2.5	Estadística	13
2.5.1	<i>Media aritmética</i>	13
2.5.2	<i>Moda</i>	13
2.5.3	<i>Varianza</i>	14
2.5.4	<i>Correlación</i>	14
2.6	Manejo sostenible de la tierra	14

CAPÍTULO III

3.	Marco metodológico	15
3.1	Caracterización del área de estudio	15
3.1.1	<i>Ubicación del área de estudio</i>	15
3.2	Estimación del Balance hídrico climático (BHC) de Thornthwaite y Mather 16	
3.2.1	<i>Conformación de la base de datos</i>	16
3.2.2	<i>Evapotranspiración potencial (EP)</i>	19
3.2.3	<i>Pérdida o adición potencial de agua en el suelo (PEP)</i>	21
3.2.4	<i>Capacidad de agua disponible (CAD)</i>	23
3.2.5	<i>Agua almacenada en el suelo (ARM)</i>	24
3.2.6	<i>Alteración mensual de almacenamiento de agua (ALT)</i>	25
3.2.7	<i>Evapotranspiración real</i>	26
3.2.8	<i>Balance Hídrico (BH)</i>	26
3.3	Índice de vegetación diferencial normalizado	28
3.3.1	<i>Conformación de la base de datos</i>	29
3.3.2	<i>Cálculo del índice de vegetación diferencial normalizado</i>	31
3.4	Correlación entre la cobertura vegetal y el balance hídrico	32
3.4.1	<i>Conformación de la base de datos</i>	32

3.4.2	Cálculo del coeficiente de correlación de Pearson (r).....	33
3.5	Actividades de manejo sostenible	34
3.5.1	<i>Conformación de la base de datos</i>	34
3.5.2	<i>Realización del mapa de uso de suelo</i>	34
3.5.3	<i>Realización del mapa de la pendiente</i>	35
3.5.4	<i>Balance hídrico</i>	35
3.5.5	<i>Propuesta de actividades de manejo sostenible</i>	36

CAPÍTULO IV

4.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS	39
4.1	Procesamiento, análisis, interpretación de resultados y discusión.....	39
4.1.1	<i>Estimación del balance hídrico climático (BHC) de Thornthwaite y Mather</i>	39
4.1.2	<i>Índice de vegetación diferencial normalizado</i>	45
4.1.3	<i>Correlación entre el balance hídrico y la cobertura vegetal</i>	47
4.1.4	<i>Actividades de manejo sostenible</i>	49

CAPÍTULO V

5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	59
5.1	CONCLUSIONES	59
5.2	RECOMENDACIONES	59

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1:	Variables, datos y resultados del Balance Hídrico de Thornthwaite y Mather. ...	16
Tabla 3-2:	Capacidad de almacenamiento de agua según suelo y cultivo.....	23
Tabla 3-3:	Rango de clasificación para la cobertura vegetal del área de estudio en función del NDVI.....	32
Tabla 3-4:	Escala cualitativa del coeficiente de correlación de Pearson (r).....	33
Tabla 3-5:	Criterio para reclasificar los campos correspondientes a la cobertura vegetal. ...	35
Tabla 3-6:	Criterio para reclasificar las clases de gradiente de la pendiente.....	35
Tabla 3-7:	Tecnologías sostenibles de acuerdo al uso de suelo, humedad y pendiente.	36
Tabla 4-1:	Propuesta de actividades de manejo sostenible para los diferentes usos de suelo en el volcán Igualata en el periodo 1990 – 2020.	51

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1:	Esquema del balance hídrico.....	6
Ilustración 2-2:	Principales componentes que intervienen en la evapotranspiración.	8
Ilustración 2-3:	Relación entre las bandas para NDVI.	12
Ilustración 2-4:	Sistema de información geográfica.	12
Ilustración 3-1:	Ubicación del volcán Igualata.	15
Ilustración 3-2:	Descarga de capas ráster de precipitación media mensual mediante la plataforma Google Earth Engine, año 2018.	17
Ilustración 3-3:	Descarga de capas ráster de temperatura media mensual mediante la plataforma Google Earth Engine, año 2018.	17
Ilustración 3-4:	Proceso para recortar las capas ráster de Pm y Tm en función del área de estudio.	18
Ilustración 3-5:	Proceso para recortar las capas ráster de Pm y Tm en función del área de estudio.	19
Ilustración 3-6:	Fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial.	20
Ilustración 3-7:	Model builder para calcular la evapotranspiración potencial.....	21
Ilustración 3-8:	Proposiciones para el cálculo del ARM inicial.	24
Ilustración 3-9:	Proposiciones para el cálculo del ARM sucesivo.	25
Ilustración 3-10:	Proposiciones para el cálculo de la evapotranspiración real.	26
Ilustración 3-11:	Procedimientos para calcular la media aritmética, la desviación estándar y la moda.	27
Ilustración 3-12:	Visualización del plugin “Semi-Automatic Classification” usado para el preprocesamiento de la imagen Landsat 7.....	30
Ilustración 3-13:	Visualización de la herramienta “rellenar sin datos” usada para el preprocesamiento de la imagen Landsat 7.....	31
Ilustración 3-14:	Proceso para recortar las capas shp de cobertura vegetal en función del área de influencia del volcán Igualata.	34
Ilustración 3-15:	Proceso para obtener el mapa de la pendiente del volcán Igualata.	35
Ilustración 3-16:	Proceso para obtener el mapa de la pendiente del volcán Igualata.	38
Ilustración 4-1:	Mapa del promedio, la desviación estándar y la moda del balance hídrico del volcán Igualata agosto 1990 – julio 2020.....	39
Ilustración 4-2:	Balance hídrico mensual del volcán Igualata agosto 1990 – julio 2020.	41
Ilustración 4-3:	Balance hídrico mensual del volcán Igualata agosto 1990 – julio 2020.	42

Ilustración 4-4:	Mapa comparativo de la media entre los periodos de estudio agosto 1990 – julio 2020 y 2006 – 2020.....	43
Ilustración 4-5:	Mapa comparativo de la moda entre los periodos de estudio agosto 1990 – julio 2020 y agosto 2005 – julio 2020.....	44
Ilustración 4-6:	Mapa comparativo de la moda entre los periodos de estudio 1990 – 2005 y 2005 – 2020.....	45
Ilustración 4-7:	Mapa comparativo del NDVI entre el periodo de estudio 1990 – 2005 y 2005 – 2020.....	46
Ilustración 4-8:	Coefficiente de correlación de Pearson NDVI vs Balance hídrico.....	47
Ilustración 4-9:	Mapa de uso de suelo del área de influencia del volcán Igualata 2020.....	49
Ilustración 4-9:	Mapa de la pendiente del volcán Igualata.....	50
Ilustración 4-10:	Mapa de tecnologías sostenibles de acuerdo al uso de suelo, humedad y pendiente 1.....	54
Ilustración 4-13:	Mapa de tecnologías sostenibles de acuerdo al uso de suelo, humedad y pendiente 2.....	56

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: VISUALIZACIÓN DEL PROCESO PARA RECORTAR LAS CAPAS RÁSTER DE PM Y TM EN FUNCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

ANEXO B: VISUALIZACIÓN DEL PROCESO PARA RECORTAR UNA CAPA SHP EN FUNCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

ANEXO C: VISUALIZACIÓN DE LA CAPA RÁSTER CORRESPONDIENTE A LA CAPACIDAD DE AGUA DISPONIBLE

RESUMEN

El volcán Igualata es una importante zona de recarga hídrica que provee de agua a varias comunidades de los cantones Guano y Quero, sin embargo, las actividades antropogénicas tales como el avance de la frontera agrícola en la zona están comprometiendo la disponibilidad del recurso hídrico. Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación fue analizar la incidencia de la cobertura vegetal en el balance hídrico del volcán Igualata en el periodo 1990-2020. Dado que la zona de estudio comprende una superficie de 556.58 kilómetros cuadrados, se utilizaron sistemas de información geográfica para: estimar el balance hídrico climático de Thornthwaite y Mather, elaborar un análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal (NDVI), analizar la correlación entre el balance hídrico y la cobertura vegetal, y proponer actividades de manejo sostenible para los diferentes usos de suelo en el área de estudio. Mediante esta metodología se determinó que los valores más altos de balance hídrico tienden a mostrarse en la cima del volcán, así como la cobertura vegetal ha sufrido una clara degradación durante el periodo de estudio, además de que existe una correlación directa entre las dos variables previamente mencionadas, y finalmente se propusieron actividades de manejo sostenible considerando el balance hídrico, la pendiente y los usos de suelo. En este contexto, se concluye que el aspecto más importante de la investigación es el análisis espacial que permite evidenciar las variaciones de la disponibilidad de agua, el aumento o disminución de la salud en la cobertura vegetal y las zonas en las que más incide la cobertura vegetal en el balance hídrico, lo que permitió espacializar las tecnologías de manejo sostenible en el área de estudio.

Palabras clave: <BALANCE HÍDRICO>, <COBERTURA VEGETAL>, <CORRELACIÓN>, <ANÁLISIS MULTITEMPORAL>, <ACTIVIDADES DE MANEJO SOSTENIBLE>, <USOS DE SUELO>.

0535-DBRA-UPT-2025

27-05-2024



SUMMARY

The Igualata volcano is an important water recharge area that provides water to several communities in Guano and Quero cantons, however, anthropogenic activities such as the advance of the agricultural frontier in the area are compromising the availability of water resources. Therefore, the objective of this research was to analyze the incidence of vegetation cover on the water balance of Igualata volcano in the period 1990-2020. Due to the study area covers an area of 556.58 square kilometers, geographic information systems were used to: estimate the Thornthwaite and Mather climatic water balance, develop a multi-temporal analysis of vegetation cover change (NDVI), analyze the correlation between the water balance and vegetation cover, and propose sustainable management activities for the different land uses in the study area. Using this methodology, it was determined that the highest values of water balance tend to be shown at the top of the volcano, as well as the vegetation cover has suffered a clear degradation during the study period, in addition to the fact that there is a direct correlation between the two previously mentioned variables, and finally sustainable management activities were proposed considering the water balance, slope and land uses. In this context, it is concluded that the most important aspect of the research is the spatial analysis that allows us to demonstrate the variations in water availability, the increase or decrease in the health of the vegetation cover and the areas in which the cover has the most impact, vegetation in the water balance, which allowed the spatialization of sustainable management technologies in the study area.

Keywords: <WATER BALANCE>, <VEGETATION COVER>, <CORRELATION>, <MULTI-TEMPORAL ANALYSIS>, <SUSTAINABLE MANAGEMENT ACTIVITIES>, <LAND USE>.

Lic. Lorena Hernández A. Mcs

1803737889

INTRODUCCIÓN

Los cambios globales relacionados con temperaturas superficiales y cambios en la cobertura terrestre han modificado variables tales como el ciclo del carbono, los ecosistemas y el equilibrio hídrico mundial. Los ecosistemas de alta montaña son fácilmente afectados por el impacto de estos cambios globales, y sus consecuencias tienen que ver con cambios en la distribución de especies, composición de las comunidades y tasas de crecimiento de la vegetación. Estas variaciones modifican el balance hídrico de una cuenca mediante cambios en la captación de carbono por la vegetación, mientras se altera la distribución y eficiencia del uso del agua (Duquesarango et al., 2019, pág. 56).

En la actualidad, la conservación del recurso hídrico es una prioridad para la administración de los recursos naturales en Ecuador. Actividades tales como la agricultura están estrechamente relacionadas con el acceso al agua. Durante las épocas de sequía, es crucial contar con información sobre la disponibilidad de agua, ya que su escasez afecta de manera significativa la gestión integral y sostenible en diversas áreas como cuencas, subcuencas, microcuencas o zonas hidrográficas e hidrogeológicas (Zambrano Navarrete, Caicedo Toro y Faréz-Román, 2021, pág. 2).

El páramo ecuatoriano es el ecosistema que abastece de agua a las comunidades andinas, urbanas y rurales (Llambí, Soto-W, et al., 2012; en Israel Guaiña-Yungán III et al., 2022, pág. 1079). Este ecosistema forma un corredor sobre la Cordillera de los Andes, por lo que las altas montañas son consideradas como zonas de recarga hídrica y debido a sus suelos son deseables para la producción agropecuaria. Las amenazas, riesgo y vulnerabilidad de las zonas de recarga hídrica se han incrementado como consecuencia de los cambios en la cobertura vegetal, entre los que se pueden mencionar a: los incendios forestales, la deforestación y el avance de la frontera agrícola. Estos fenómenos han comprometido la disponibilidad y calidad del agua en Ecuador (Israel Guaiña-Yungán III et al., 2022, pág. 1079).

El volcán Iguayata se encuentra ubicado en el límite territorial entre las provincias de Chimborazo (sur) y Tungurahua (norte), y forma parte de la Cordillera de los Andes. Un primer acercamiento a la importancia del volcán tiene que ver con el aporte del recurso hídrico para las comunidades aledañas, en los Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial correspondientes a la zona de influencia del Iguayata se manifiesta que se aprovechan 12 vertientes de agua en total para usos varios, también aporta un considerable caudal de agua a las microcuencas del río Guano y quebrada Guilles, además de 2 fuentes de agua principal para uso doméstico.

Tomando en cuenta la importancia del recurso hídrico para las comunidades andinas, el desarrollo agropecuario y la conservación de la cobertura vegetal nativa, se ha optado por analizar la incidencia de la cobertura vegetal en el balance hídrico. Considerando que la investigación comprende un periodo de 30 años, y dado que no existen datos levantados en campo para la obtención de los productos (balance hídrico y cobertura vegetal), es pertinente utilizar datos satelitales para la estimación de los productos requeridos.

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Los recursos hídricos en Ecuador están siendo presionados por las actividades humanas, por lo que se agrava su disponibilidad, calidad y cantidad. Entre los factores de presión están: la explotación de acuíferos, el vertimiento de elementos contaminantes en cuerpos de agua, el cambio de uso de suelo, el incremento de zonas urbanas, un alto índice de crecimiento poblacional, entre otros. El decrecimiento en la disponibilidad del recurso hídrico genera conflictos con tendencia a agravarse, si no se implementan las medidas necesarias, tales como la regulación del uso del agua mediante normativas y leyes (López Padilla et al., 2019, pág. 131).

Bajo esta perspectiva, es válido mencionar que el Igualata se constituye como una zona de recarga hídrica de alta importancia, puesto que es el principal proveedor de agua para las comunidades de 8 parroquias pertenecientes a los cantones Guano y Quero. La información proporcionada por los gobiernos locales señala que las actividades humanas, entre las que se destaca el avance de la frontera agropecuaria, están comprometiendo la disponibilidad del recurso hídrico (Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Del Cantón Quero, 2018, pág. 56; Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Del Cantón Guano, 2015, pág. 66).

Otro dato importante es que sólo existe una publicación científica sobre el Igualata realizada por docentes de la ESPOCH en el año 2016, estudio en el que se indagó acerca del estado de los recursos naturales en el ecosistema de páramo.

En vista de que prácticamente no existen investigaciones relacionadas con la disponibilidad del recurso hídrico, y tomando en cuenta que el volcán está siendo presionado por el desarrollo de actividades antropogénicas (entre las que destacan el cambio en la cobertura vegetal), se ha decidido analizar la incidencia de la cobertura vegetal en el balance hídrico del volcán Igualata en el periodo 1990-2020.

De esta forma la presente investigación pretende sentar un precedente, generando información, para continuar con futuros estudios enfocados en la toma de decisiones para conservar el recurso hídrico y la cobertura vegetal nativa del Igualata.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

1.2.1.1 Analizar la incidencia de la cobertura vegetal en el balance hídrico del volcán Igualata en el periodo 1990-2020.

1.2.2 Objetivos específicos

1.2.2.1 Estimar el balance hídrico para el volcán Igualata en el periodo 1990 – 2020.

1.2.2.2 Elaborar un análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal (NDVI) para el volcán Igualata en el periodo 1990 – 2020.

1.2.2.3 Analizar la correlación entre el balance hídrico y la cobertura vegetal (NDVI) para el volcán Igualata en el periodo 1990 – 2020.

1.2.2.4 Proponer actividades de manejo sostenible para los diferentes usos de suelo en el volcán Igualata en el periodo 1990 – 2020.

1.3 Justificación

El Igualata es una importante zona de recarga hídrica de la que dependen varias comunidades andinas, sin embargo, la disponibilidad del recurso hídrico en el área de influencia del volcán se ha visto comprometida por la presión que generan las actividades humanas. En adición, es preciso mencionar que la cobertura vegetal nativa es fundamental para la regulación del recurso hídrico en el área de estudio. Tal es así que el Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica ha implementado una superficie de 200 hectáreas para la conservación del páramo, con el objetivo de disminuir el impacto provocado por actividades antropogénicas (Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Del Cantón Quero, 2018, págs. 72-76).

Por estas razones, se consideró estimar el balance hídrico para la zona de influencia del volcán, esta es una herramienta útil a la hora de tomar decisiones para la planificación y el manejo del agua, su administración juega un rol fundamental para el desarrollo, rendimiento y conservación de los cultivos y la vegetación (López Padilla, Peña Murillo y Velastegui Cáceres 2019, pág. 132).

La decisión del Ministerio para establecer esta superficie de conservación indica la importancia que posee la cobertura vegetal en el volcán, por lo que se ha decidido complementar la investigación mediante el análisis de la cobertura vegetal, misma que varía en función del uso de suelo, el estado de la vegetación y la situación hídrica del suelo (Gregorio Hernández Díaz-Ambrona y Tarquis, 2015, pág. 8).

Otro factor de suma importancia es la ubicación de la zona de estudio, ya que se caracteriza por mantener una constante de nubosidad durante todo el año y esto dificulta el acceso a los recursos satelitales necesarios para realizar el análisis de la cobertura vegetal. De ahí que la investigación depende en gran medida de la disponibilidad de imágenes satelitales con un bajo porcentaje de nubosidad, por lo que se han establecido dos periodos de estudio: 1990 – 2005 y 2005 – 2020.

Por último, y tomando en cuenta que los estudios sobre el cambio de uso y cobertura del suelo son de gran importancia para la planificación y la gestión de recursos naturales (Pabón Salazar, 2022, pág. 17), se ha decidido proponer actividades de manejo sostenible para los usos de suelo identificados en el área de estudio.

1.4 Pregunta de investigación

¿La cobertura vegetal incide significativamente en el balance hídrico del volcán Igualata en el periodo 1990-2020?

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Balance hídrico

De acuerdo con (Sokolov y Chapman, 1981; citados en López Padilla et al., 2019, pág. 131), en la hidrología, el análisis del equilibrio de agua se fundamenta en la aplicación del principio de conservación de masa, que se conoce como la ecuación de la continuidad. Según esta ecuación, la diferencia entre las entradas y salidas de agua en un volumen dado durante un período determinado está relacionada con la variación en el volumen de agua almacenada. La técnica del balance hídrico generalmente implica la medición tanto de los flujos como del almacenamiento de agua, aunque algunas mediciones pueden ser excluidas dependiendo del volumen y período de tiempo que se utilicen para el cálculo del balance.

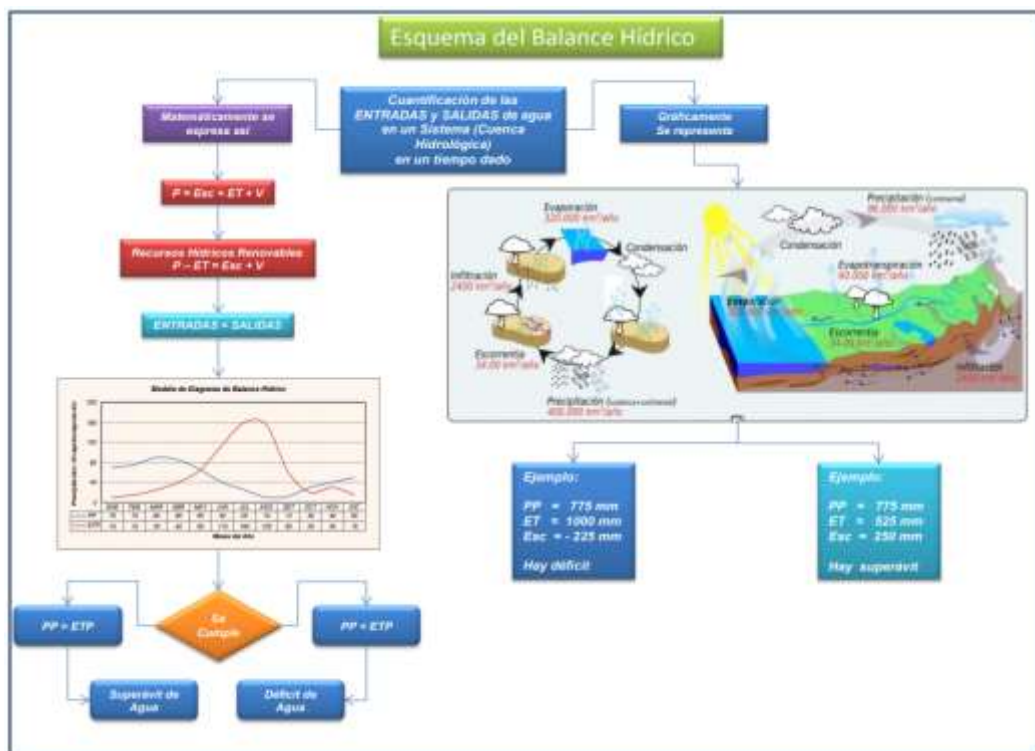


Ilustración 2-1: Esquema del balance hídrico.

Fuente: Ordoñez Gálvez, 2011, pág. 21.

2.1.1 Precipitación

La precipitación es una de las variables climáticas cruciales del planeta, surgiendo de procesos físicos y químicos dentro de la atmósfera. Técnicamente, se refiere al agua que se origina en la atmósfera y cae en forma líquida o sólida sobre la superficie terrestre. La formación de la precipitación requiere que las masas de agua en la atmósfera se eleven, se enfríen y condensen parte de su humedad, permitiendo así la lluvia en la superficie terrestre (Angulo Piza Gineth Cecilia y Velásquez Farfán Wilmar Alejandro, 2017; citados en Pineda Cortes Cristian Giovanni y Gutierrez de Piñeres Días Nathaly, 2020, pág. 29).

2.1.2 Evaporación

La evaporación es un proceso físico mediante el cual las moléculas de un fluido aumentan su energía cinética gracias a la incorporación de otra energía. En el caso del agua, generalmente se incorpora la energía del sol para cambiar de estado líquido a gaseoso y mezclarse con el aire circundante (Martínez y Garbi, 2020).

2.1.3 Transpiración

La transpiración, o evaporación fisiológica, es el resultado combinado de procesos biológicos y físicos. Este fenómeno involucra la transformación del agua a su estado gaseoso, debido al metabolismo de las plantas. Este proceso es impulsado por la transferencia de agua desde las raíces hasta las hojas durante la alimentación de la planta. Las hojas liberan el exceso de agua al ambiente en forma de vapor (Juela Sivilsaca Oscar Lenin, 2011; citado en Pineda Cortes Cristian Giovanni y Gutierrez de Piñeres Días Nathaly, 2020, pág. 31).

2.1.4 Evapotranspiración

La evapotranspiración es una variable hidrológica que toma en cuenta la evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación de manera conjunta. Se cuantifica en milímetros por unidad de tiempo, pero se diferencia por incluir la transpiración vegetal de manera simultánea. Este concepto integra la pérdida de agua tanto por la evaporación directa desde el suelo como por la liberación de vapor de agua a través de la actividad biológica de las plantas, representando así una medida integral de la pérdida de humedad en el entorno terrestre (Angulo Piza Gineth Cecilia y Velásquez Farfán Wilmar Alejandro, 2017; citados en Pineda Cortes Cristian Giovanni y Gutierrez de Piñeres Días Nathaly, 2020, pág. 31).

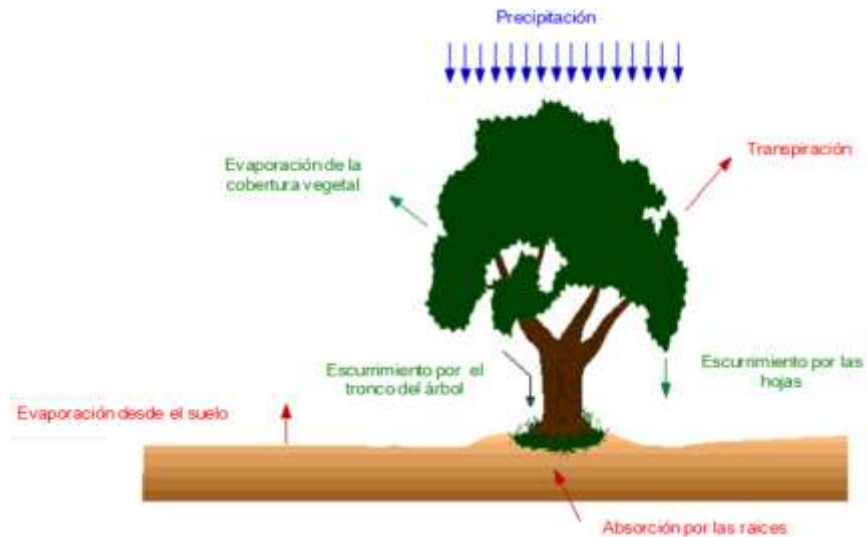


Ilustración 2-2: Principales componentes que intervienen en la evapotranspiración.

Fuente: Ordoñez Gálvez, 2011, pág. 13.

2.1.5 Radiación solar

La radiación o energía solar se emite como radiación de onda corta. Al llegar a la atmósfera, se debilita por difusión, reflexión en las nubes y absorción por gases o partículas en suspensión. Al llegar a la superficie terrestre la radiación se puede reflejar o absorber. La radiación solar es la causante de fenómenos como los vientos, la formación de nubes, la evaporación del agua y las lluvias. Además, su calor y luz son esenciales para reacciones químicas necesarias en el desarrollo de vegetales y animales (Gonzales Zamora, 2021).

2.1.6 Temperatura

La temperatura es una magnitud física que mide el promedio de la energía cinética de las partículas de una sustancia. En otras palabras, la temperatura es la cantidad de calor que un objeto posee y no depende del tamaño (cantidad de partículas), ni del material del objeto (OMEGA Engineering Mexico, 2017).

2.1.7 Humedad

Se conoce como humedad a la cantidad de agua contenida en un material (líquido o sólido) por adsorción o absorción que puede quitarse sin alterar sus propiedades químicas (Caicedo-Rosero et al., 2021).

2.1.8 *Índice de calor*

El índice de calor es una herramienta desarrollada para tener en cuenta el efecto calórico de la radiación solar recibida a la hora de calcular el balance hídrico, y es igual a la quinta parte de la temperatura media mensual elevada a 1,514 (Martínez y Garbi, 2020).

2.1.9 *Exceso hídrico*

El exceso hídrico es el excedente de agua, generalmente precipitación, que supera la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (INAMHI, 2017, pág. 2).

2.1.10 *Déficit hídrico*

El déficit hídrico es la escasez o falta de agua con relación a la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (INAMHI, 2017, pág. 2).

2.1.11 *Zona de recarga hídrica*

Una zona de recarga hídrica es un área que reúne características que facilitan la infiltración de agua hasta el nivel freático. Las zonas de recarga hídrica se caracterizan generalmente por suelos ácidos, poco desarrollados con un bajo porcentaje de materia orgánica y poca concentración de sales, también poseen un nivel freático profundo (Lara-Vásconez et al., 2021, pág. 126).

2.2 *Suelo*

El suelo es un recurso natural no renovable originado por los residuos sólidos de los seres vivos, por variaciones físicas y químicas de las rocas y otros procesos naturales. Además, es considerado un elemento fundamental en la biosfera y debido a su dinamismo es un soporte vital para los seres vivos. Este recurso permite el desarrollo de plantas y animales, la producción de alimentos y es parte importante para mantener equilibrada la calidad ambiental (Osorio Rivera et al., 2023, pág. 3).

2.2.1 *Propiedades del suelo*

Las propiedades del suelo se dividen en dos grandes grupos: físicas y químicas.

2.2.1.1 Propiedades físicas

Las propiedades físicas son características que determinan cómo se comporta el suelo físicamente, y están relacionadas con la textura, color, estructura, porosidad, densidad, permeabilidad, capacidad de retención de agua, entre otras (Propiedades de los suelos, 2019).

- **Textura**

La textura del suelo es la constitución mineral que determina la proporción de partículas (arena, limo, arcilla) que lo conforman. Es decir, la textura del suelo se refiere al tamaño de las partículas que lo componen (Osorio Rivera et al., 2023, pág. 11).

2.2.1.2 Propiedades químicas

Las propiedades químicas del suelo son características que determinan la composición química y la capacidad del suelo para reaccionar con nutrientes, contaminantes, entre otros compuestos. Estas propiedades inciden en variables como la disponibilidad de nutrientes, capacidad de retención de agua, entre otras (Propiedades de los suelos, 2019).

2.2.2 *Pendiente*

La pendiente es la inclinación del terreno en comparación con un plano horizontal que pasa por su base. Suele expresarse en grados o porcentaje, en trigonometría corresponde a la tangente del ángulo formado entre la pendiente y su horizontal (Ovalle-Castiblanco et al., 2021, pág. 2).

2.2.3 *Cobertura vegetal*

La cobertura vegetal es la capa de vegetación natural que cubre la litosfera, comprende una amplia gama de coberturas con distintas características ambientales y fisionómicas que van desde bosques naturales hasta áreas cubiertas por agricultura (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022, pág. 7).

2.2.4 *Uso de suelo*

El uso de suelo es la destinación específica designada a la superficie terrestre por sus propietarios, de acuerdo con las actividades que el suelo es capaz de desarrollar. Los usos son variados como

la ganadería, vivienda, conservación, entre otros (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022, pág. 14).

2.3 Teledetección

La teledetección es un campo de estudio científico que integra conocimientos y tecnologías usadas para la observación, el análisis y la interpretación de fenómenos atmosféricos y terrestres. Utiliza las medidas e imágenes obtenidas de sensores de plataformas aéreas y espaciales como fuentes de información, es decir, la información se obtiene a distancia y sin contacto directo con el objeto estudiado (López-Montecinos, 2019).

2.3.1 Índices de vegetación

Los índices de vegetación son combinaciones de las bandas espectrales recogidas por los sensores de satélites de teledetección, su función es realzar la cobertura vegetal de acuerdo con su respuesta espectral y atenuar los detalles del resto de componentes como el agua, suelo, entre otros. En otras palabras, los índices de vegetación son imágenes calculadas mediante operaciones algebraicas entre diferentes bandas espectrales (Alonso, 2020).

2.3.1.1 Índice de vegetación de diferencia normalizada

El índice de vegetación diferencial normalizado es un parámetro que mide el verdor y la densidad de la vegetación captada por los sensores de un satélite (EOS Data Analytics, 2022).

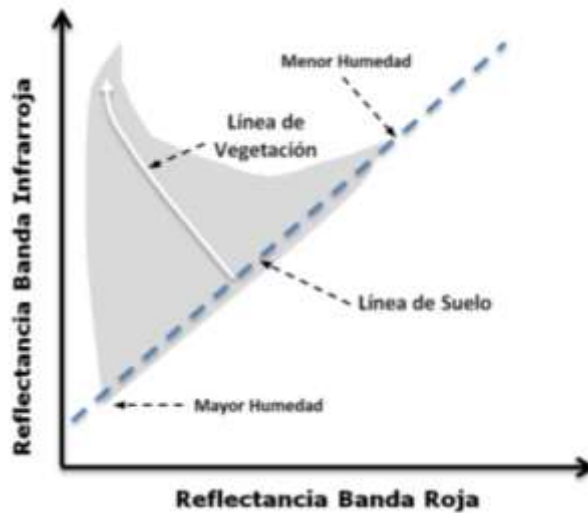


Ilustración 2-3: Relación entre las bandas para NDVI.

Fuente: Muñoz Aguayo, 2013.

2.4 Sistema de información geográfica

Un sistema de información geográfica (SIG) consiste en un conjunto de herramientas informáticas aptas para gestionar información temática y espacial sobre la cartografía digital de un sitio específico (Gazaba, 2021, pág. 8).

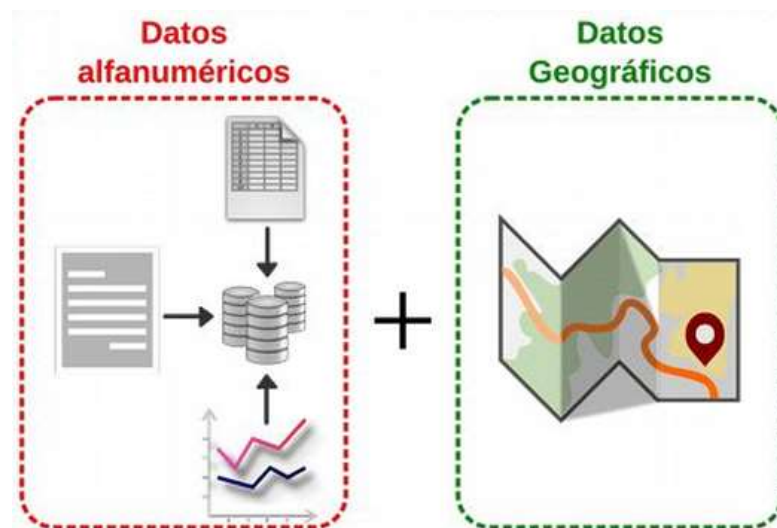


Ilustración 2-4: Sistema de información geográfica.

Fuente: Gazaba, 2021.

2.4.1 *Análisis espacial*

El análisis espacial es una metodología para la generación de mapas temáticos, permite la manipulación de datos espaciales con el fin de extraer los resultados para comprender los distintos procesos que ocurren en el espacio (Sánchez Carmona, 2019, pág. 108).

2.4.2 *Análisis multitemporal*

La metodología de análisis multitemporal para el estudio de ecosistemas permite identificar los cambios e impactos ambientales más relevantes a lo largo del tiempo permitiendo conocer las interacciones existentes entre los diferentes componentes que lo conforman y su relación con la acción humana (Flórez-Yepes et al., 2017, pág. 96).

2.4.3 *Reclasificación*

La reclasificación es un proceso que permite reemplazar los valores de una variable contenidos en una celda de una capa (shapefile, ráster), por nueva información. Es posible reclasificar datos de cualquier variable (precipitación, pendiente, temperatura, entre otros) (Pucha-Cofrep et al., 2017, pág. 46).

2.5 *Estadística*

La estadística es la disciplina encargada de recopilar, organizar, representar, analizar e interpretar datos obtenidos en una investigación sobre hechos, individuos o grupos, para extraer conclusiones precisas o estimaciones futuras (Salazar y Del Castillo, 2018, pág. 13).

2.5.1 *Media aritmética*

También conocida como promedio, la media aritmética es el valor obtenido al dividir la suma de todos los datos registrados para el número de valores considerados (Salazar y Del Castillo, 2018, pág. 50).

2.5.2 *Moda*

La moda es el valor de una observación que tiene la mayor frecuencia, es decir, el valor que más se repite (Salazar y Del Castillo, 2018, pág. 54).

2.5.3 Varianza

La varianza es la media aritmética de las desviaciones cuadráticas con relación al promedio general (Salazar y Del Castillo, 2018, pág. 69).

2.5.3.1 Desviación estándar

La desviación estándar es la raíz cuadrada de la varianza y se utiliza para interpretar la variabilidad de n conjunto de datos (Salazar y Del Castillo, 2018, pág. 69).

2.5.4 Correlación

La correlación es el análisis de la relación entre dos variables y la posible predicción de una de ellas (variable dependiente) basándose en la otra (variable independiente) (Batanero et al., 2017).

2.6 Manejo sostenible de la tierra

El manejo sostenible de la tierra es la planeación e implementación de prácticas de buen uso de agua, suelo y biodiversidad con el objetivo de permitir que sus usuarios obtengan beneficios económicos y sociales, a la vez que se asegura mantener las funciones ambientales para las actuales y futuras generaciones (Segarra Galarza, 2014, pág. 20).

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Caracterización del área de estudio

3.1.1 Ubicación del área de estudio

El mapa incluido en la Ilustración 3-1, se realizó con el software ArcMap 10.5, para delimitar el área fue preciso utilizar las corrientes naturales de agua aledañas al volcán. Es así que el área de estudio limita al norte con la subcuenca del río Patate, al este con el río Chambo, al sur con la subcuenca del río Chambo y al oeste con el río Mocha y sus drenajes.

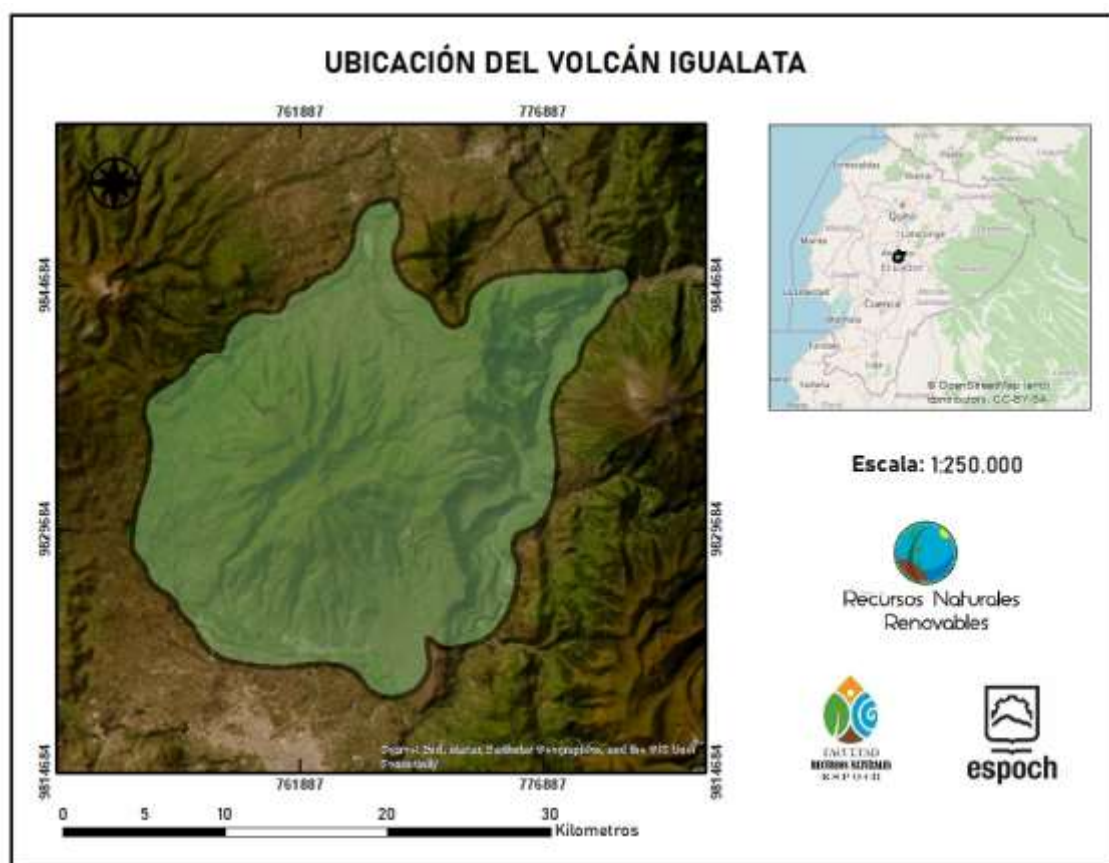


Ilustración 3-1: Ubicación del volcán Igualata.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

3.2 Estimación del Balance hídrico climático (BHC) de Thornthwaite y Mather

El balance hídrico climático es un instrumento para conocer la cantidad de agua que tiene la vegetación, además, permite relacionar la incidencia de la vegetación en la capacidad de agua disponible (CAD). Este balance permite contrastar los recursos hídricos, de un área específica, en diferentes periodos de tiempo (Santillán-Fernández et al., 2019, pág. 2).

Tabla 3-1: Variables, datos y resultados del Balance Hídrico de Thornthwaite y Mather.

Balance Hídrico Climático de Thornthwaite y Mather		
Variables	Datos	Resultados
Precipitación	Temperatura	Evapotranspiración potencial
Temperatura	Precipitación	Exceso hídrico
Propiedades del suelo	Capacidad de almacenamiento de agua del suelo	Déficit hídrico

Fuente: Santillán-Fernández et al., 2019, pág. 2.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

3.2.1 Conformación de la base de datos

3.2.1.1 Capas ráster de temperatura y precipitación media mensual

En vista de que el presente estudio se planificó para 31 años, y tomando en cuenta que el balance hídrico se va a estimar mensualmente, se requieren en total 372 capas ráster con la información correspondiente a la temperatura media mensual y 372 capas ráster con la información de la precipitación media mensual.

La información anteriormente mencionada se obtuvo mediante la plataforma Google Earth Engine que, mediante un código script, permite visualizar y descargar imágenes satelitales con los datos correspondientes a la temperatura y precipitación media mensual.

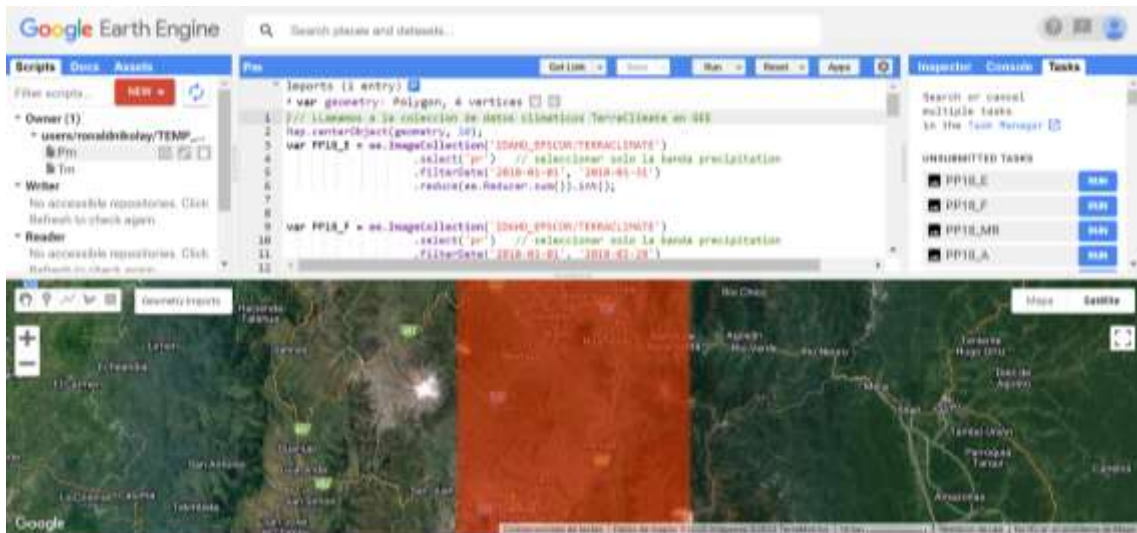


Ilustración 3-2: Descarga de capas ráster de precipitación media mensual mediante la plataforma Google Earth Engine, año 2018.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

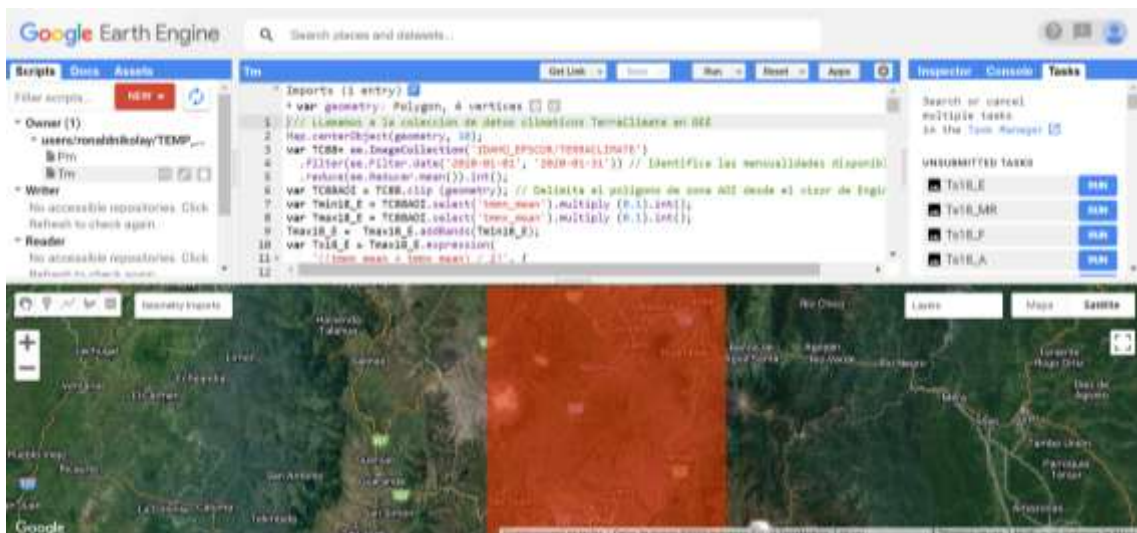


Ilustración 3-3: Descarga de capas ráster de temperatura media mensual mediante la plataforma Google Earth Engine, año 2018.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

Para el caso de las capas de precipitación se denominaron desde PP_E (precipitación del mes de enero) hasta PP_D (precipitación del mes de diciembre) de acuerdo con el mes de información, el mismo criterio se aplicó para las capas de temperatura que se denominaron desde T_E hasta T_D.

3.2.1.2 Capa shp de textura del suelo

La capa con la información acerca de la textura del suelo de la región fue obtenida, en formato shp, del Catálogo Nacional de Datos Geográficos (Catálogo Nacional de Datos Geográficos, 2003).

Cabe recalcar que este shp es útil al momento de calcular la capacidad de agua disponible para el área de estudio.

3.2.1.3 Capa shp de cobertura vegetal

La capa con la información acerca de la cobertura vegetal del año 1990 del territorio nacional fue obtenida, en formato shp, de la página del Catálogo Nacional de Datos geográficos.

Cabe recalcar que este shp es útil al momento de calcular la capacidad de agua disponible para el área de estudio.

3.2.1.4 Recorte de las capas ráster en función del área de estudio

Para recortar las capas ráster con la información correspondiente a la temperatura y la precipitación, se procedió como figura la siguiente ilustración:

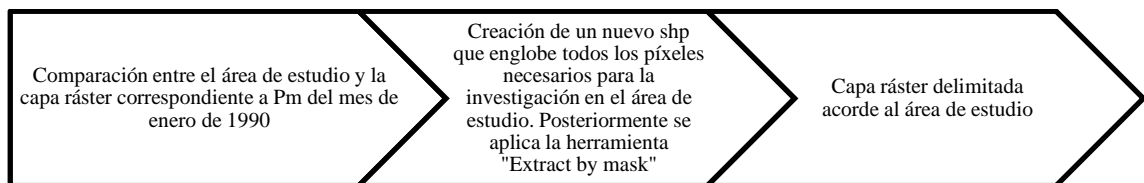


Ilustración 3-4: Proceso para recortar las capas ráster de Pm y Tm en función del área de estudio.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

Para los casos a continuación en donde se requiera aplicar un recorte de capas ráster en función al área de estudio, se siguió un proceso similar al descrito en la ilustración 3-4.

3.2.1.5 Recorte de las capas shp en función del área de estudio

Para recortar las capas shp con la información correspondiente a la textura del suelo y cobertura vegetal, se procedió como figura la siguiente ilustración:

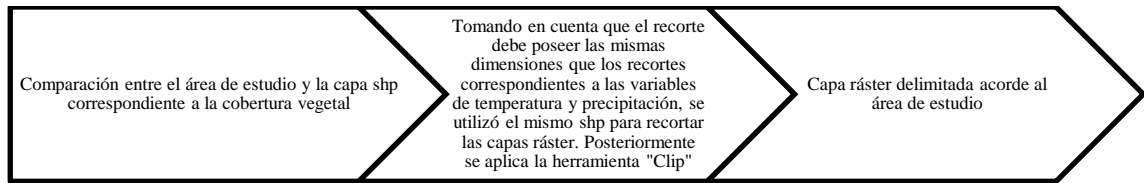


Ilustración 3-5: Proceso para recortar las capas ráster de Pm y Tm en función del área de estudio.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

Para los casos a continuación en donde se requiera aplicar un recorte de capas shp en función al área de estudio, se siguió un proceso similar al descrito en la ilustración 3-5.

3.2.2 *Evapotranspiración potencial (EP)*

De acuerdo con (Tadeu et al., 2015, pág. 123), la evapotranspiración potencial se define como la cantidad de precipitación necesaria para que no exista déficit hídrico, está dada en milímetros y para estimarla se requiere de la temperatura media mensual.

- La fórmula de Thornthwaite para calcular la evapotranspiración potencial:

$$EP = 16 * (10Tm/I)^a$$

Donde:

EP: Evapotranspiración Potencial

Tm: Temperatura media mensual

I: Índice de calor anual

- I está dado por la siguiente ecuación:

$$I = \sum_{m=1}^{12} \left(\frac{Tm}{5} \right)^{1,514}$$

- a está dado por la siguiente función compleja de I:

$$a = 675(I * 10^{-3})^3 - 77,1(I * 10^{-3})^2 + 1792(I * 10^{-5}) + 0,49329$$

a) Generación de capas ráster

Utilizando el álgebra de mapas mediante la herramienta “Calculadora ráster”, se obtuvieron 14 capas ráster, de acuerdo con el punto 3.2.2.2, distribuidas espacialmente en el área de estudio.

- Capa ráster “a”.
- Capa ráster “I”
- 12 capas ráster correspondientes a la evapotranspiración potencial mensual

A continuación, se presenta la fórmula utilizada en cada cálculo para obtener la evapotranspiración potencial:

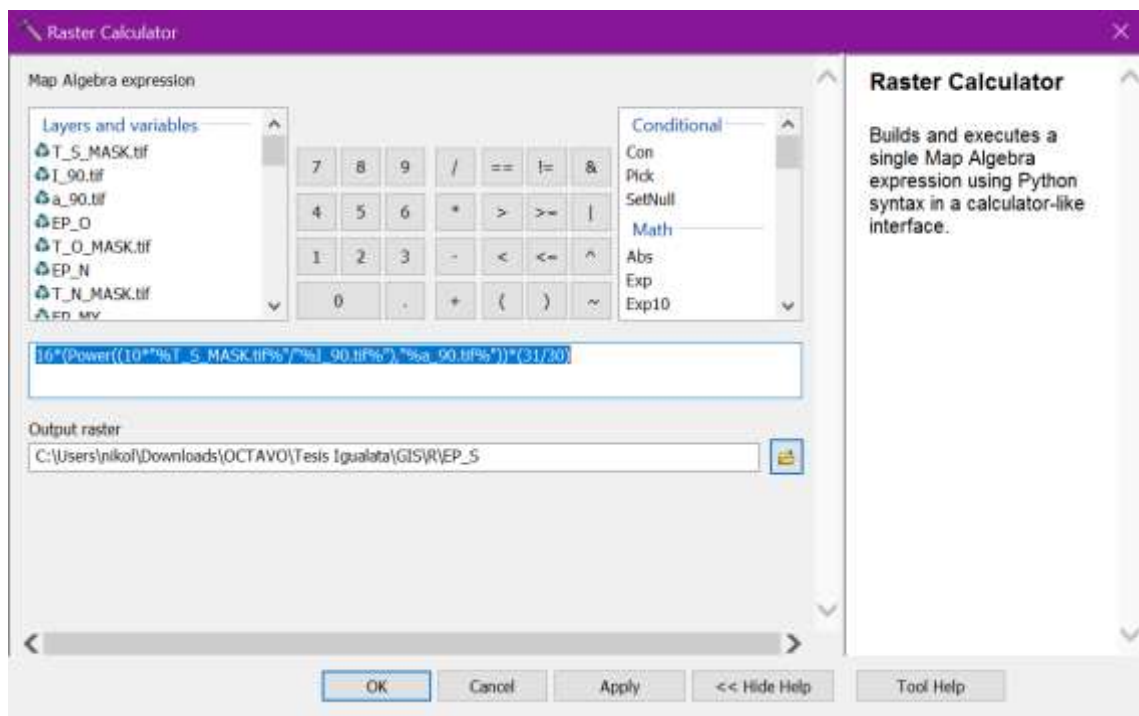


Ilustración 3-6: Fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

Cabe recalcar que la fórmula cambia dependiendo de los días que un determinado mes tenga, para el caso de meses con 31 días, la fórmula se multiplica por un factor correctivo de 31/30. Para el caso de febrero el factor correctivo es de 28/30, en tanto que para los meses que poseen 30 días no es necesario utilizar un factor correctivo.

Además, con la finalidad de acelerar el proceso para calcular la EP, se realizó un proceso por lotes mediante el uso de un Model Builder:

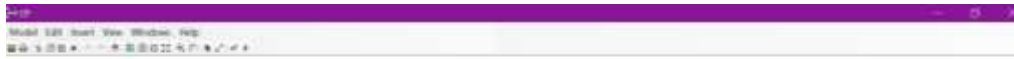


Ilustración 3-7: Model builder para calcular la evapotranspiración potencial.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

3.2.3 Pérdida o adición potencial de agua en el suelo (PEP)

Este elemento puede definirse como el cálculo del balance hídrico potencial. Se obtiene mediante la diferencia entre la precipitación (P_m) y la evapotranspiración potencial (EP). (Tadeu, Tommaselli y Leal, 2015, pág. 123).

- Se calcula mensualmente y viene dada por la siguiente ecuación:

$$PEP = P_m - EP_m$$

Dónde:

PEP: Pérdida o adición potencial de agua en el suelo

P_m : Precipitación media mensual

EP_m : Evapotranspiración potencial mensual

- Para su cálculo anual:

$$PEP \text{ anual} = \sum_{m=1}^{12} PEP_m$$

Dónde:

PEP anual: Pérdida o adición potencial de agua en el suelo anual

PEPm: Pérdida o adición potencial de agua en el suelo mensual

Estos valores permiten conocer los meses secos y los meses húmedos. Es importante identificar en qué mes inicia la estación seca, puesto que desde ese mes inicia el año hidrológico (Tadeu, Tommaselli y Leal 2015, pág. 123).

Finalmente, se calcula la pérdida potencial acumulada, en otras palabras, los valores negativos de los PEP mensuales (PEP_N) , y la adición potencial acumulada, es decir, los valores positivos de los PEP mensuales (PEP_P). Los acumulados anuales se utilizarán en la toma de decisiones, así como en la contabilidad del balance (Tadeu, Tommaselli y Leal 2015, pág. 123).

a) Generación de capas ráster

Usando el álgebra de mapas en base a lo establecido en el punto 3.2.2.4, se obtuvieron 39 capas ráster con información acerca de las adiciones y/o pérdidas potenciales mensuales y anuales. Estas capas fueron:

- 12 capas ráster con información de los PEP mensuales
- 12 capas ráster con información de los PEP_N mensuales
- 12 capas ráster con información de los PEP_P mensuales
- La capa ráster de la suma de los PEP mensuales
- La capa ráster de la suma de los PEP_N mensuales
- La capa ráster de la suma de los PEP_P mensuales

Mediante un análisis realizado en base a los valores máximos y mínimos de los PEP para el periodo 1990-1995, fue posible determinar que el año hidrológico empieza en el mes de agosto puesto que se observa una tendencia a disminuir los valores de PEP.

Finalmente, cabe resaltar que la contabilidad de agua también inicia en el mes de agosto, ya que hasta julio se observan los valores más altos de PEP y en agosto empieza la “estación seca”. Por lo tanto, es válido suponer que hasta el mes de julio el suelo ha almacenado la mayor cantidad de agua posible.

3.2.4 Capacidad de agua disponible (CAD)

Es la cantidad de agua que puede retener el suelo, se contabiliza en milímetros y se considera como una función de la cobertura vegetal relacionada con la textura del suelo (Tadeu, Tommaselli y Leal 2015, pág. 123).

Tabla 3-2: Capacidad de almacenamiento de agua según suelo y cultivo.

Tipo de cobertura	Textura del suelo	Capacidad de retención (Agua total utilizable en mm)
Cultivos de raíces someras	Arenoso fino	50
	Franco arenoso fino	75
	Franco limoso	125
	Franco arcilloso	100
	Arcilloso	75
Cultivos de raíces de profundidad moderada (cereales)	Arenoso fino	75
	Franco arenoso fino	150
	Franco limoso	200
	Franco arcilloso	200
	Arcilloso	150
Cultivos de raíces profundas (praderas, arbustos)	Arenoso fino	100
	Franco arenoso fino	150
	Franco limoso	250
	Franco arcilloso	250
	Arcilloso	200
Árboles frutales (arbolado, dehesa)	Arenoso fino	150
	Franco arenoso fino	250
	Franco limoso	300
	Franco arcilloso	250
	Arcilloso	200
Bosque cerrado	Arenoso fino	250
	Franco arenoso fino	300
	Franco limoso	400
	Franco arcilloso	400
	Arcilloso	350

Fuente: (Martínez Batlle José Ramón et al., 2013, pág. 141).

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

a) Generación de capas ráster

Mediante la herramienta “Intersecar”, se combinaron los shp correspondientes a textura del suelo y cobertura vegetal. Seguidamente se añadió un nuevo campo para los valores correspondientes a la CAD de cada una de las combinaciones de acuerdo con la tabla 3-2.

Adicionalmente, con ayuda de la herramienta “Polygon to raster”, se transformó el shp con los valores correspondientes a la CAD.

3.2.5 Agua almacenada en el suelo (ARM)

De acuerdo con (Tadeu et al., 2015, pág. 123), el agua almacenada en el suelo viene a ser un balance entre el agua que entra y el agua que sale. El cálculo de esta variable inicia en el mes con valores mayores en sus precipitaciones, pues se intuye que el suelo en este mes ha acumulado la mayor cantidad posible de agua.

De la estimación del primer ARM depende el ARM del resto de meses, estos vienen dados en función de la precipitación (entrada de agua) y la evapotranspiración (salida de agua).

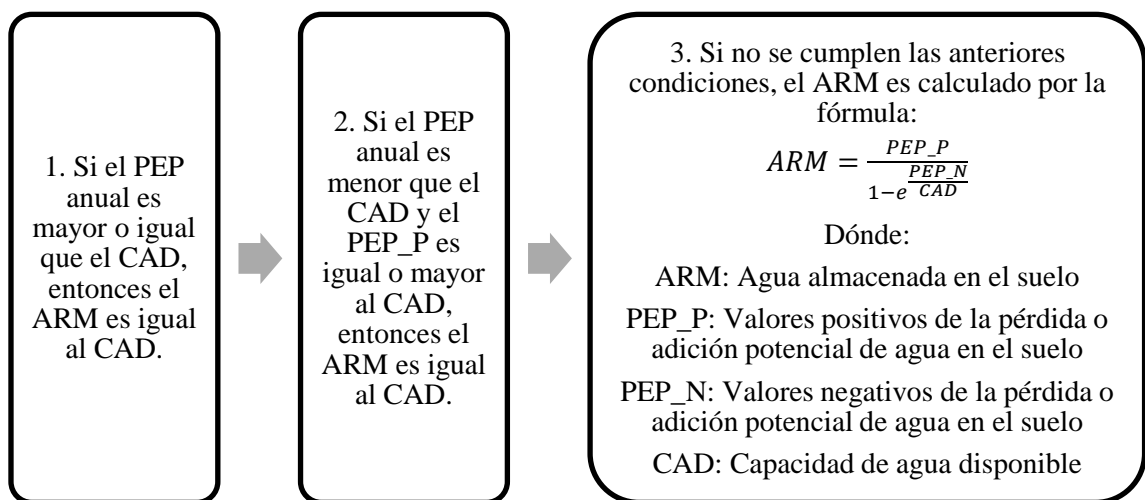


Ilustración 3-8: Propositiones para el cálculo del ARM inicial.

Fuente: Tadeu et al., 2015.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023, pág. 126.

Luego de calcular el ARM inicial, empieza un proceso iterativo para calcular el ARM de los meses restantes. El ciclo se completa al volver al mes del ARM inicial. Para estos procesos se sigue el siguiente esquema:

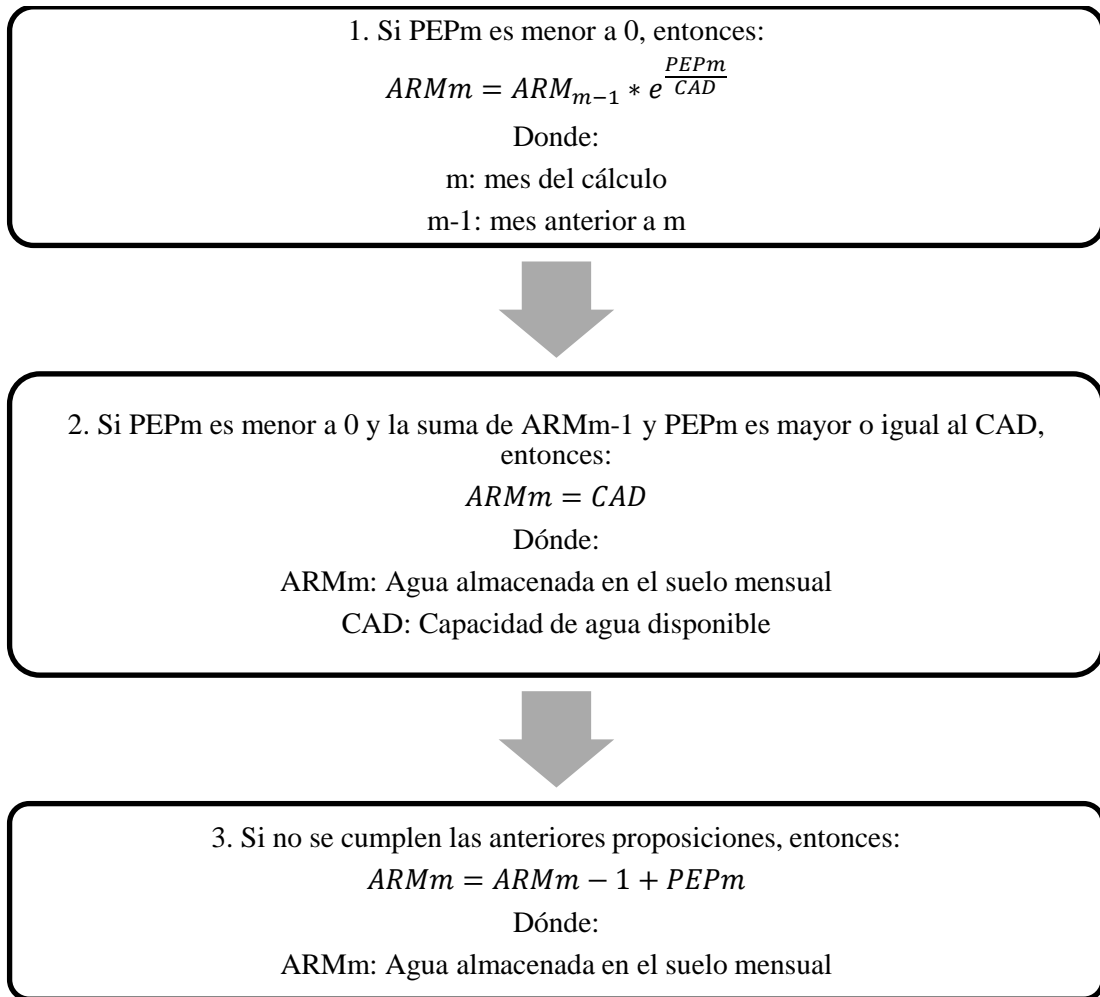


Ilustración 3-9: Proposiciones para el cálculo del ARM sucesivo.

Fuente: Tadeu et al., 2015, págs.. 126-127.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

3.2.6 Alteración mensual de almacenamiento de agua (ALT)

Se define como la variación del ARM en un mes y el ARM del mes subsiguiente. Su cálculo viene dado por la siguiente ecuación:

$$ARM_m = ARM_m - ARM_{m+1}$$

Dónde:

ARM_m: Mes del cálculo

ARM_{m+1}: Mes siguiente al mes del cálculo

3.2.7 Evapotranspiración real

Este elemento se calcula tomando en cuenta las siguientes proposiciones:

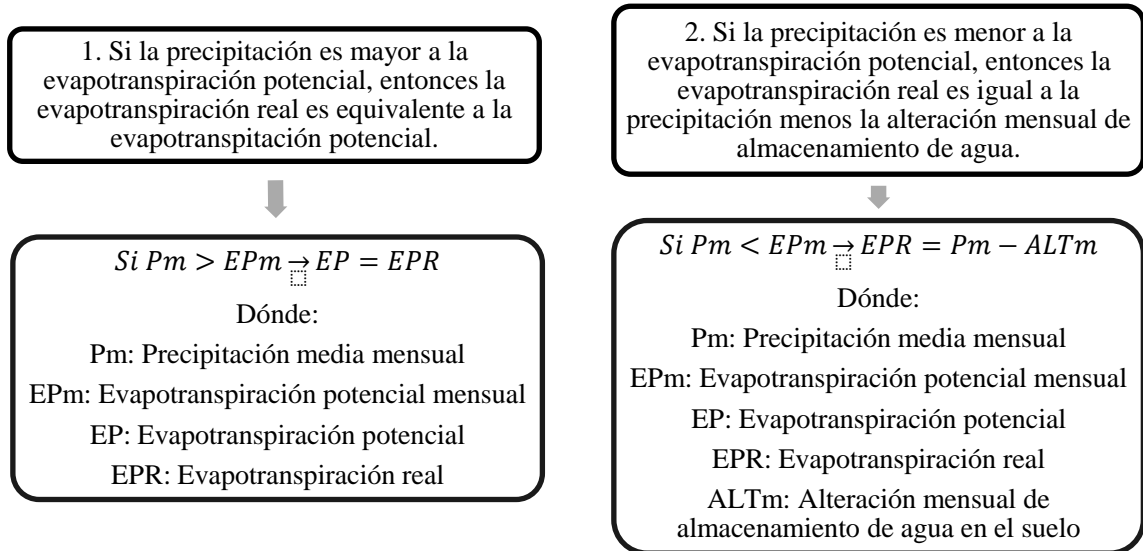


Ilustración 3-10: Proposiciones para el cálculo de la evapotranspiración real.

Fuente: Tadeu et al., 2015, págs. 128-129.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

3.2.8 Balance Hídrico (BH)

3.2.8.1 Procedimiento para la estimación del balance hídrico

El balance hídrico se entiende como la diferencia entre las entradas y salidas de agua en un volumen dado durante un período determinado. (Sokolov & Chapman, 1981, pág. 18).

Es así que para estimar el balance hídrico en la presente investigación se optó por la siguiente ecuación:

$$BH = P_m - EPR$$

Dónde:

BH: Balance hídrico

Pm: Precipitación media mensual

EPR: Evapotranspiración real

3.2.8.2 Análisis estadístico

Para el análisis estadístico fueron tomadas en cuenta dos medidas de tendencia central: la media aritmética y la moda, y una medida de dispersión: la desviación estándar. Estas medidas se obtienen de acuerdo con la siguiente ilustración:

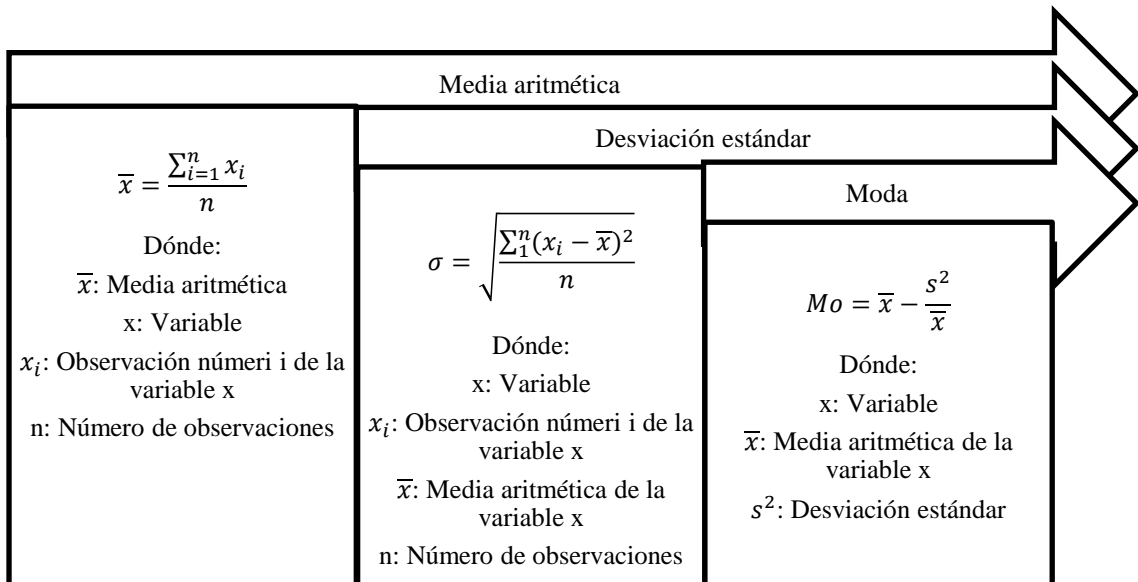


Ilustración 3-11: Procedimientos para calcular la media aritmética, la desviación estándar y la moda.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

3.2.8.3 Periodos de estudio

Dado que se establecieron dos periodos de estudio: 1990-2005 y 2006-2020, los análisis estadísticos se llevarán a cabo para ambos casos con la finalidad de poder compararlos.

3.2.8.4 Balance hídrico cualitativo

El balance hídrico del área de estudio fue estimado en milímetros, que es una variable cuantitativa. Sin embargo, se procederá a transformar las unidades del balance hídrico promedio, dependiendo de la cantidad de milímetros de lluvia, a una variable cualitativa con los intervalos bajo, medio y alto (Guzmán Guaraca Adriana Catalina, 2023, pág. 47).

$$\text{Intervalo bajo} = < Pmin + \frac{Pmax - Pmin}{3}$$

$$\text{Intervalo medio} = P_{\min} + 2 * \left\{ \begin{array}{l} < P_{\min} + \frac{P_{\max} - P_{\min}}{3} \\ \left(\frac{P_{\max} - P_{\min}}{3} \right) \end{array} \right.$$

$$\text{Intervalo alto} = > P_{\min} + 2 \left(\frac{P_{\max} - P_{\min}}{3} \right)$$

Dónde:

P_{\min} : Promedio mínimo

P_{\max} : Promedio máximo

3.3 Índice de vegetación diferencial normalizado

El índice de vegetación diferencial normalizado es simbolizado por imágenes calculadas mediante operaciones algebraicas entre dos bandas espectrales, que permiten calcular la extensión de la vegetación, el volumen de biomasa generado, la condición de bienestar de las plantas, transformaciones y variaciones en el paisaje vegetal, mediante análisis de las mediciones de radiación emitida o reflejada (Carbajal-Morán & Onofre-Enriquez, 2020, pág. 236).

El resultado es una imagen en la que destacan los pixeles relacionados con la cobertura vegetal.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Dónde:

NDVI: Índice de vegetación diferencial normalizado

NIR: Infrarrojo cercano

RED: Rojo visible

Debido a la naturaleza de la fórmula, el índice puede tomar valores entre -1 y 1.

3.3.1 Conformación de la base de datos

Puesto que la presente investigación está dividida en dos periodos de estudio, se ha optado por calcular dos índices de vegetación diferenciales normalizados en los años 2005 para el primer periodo de estudio y 2020 para el segundo periodo de estudio.

Tomando en cuenta que Ecuador es un país con mucha nubosidad a lo largo de todo el año, y recordando que para el cálculo del índice de vegetación diferencial normalizado se requieren imágenes satelitales, se consideró utilizar imágenes Landsat de la siguiente manera:

3.3.1.1 Imagen Landsat 7 para el periodo de estudio 1990-2005

Considerando que Landsat 7 era el último satélite Landsat puesto en órbita y en funcionamiento hasta el año 2005, se buscaron las imágenes en el geoportal del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) con una nubosidad inferior al 20% lo más próximas al año 2005.

Como resultado se obtuvo una imagen Landsat 7 con una nubosidad del 16% tomada el 28 de enero del 2004.

3.3.1.2 Imagen Landsat 9 para el periodo de estudio 2006-2020

Para obtener la imagen adecuada para el cálculo del NDVI del segundo periodo de estudio se siguieron las mismas premisas que en el anterior caso: que tenga una nubosidad inferior al 20% y que sea la imagen más próxima al año 2020. No obstante, en el geoportal del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) no se obtuvieron resultados que cumplan las premisas ya mencionadas.

Por lo tanto, se recurrió a la plataforma Google Earth Engine que, mediante un código script, permite visualizar y descargar imágenes satelitales Landsat, en este caso fue posible obtener una imagen Landsat 9 con una nubosidad del 23% tomada el 21 de mayo del 2022.

3.3.1.3 Preprocesamiento de las imágenes satelitales

Con la finalidad de maximizar la precisión de los resultados obtenidos por medio de las imágenes satelitales se realizaron los siguientes procesos en el software QGIS 3.26.2:

a) Plugin SCP – Preprocesamiento de imágenes Landsat

Este plugin permite realizar la corrección atmosférica y aplicar la técnica Pansharping, de esta manera todas las bandas se corrigieron atmosféricamente y la resolución pasará a ser de 15 metros.

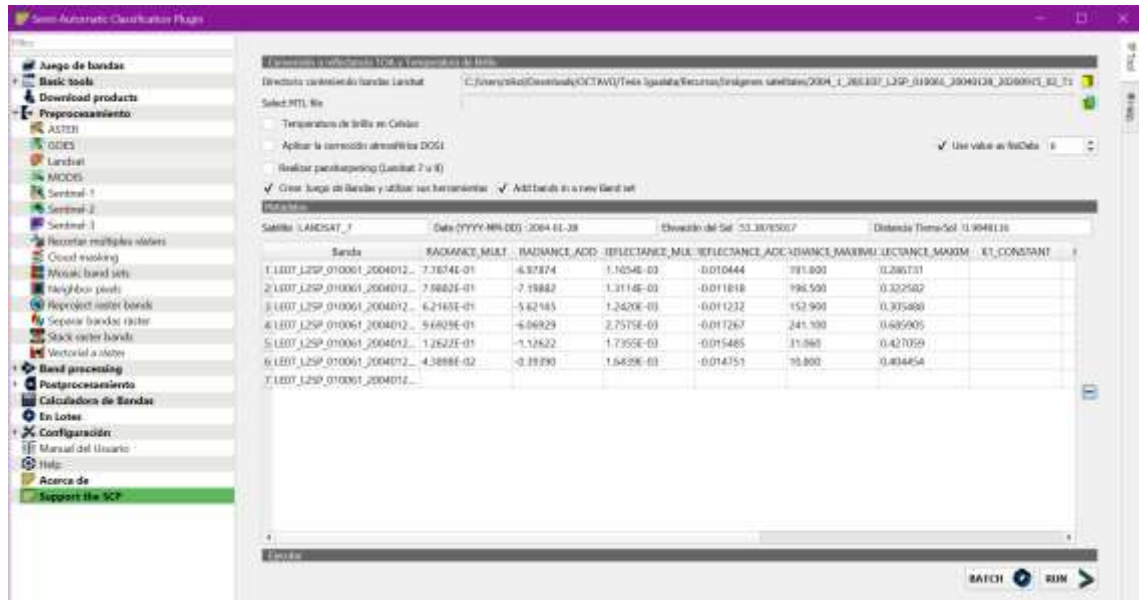


Ilustración 3-12: Visualización del plugin “Semi-Automatic Classification” usado para el preprocesamiento de la imagen Landsat 7.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

b) Herramienta rellenar sin datos

Esta herramienta permite rellenar los píxeles cuyos datos se han extraviado o no existen, para hacerlo utiliza métodos geoestadísticos basados en los píxeles más cercanos. De esta manera los datos aseguran una mayor confiabilidad para los cálculos posteriores.

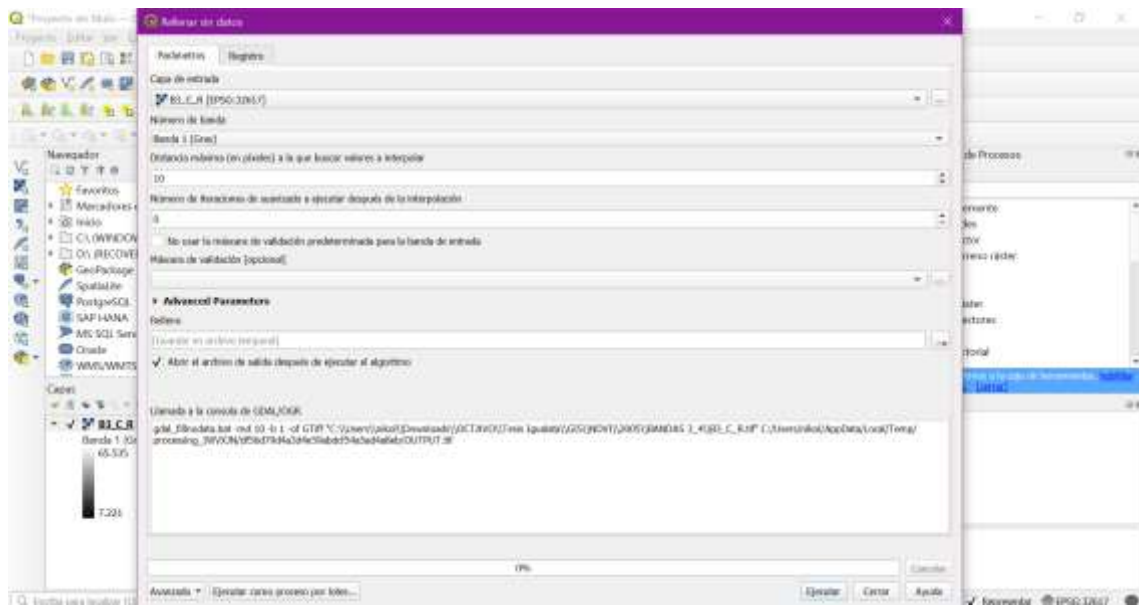


Ilustración 3-13: Visualización de la herramienta “rellenar sin datos” usada para el preprocesamiento de la imagen Landsat 7.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

3.3.2 Cálculo del índice de vegetación diferencial normalizado

3.3.2.1 NDVI 2005

Aplicando la fórmula a las bandas espectrales de la imagen Landsat 7 con ayuda de la calculadora ráster del software QGIS 3.28.15:

$$NDVI = \frac{Banda\ 4 - Banda\ 3}{Banda\ 4 + Banda\ 3}$$

Dónde:

NDVI: Índice de vegetación diferencial normalizado

Banda 4: Infrarrojo cercano

Banda 3: Rojo visible

3.3.2.2 NDVI 2020

Aplicando la fórmula a las bandas espectrales de la imagen Landsat 9 con ayuda de la calculadora ráster del software QGIS 3.28.15:

$$NDVI = \frac{\text{Banda 5} - \text{Banda 4}}{\text{Banda 5} + \text{Banda 4}}$$

Dónde:

NDVI: Índice de vegetación diferencial normalizado

Banda 5: Infrarrojo cercano

Banda 4: Rojo visible

3.3.2.3 Rango de clasificación

Tabla 3-3: Rango de clasificación para la cobertura vegetal del área de estudio en función del NDVI.

N°	NDVI	Cobertura y uso de suelo	Descripción
1	< -0,1	Clases no vegetales	Ríos, quebradas, lagunas, áreas anegadas y nubes.
2	-0,1 – 0,07	Tierra degradada	Tierras degradadas, asentamientos, infraestructura vial y suelos sin cobertura vegetal.
3	0,07 – 0,25	Vegetación dispersa	Matorral xerófilo, tierras cultivadas, pastizales, herbazales, arbustos dispersos, cultivos irrigados y tierras aradas por cultivar.
4	0,25 – 0,40	Vegetación abierta	Cultivo arbóreo, vegetación leñosa, plantación arbustiva, plantación de escasos crecimiento y bosque xerófilo.
5	> 0,40	Vegetación cerrada	Plantas densas en crecimiento, bosque húmedo siempre verde, algunas especies deciduas y semi-deciduas.

Fuente: Cartaya Ríos et al., 2015.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

3.4 Correlación entre la cobertura vegetal y el balance hídrico

3.4.1 Conformación de la base de datos

Se utilizarán los productos previamente obtenidos correspondientes a las imágenes ráster de los periodos de estudio: NDVI 2005, NDVI 2020, Balance hídrico 1990 – 2005 y Balance hídrico 2005 – 2020.

3.4.2 Cálculo del coeficiente de correlación de Pearson (r)

De acuerdo con (Adler y Parmryd 2010; citados en Guzmán Guaraca Adriana Catalina 2023, pág. 68), el coeficiente de correlación de Pearson (CPP) es una medida estadística que compara la dirección y fuerza de una asociación lineal entre dos variables aleatorias. El CPP varía entre 1 (correlación perfecta y -1 (correlación inversa), en tanto que los valores cercanos a 0 indican falta de relación entre las variables.

- La fórmula para calcular el coeficiente de correlación de Pearson con ayuda de la calculadora ráster del software QGIS 3.28.15:

$$r = \frac{\Sigma xy}{\sqrt{(\Sigma x^2)(\Sigma y^2)}}$$

Dónde:

r: Coeficiente de correlación de Pearson

x: Variable independiente, en este estudio NDVI

y: Variable dependiente, en este estudio Balance Hídrico

3.4.2.1 Escala cualitativa

Para facilitar el análisis se consideró transformar el coeficiente de correlación de Pearson (r), que originalmente es una variable cuantitativa, en una variable cualitativa:

Tabla 3-4: Escala cualitativa del coeficiente de correlación de Pearson (r).

N°	r	Escala cualitativa
1	-1,00 - -0,50	Correlación inversa fuerte
2	-0,50 - 0,00	Correlación inversa moderada
3	0,00 - 0,50	Correlación directa moderada
4	0,50 - 1,00	Correlación directa fuerte

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

3.5 Actividades de manejo sostenible

3.5.1 Conformación de la base de datos

Con la finalidad de identificar el de uso de suelo en la zona de influencia del volcán Igualata, se procedió a buscar los mapas de uso de suelo disponibles en el repositorio del MAATE. Donde se encontró el producto shp del territorio nacional correspondiente al año 2020 (Mapa Interactivo – MAATE, 2024).

Para proponer las actividades de manejo sostenible más adecuadas son necesarios: el mapa de uso de suelo del año 2020, las capas ráster correspondientes al balance hídrico promedio del periodo 1990 – 2020 y un modelo digital del terreno (MDT) para obtener la pendiente del área de estudio. El MDT fue obtenido de los recursos geográficos proporcionados por el Catálogo Nacional de Datos Geográficos.

3.5.2 Realización del mapa de uso de suelo

Para realizar el mapa de uso de suelo del volcán Igualata se dividió el proceso en dos partes:

1. Dado que la capa shp correspondientes a la cobertura vegetal contiene información de todo el Ecuador continental, es necesario recortar los archivos shp como se indica en la siguiente ilustración:

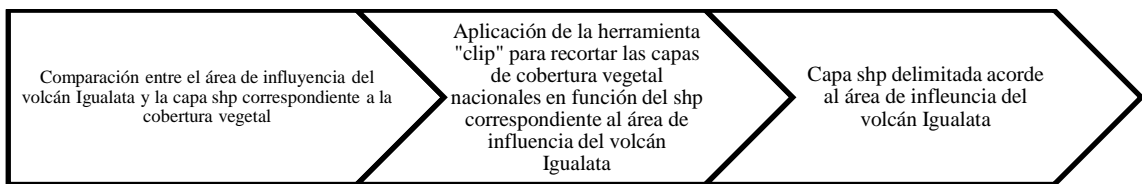


Ilustración 3-14: Proceso para recortar las capas shp de cobertura vegetal en función del área de influencia del volcán Igualata.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

2. Reclasificación de los campos correspondientes a la cobertura vegetal

Debido a que parte de la investigación pretende analizar el uso de suelo en el área de influencia del Igualata, es preciso generalizar el tipo de cobertura como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3-5: Criterio para reclasificar los campos correspondientes a la cobertura vegetal.

N°	Cobertura original de las capas	Reclasificación de la cobertura vegetal
1	Área poblada	Área poblada
2	Bosque nativo	Bosque
3	Plantación forestal	
4	Espejos de agua natural	Cuerpos de agua
5	Páramo	Páramo
6	Mosaico agropecuario	Tierras agropecuarias
7	Pastizal	
8	Vegetación herbácea	Vegetación natural
9	Vegetación arbustiva	

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

3.5.3 Realización del mapa de la pendiente

El primer paso es obtener el mapa de la pendiente del área de estudio para lo que se necesitará recurrir al siguiente proceso:

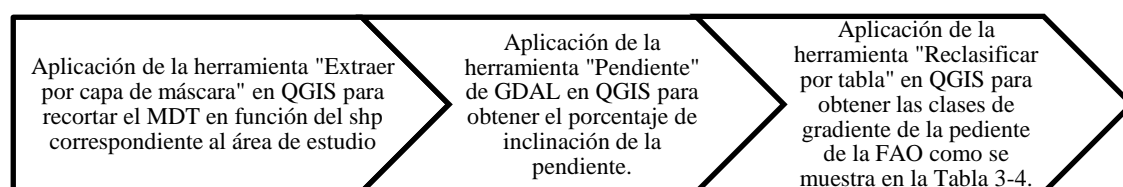


Ilustración 3-15: Proceso para obtener el mapa de la pendiente del volcán Igualata.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

Tabla 3-6: Criterio para reclasificar las clases de gradiente de la pendiente.

N°	Descripción	%
1	Plano	0 – 1
2	Muy ligeramente inclinado	1 – 2
3	Ligeramente inclinado	2 – 5
4	Inclinado	5 – 10
5	Fuertemente inclinado	10 – 15
6	Moderadamente escarpado	15 – 30
7	Escarpado	30 – 60
8	Muy escarpado	> 60

Fuente: FAO, 2009, pág. 12.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

3.5.4 Balance hídrico

El balance hídrico promedio 1990 – 2020 es de suma importancia puesto que la humedad de un lugar influye significativamente a la hora de sugerir una actividad de manejo sostenible. Se utilizará el balance hídrico cualitativo.

3.5.5 Propuesta de actividades de manejo sostenible

Debido a que el estudio pretende relacionar el balance hídrico con el uso de suelo para identificar las actividades de manejo sostenible más aptas, fue preciso buscar un compendio de actividades que tome en cuenta el recurso hídrico para el manejo de los diferentes usos de suelo. Es así que se optó por dos documentos, el primero: “Tecnologías y metodologías validadas para mejorar la seguridad alimentaria en las zonas secas de Honduras”, describe una serie de actividades de manejo sostenible, llamadas tecnologías, previamente utilizadas y reflejando buenos resultados en acciones de desarrollo rural («Tecnologías y metodologías validadas para mejorar la seguridad alimentaria en las zonas secas de Honduras», 2005)

Y el segundo “Sinergias entre Degradación de la Tierra y Cambio Climático en los Paisajes Agrarios del Ecuador”, contiene una serie de sinergias, que serán consideradas tecnologías, enfocadas a la utilización eficiente y conservación del agua y de la tierra (Segarra Galarza, 2014).

La información de ambos documentos fue recopilada y organizada en la siguiente tabla de acuerdo con el uso de suelo, humedad y pendiente.

Para esta tabla, la humedad será considerada como equivalente para el balance hídrico.

Tabla 3-7: Tecnologías sostenibles de acuerdo al uso de suelo, humedad y pendiente.

N°	Tecnología	Breve descripción	Uso de suelo	Humedad	Pendiente
1	No quema con manejo de rastrojos	Evitar el uso de fuego en terrenos cultivables	Páramo Tierras agropecuarias Vegetación natural	Baja Media Alta	Plano Inclinado Escarpado
2	Barreras muertas de piedras	Muros construidos con piedras de tamaños manejables	Tierras agropecuarias	Baja Media	Plano Inclinado (Recomendado) Escarpado (Recomendado)
3	Barreras muertas de rastrojos	Rastrojos acomodados en curvas de nivel para evitar el arrastre del suelo	Tierras agropecuarias	Baja Media Alta (pueden romperse las barreras)	Plano Inclinado
4	Cero labranza	No arar el terreno	Tierras agropecuarias	Baja Media Alta	Plano Inclinado
5	Cosecha de agua	Captación de agua lluvia	Bosque Páramo Tierras agropecuarias Vegetación natural	Baja Media Alta	Plano Inclinado Escarpado
6	Terrazas individuales	Pequeñas plataformas entre 1-2 m donde se	Tierras agropecuarias	Baja Media	Plano Inclinado

N°	Tecnología	Breve descripción	Uso de suelo	Humedad	Pendiente
		siembran cultivos perennes		Alta (Se recomienda un desagüe en cada terraza)	Escarpado (no aplicable en pendientes muy escarpadas)
7	Terrazas de banco	Una serie de terrazas continuas de forma escalonada en una ladera	Tierras agropecuarias	Baja Media Alta (no aplicable en suelos con mala infiltración)	Plano Inclinado Escarpado (aplicable sólo en pendientes moderadamente escarpadas)
8	Barreras vivas	Hileras de plantas permanentes, sembradas en función de las curvas de nivel	Cuerpos de agua Tierras agropecuarias	Baja Media Alta	Plano Inclinado Escarpado (no aplicable en pendientes muy escarpadas)
9	Cultivos en franjas	Árboles dispuestos en hileras y cultivos sembrados en los callejones que se forman entre hileras	Tierras agropecuarias	Baja Media Alta	Plano Inclinado Escarpado
10	Labranza mínima	Menor cantidad de labranza para que las semillas germinen	Tierras agropecuarias	Baja Media	Plano Inclinado
11	Zanjas de drenaje	Canales construidos en dirección transversal a la pendiente	Tierras agropecuarias	Alta	Escarpado
12	Diques de piedras	Muros de piedras de base ancha para retener la tierra erosionada y el agua	Tierras agropecuarias	Baja Media Alta	Inclinado Escarpado
13	Abonos verdes	Especies que cubran el suelo o incrementen su fertilidad	Tierras agropecuarias	Baja Media Alta	Plano Inclinado Escarpado
14	Sistemas silvopastoriles	Pastizales que poseen árboles, dentro y alrededor de ellos, arbustos forrajeros, leguminosas y pastos.	Tierras agropecuarias	Baja Media Alta	Plano Inclinado Escarpado
15	Reforestación	Restablecer la cobertura arbórea donde ha sido eliminada	Tierras agropecuarias Vegetación natural	Baja Media Alta	Plano Inclinado Escarpado
16	Forestación	Plantación masiva de árboles donde históricamente no hayan existido	Tierras agropecuarias Vegetación natural	Baja Media Alta	Plano Inclinado Escarpado
17	Restauración de la vegetación natural	Restablecer la cobertura vegetal natural donde ha sido eliminada	Tierras agropecuarias Vegetación natural	Baja Media Alta	Plano Inclinado Escarpado
18	Conservación	Mantenimiento y manejo sostenible de los recursos naturales	Bosque Cuerpos de agua Páramo Tierras agropecuarias Vegetación natural	Baja Media Alta	Plano Inclinado Escarpado

Fuente: FAO, 2005; Segarra Galarza, 2014, págs. 21-97.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

3.5.5.1 Mapa de tecnologías sostenibles de acuerdo al uso de suelo, humedad y pendiente.

Con el fin de representar espacialmente los sitios en los que cada una de las tecnologías sostenibles se pueden implementar, fue necesario el siguiente proceso:

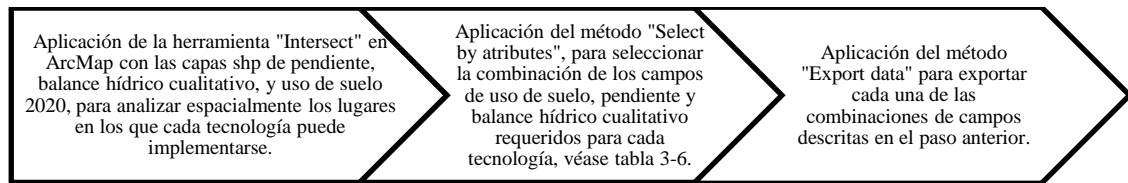


Ilustración 3-16: Proceso para obtener el mapa de la pendiente del volcán Igualata.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

CAPÍTULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

4.1 Procesamiento, análisis, interpretación de resultados y discusión

4.1.1 Estimación del balance hídrico climático (BHC) de Thornthwaite y Mather

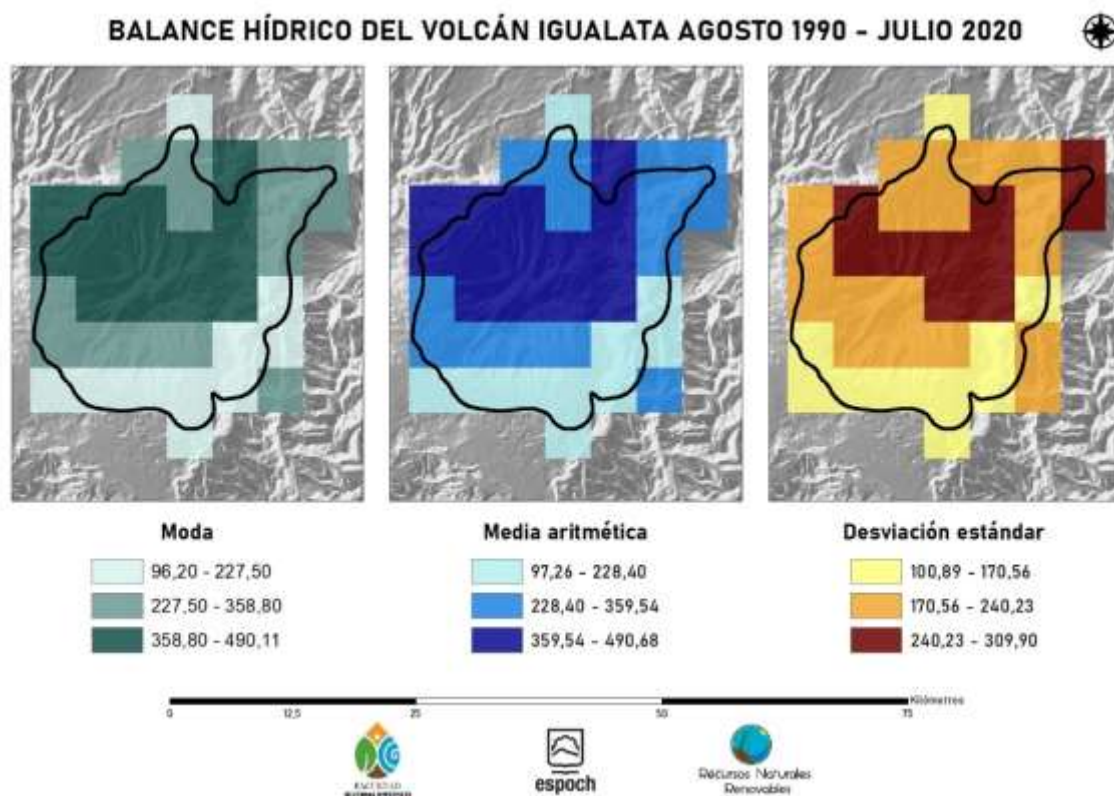


Ilustración 4-1: Mapa del promedio, la desviación estándar y la moda del balance hídrico del volcán Igualata agosto 1990 – julio 2020.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

- Media aritmética

Los datos de la ilustración 4-1 muestran que la cima del volcán, junto con el sector noroeste, albergan los valores más altos del balance hídrico comprendidos entre 359,54 y 490,68 mm de agua, en tanto que el sector norte contiene mayoritariamente valores medios comprendidos entre 228,40 y 359,54 mm.

La zona sur adyacente a la cima del Igualata, presenta valores medios de balance hídrico. En adición, el sector ubicado más al sur del volcán presenta los valores más bajos comprendidos entre 90 y 228,40 mm, por lo que es preciso concluir que se trata de la zona más seca en el área de estudio.

Por último, el sector este del área de estudio alberga valores bajos y medios. De acuerdo con el promedio, este sería el comportamiento más representativo del balance hídrico climático para el volcán Igualata.

- Moda

La moda del balance hídrico para el Igualata muestra que el comportamiento de la media aritmética sí es representativo para las zonas previamente descritas.

- Desviación estándar

Los valores de la ilustración 4-1 exhiben que la cara este, noreste y noroeste de la cima del volcán poseen una alta variabilidad comprendida entre 240,23 y 309,90 mm.

Por su parte, la cara suroeste de la cima presenta una variabilidad media comprendida entre 170,56 y 240,23 mm, este comportamiento también se evidencia en el sector norte y la mayoría del sector noreste del área de estudio.

Finalmente, el sector sur del área de estudio presenta la menor variabilidad comprendida entre 100,89 y 170,56 mm de agua, esto indica que la zona sur ha sido la más seca durante todo el periodo de estudio.

4.1.1.1 Comparación del balance hídrico mensual del volcán Igualata entre los periodos 1990 – 2005 y 2005 – 2020

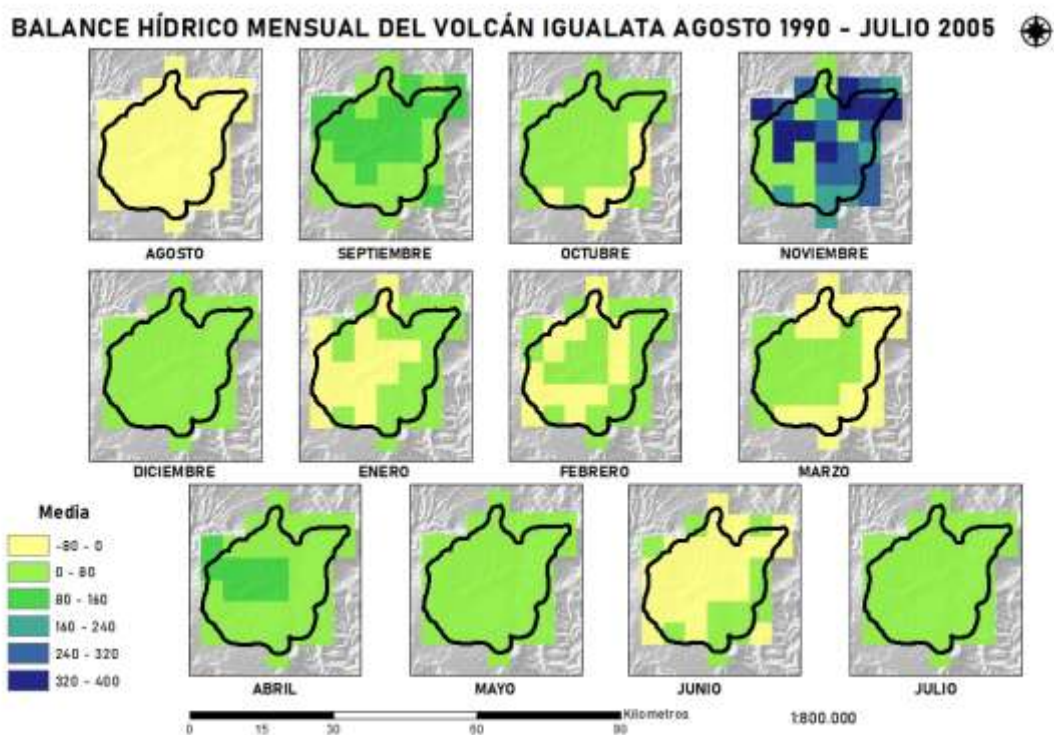


Ilustración 4-2: Balance hídrico mensual del volcán Igualata agosto 1990 – julio 2020.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

El balance hídrico del primer periodo de estudio muestra un marcado exceso hídrico en 7 meses: septiembre, octubre, noviembre, diciembre, abril, mayo y julio. Todos estos meses poseen un exceso comprendido entre 0 y 160 mm de agua, a excepción de noviembre que sin lugar a dudas es el mes con mayor humedad puesto que alcanza un exceso de hasta 400 mm. De acuerdo con (Santillán-Fernández et al., 2019, pág. 4) los meses en los que la precipitación supera a la evapotranspiración poseen exceso hídrico y brindan una amplia disponibilidad de agua para la vegetación.

Por otra parte, los meses de agosto, enero, febrero, marzo y junio presentan un déficit hídrico de hasta 80 mm de agua. De acuerdo con (Loor Berrazueta, 2017, pág. 82), el déficit hídrico representa un periodo de tiempo en el que las reservas de agua en el suelo y las precipitaciones son insuficientes para cumplir con los requisitos de la evapotranspiración.

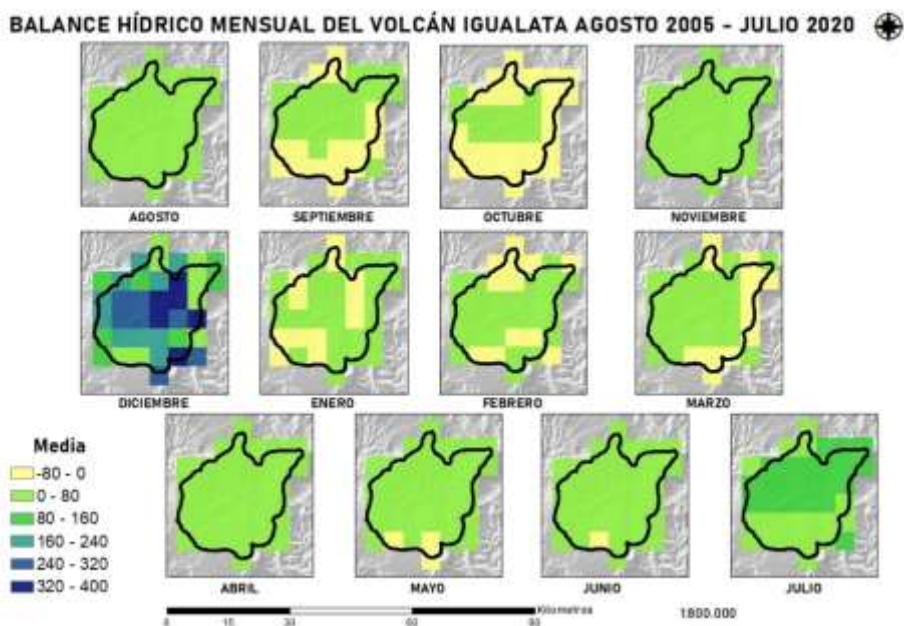


Ilustración 4-3: Balance hídrico mensual del volcán Igualata agosto 1990 – julio 2020.
Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

El balance hídrico del segundo periodo de estudio presenta exceso hídrico en 7 meses: agosto, noviembre, diciembre, abril, mayo, junio y julio. El exceso hídrico en estos meses llega hasta los 160 mm de agua, excepto diciembre que alcanza un exceso de 400 mm y por lo tanto es el mes más húmedo.

Por añadidura, el déficit hídrico es evidente en los meses de septiembre, octubre, enero, febrero y marzo. No obstante, la cima del volcán no presentó déficit en ningún mes del segundo periodo de estudio.

- Análisis comparativo del balance hídrico mensual del volcán Igualata entre los periodos 1990 – 2005 y 2005 – 2020

Primeramente, la estimación del balance hídrico demuestra los meses del año en los que el Igualata presenta déficit hídrico y los meses en los que existe mayor disponibilidad de agua. Estas estimaciones permiten conocer la cantidad de recurso hídrico que las comunidades pueden aprovechar y el lapso en el que pueden hacerlo. Así lo menciona (Loor Berrazueta, 2017, pág. 92) en un estudio similar.

Ambos periodos de estudio coinciden en que los meses de enero, febrero y marzo siempre presentan déficit hídrico. En tanto que septiembre y octubre pasaron de tener exceso a mostrar déficit hídrico, ocurre lo contrario en el caso de agosto.

Finalmente, es válido enunciar que los datos de balance hídrico obtenidos en esta investigación sí son confiables, esto de acuerdo (Loor Berrazueta, 2017, págs. 84-85) que compara los datos de un balance hídrico realizado con SIG con un balance hídrico realizado empíricamente, la comparación mostró que la variabilidad no presume ser alta.

4.1.1.2 Comparación de la media aritmética del balance hídrico del volcán Igualata entre los periodos 1990 – 2005 y 2005 – 2020

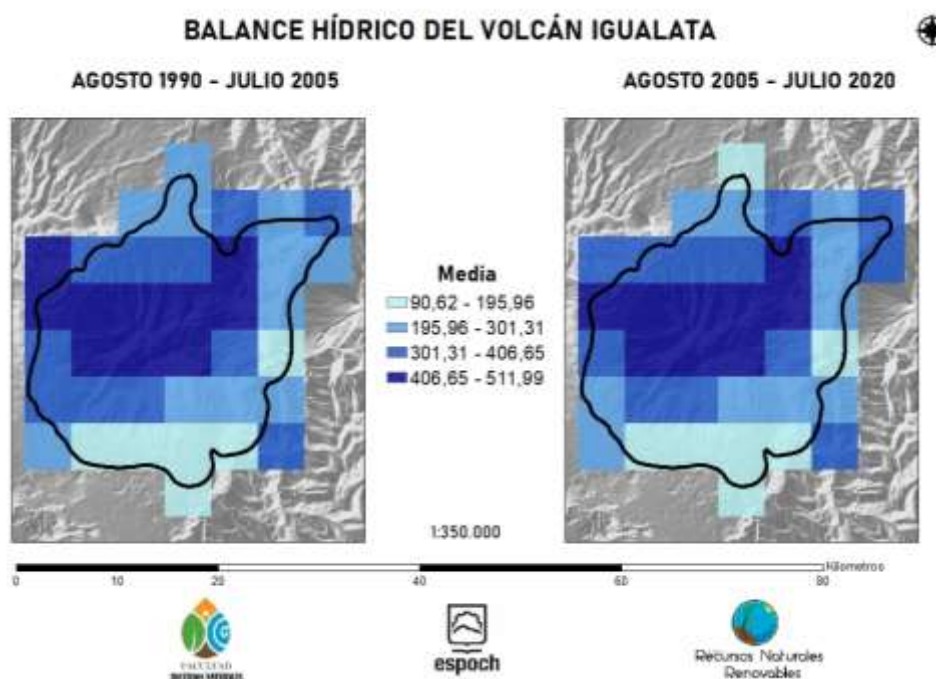


Ilustración 4-4: Mapa comparativo de la media entre los periodos de estudio agosto 1990 – julio 2020 y 2006 – 2020.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

De acuerdo con la media del balance hídrico, es claro que los valores más altos de balance hídrico, entre 406,65 y 511,99 mm, se encuentran sobre la cima del volcán expandiéndose hacia el noreste y el noroeste.

Asimismo, es evidente que la zona más seca del lugar, con valores entre 90,62 y 195,96 mm, se encuentra al sur del área de estudio. También existen valores bajos de balance hídrico en la zona este y en el extremo norte del área de estudio, cuando en el primer periodo de estudio el extremo norte no presentaba estas condiciones. El resto del área de estudio posee valores medios de balance hídrico comprendidos entre 195,96 y 406,65 mm.

Los valores altos de balance hídrico presentes en la cima del volcán se deben al efecto orográfico, que de acuerdo con (Universidad de Murcia y Universidad Politécnica de Cartagena, 2020, pág. 5), es el ascenso

de las masas de aire húmedas hacia los relieves montañosos, es entonces que las masas de aire entran en capas más frías de la atmósfera, y, por tanto, la humedad se condensa y ocurren las precipitaciones. Además, (Palenque y Palacios Estremera 2008, pág. 35) mencionan que el clima de los Andes obedece al efecto orográfico producido por la cordillera.

4.1.1.3 Comparación de la moda del balance hídrico del volcán Igualata entre los periodos 1990 – 2005 y 2005 – 2020

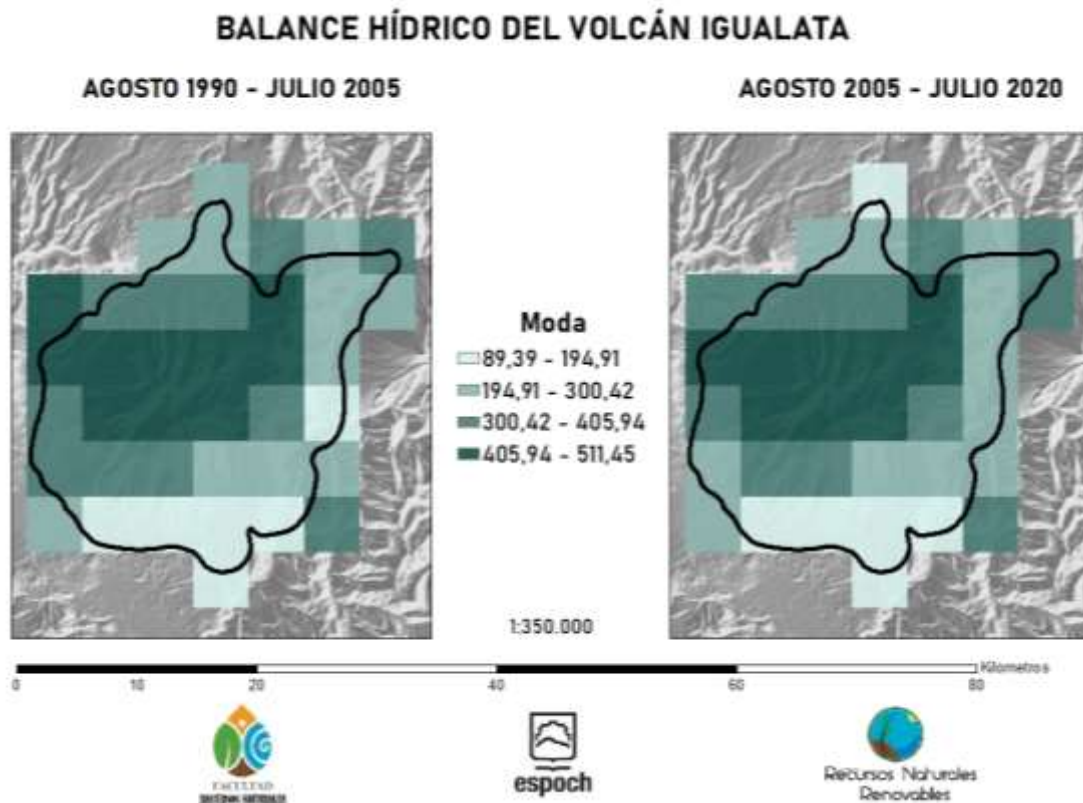


Ilustración 4-5: Mapa comparativo de la moda entre los periodos de estudio agosto 1990 – julio 2005 y agosto 2005 – julio 2020.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

El mapa de la moda del balance hídrico apoya en gran medida lo descrito con respecto a la media aritmética, con excepción del extremo este que cambió de ser una zona seca, a tener un balance hídrico más alto en el según periodo de estudio. Así también ocurre con el extremo suroeste que incremento su balance hídrico, aunque no a los valores más altos sobre los 405,94 mm.

4.1.1.4 Comparación de la desviación estándar del balance hídrico del volcán Igualata entre los periodos 1990 – 2005 y 2005 – 2020

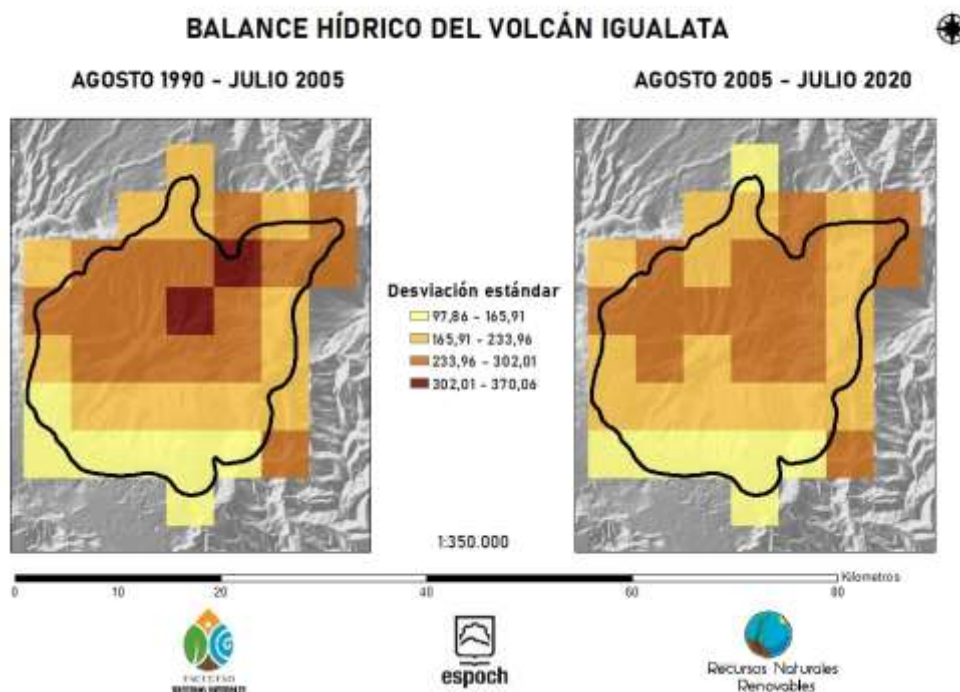


Ilustración 4-6: Mapa comparativo de la moda entre los periodos de estudio 1990 – 2005 y 2005 – 2020.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

De acuerdo con la ilustración 4-6, la más alta variabilidad, entre 302,01 y 370,06 mm, está presente solamente en el primer periodo de estudio, en la zona noreste de la cima del volcán. Además, la zona sur del área de estudio muestra la variabilidad más baja, comprendida entre 97,86 y 165,91 mm, para ambos periodos de estudio.

Los valores medios, entre 233,96 y 302,01 mm, se encuentran distribuidos en la cima para el primer periodo de estudio, en tanto que, para el segundo, estos valores no cubren la cara sur de la cima y el sector norte de las laderas del volcán. Los valores medios, entre 165,91 y 233,96 mm, para ambos periodos de estudio se distribuyen alrededor de la cima del volcán y en sus laderas. Finalmente, es preciso decir que la cima del Igualata posee la mayor variabilidad de balance hídrico y que la variabilidad se redujo considerablemente para el segundo periodo de estudio.

4.1.2 *Índice de vegetación diferencial normalizado*

4.1.2.1 Comparación del índice de vegetación diferencial normalizado del volcán Igualata entre los periodos 1990 – 2005 y 2005 – 2020

NDVI DEL VOLCÁN IGUALATA

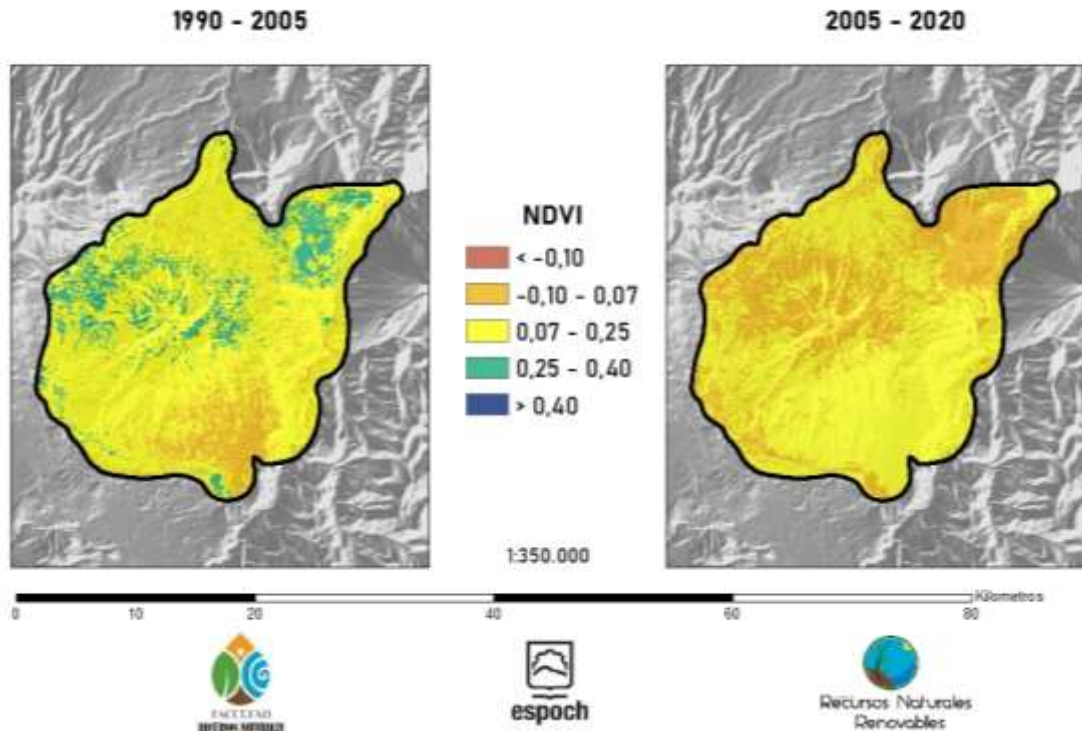


Ilustración 4-7: Mapa comparativo del NDVI entre el periodo de estudio 1990 – 2005 y 2005 – 2020.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

Los valores del NDVI para el primer periodo de estudio reflejan tres tipos de cobertura vegetal bien diferenciados de acuerdo con (Cartaya Ríos et al., 2015, pág. 89). En primer lugar, es evidente la presencia de tierras degradadas representadas por el color naranja oscuro (NDVI: $-0,1 - 0,07$) en toda el área de estudio, sin embargo, hay una notoria concentración de esta cobertura en la zona sur con tendencia sureste en el área de estudio.

Por otra parte, la cobertura vegetal más extendida durante el primer periodo de estudio es la vegetación dispersa representada por color naranja claro (NDVI: $0,07 - 0,25$), esta cobertura es evidente en toda el área de estudio. No obstante, en la zona sur predomina la tierra degradada, mientras que en el noreste y en las zonas adyacentes a la cima con tendencia al oeste hay una clara concentración de vegetación abierta representada por el color verde (NDVI: $0,25 - 0,40$).

Para el segundo periodo de estudio, de acuerdo con los valores del NDVI, existen únicamente dos tipos de cobertura vegetal de acuerdo con la tabla 3-3. Es así como las tierras degradadas han

pasado a predominar sobre los lugares en los que, durante el primer periodo de estudio, había una extensa concentración de vegetación abierta.

Además, es importante resaltar que la vegetación dispersa sigue siendo la cobertura más extendida sobre el volcán durante el segundo periodo de estudio. Empero, la mayor proporción de zonas que mantenían tierras degradadas durante el primer periodo de estudio ahora presenta vegetación dispersa para el segundo periodo.

Al final, y de acuerdo con (Cartaya Ríos et al., 2015, pág. 89), el crecimiento de las actividades agropecuarias incide significativamente en el reemplazo de la vegetación nativa. Las malas prácticas agrícolas conducen a la degradación del suelo y de la salud de la cobertura vegetal, por lo que podría ser una explicación para la reducción del NDVI entre el primer y segundo periodo de estudio.

4.1.3 *Correlación entre el balance hídrico y la cobertura vegetal*

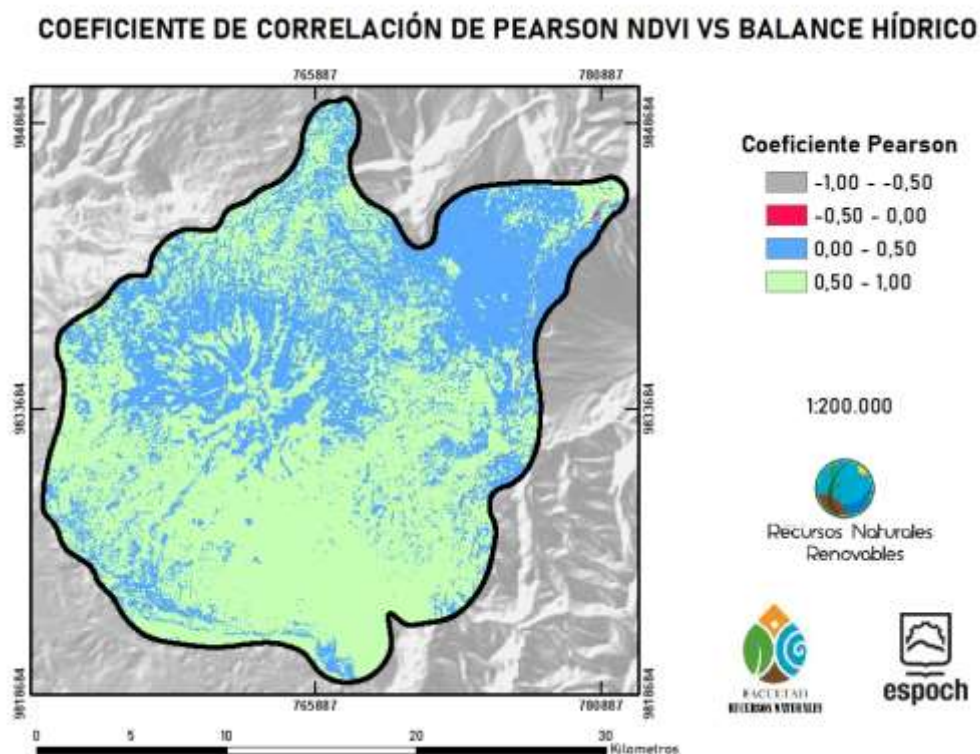


Ilustración 4-8: Coeficiente de correlación de Pearson NDVI vs Balance hídrico.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

Resulta imprescindible mencionar que el coeficiente de correlación de Pearson permite conocer en qué zonas del área de estudio la cobertura vegetal incide sobre el balance hídrico del área de estudio.

Primero, cabe destacar que es infructuoso analizar los datos que indican una correlación inversa, puesto que corresponden a zonas cubiertas por el río Chambo que delimita el área de estudio en el este.

Cabe destacar que se utilizará la escala cualitativa del coeficiente de correlación de Pearson sugerida en la tabla 3-4 para analizar los resultados.

La correlación directa moderada representada por el color azul se distribuye prolijamente por toda el área de estudio con una marcada concentración al norte y noreste. En la cima ocurre un fenómeno particular y es que existe una presencia uniforme de valores que indican una correlación directa moderada y una correlación directa fuerte.

En otras palabras, una correlación moderada indica que los cambios (aumento o disminución) en la cobertura vegetal están asociados con cambios en el balance hídrico (aumento o disminución). Sin embargo, hay dispersión entre los datos dado que la correlación no es lo suficientemente fuerte.

Los datos que muestran una correlación directa fuerte se encuentran distribuidos por toda el área de estudio con una mayor concentración al sur y una moderada concentración al norte. En estas zonas hay una relación lineal consistente entre las variables, por lo que, los cambios en la cobertura vegetal (aumento o disminución) están altamente asociados con los cambios en el balance hídrico (aumento o disminución). Es decir, si la cobertura vegetal aumenta, en las zonas previamente señaladas, lo más probable es que el balance hídrico también aumente.

De acuerdo con (Poma-Copa y Usca-Tiuquina, 2020, pág. 15), el exceso de agua es afectado por el cambio de uso de suelo y los cambios en la cobertura vegetal, ya que la cubierta vegetal incide en la humedad del suelo mediante la intercepción de la transpiración. Tomando en cuenta que la mayoría del área de estudio evidencia una correlación directa entre las dos variables, es válido inferir que la cobertura vegetal sí incide significativamente en el balance hídrico del volcán Igualata durante el periodo 1990-2020.

4.1.4 Actividades de manejo sostenible

4.1.4.1 Uso de suelo

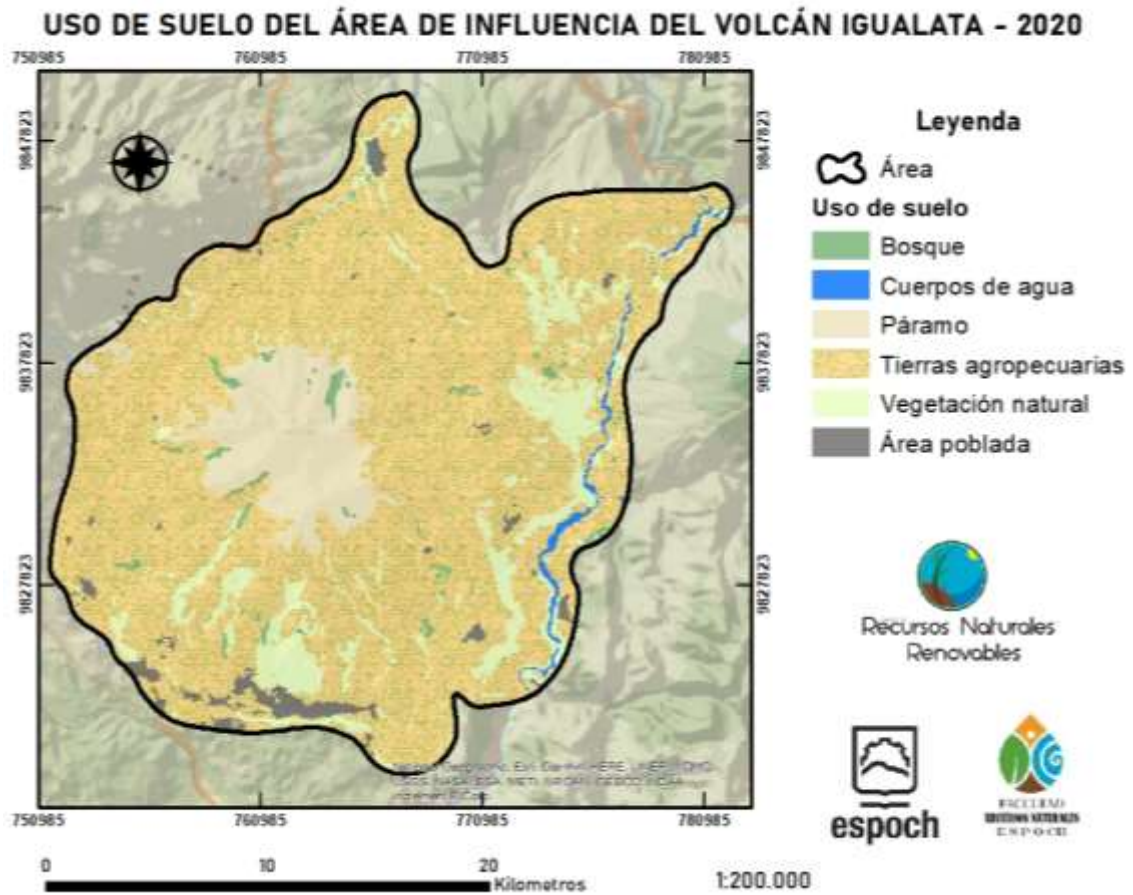


Ilustración 4-9: Mapa de uso de suelo del área de influencia del volcán Igualata 2020.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

El uso de suelo se distribuye de la siguiente manera: el área poblada tiene 1213,00 ha, los bosques poseen 740,83 ha, los cuerpos de agua con 440,01 ha, el páramo pasó tiene 4980,68 ha, las tierras agropecuarias poseen 42517,45 ha, en tanto que la vegetación natural tiene 5765,61 ha.

4.1.4.2 Pendiente

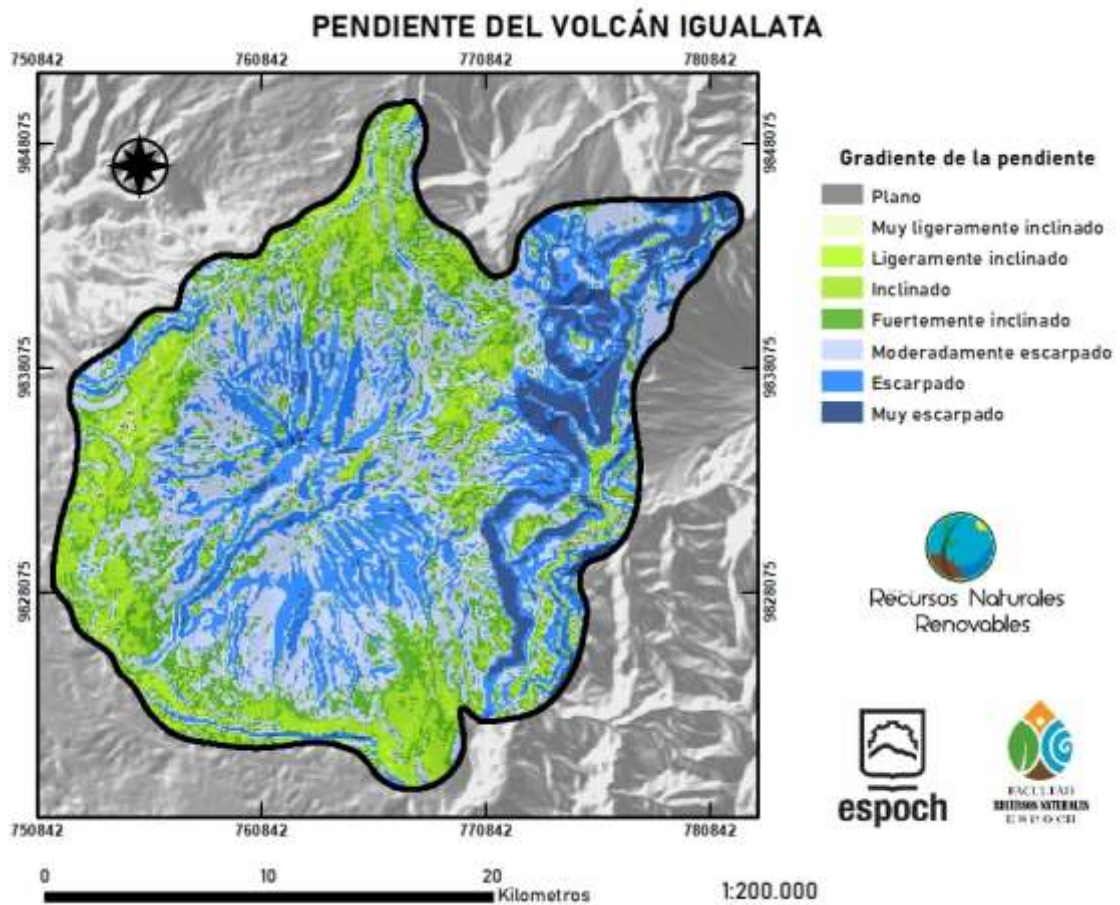


Ilustración 4-10: Mapa de la pendiente del volcán Igualata.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

Cabe resaltar que la pendiente es un factor de suma importancia en el desarrollo de la propuesta de actividades de manejo sostenible.

4.1.4.3 Actividades de manejo sostenible

En la siguiente tabla se muestra una descripción general de las tecnologías (actividades de manejo sostenible), para facilitar la elección de la tecnología más adecuada en función de la necesidad de cada terreno.

Tabla 4-1: Propuesta de actividades de manejo sostenible para los diferentes usos de suelo en el volcán Igualata en el periodo 1990 – 2020.

N°	Tecnología	Descripción	Requisitos	Resultados
1	No quema con manejo de rastrojos	Consiste en esparcir sobre la parcela más de la mitad de los residuos (cortados o picados) juntados durante el desarrollo y la cosecha de un cultivo.	-Rastrojos -Picadora o machete	-Reducción de la erosión -Aumento y conservación de la humedad -Mejora la fertilidad y estructura del suelo -Control de malezas -Protección contra el viento
2	Barreras muertas de piedras	Consiste en muros construidos en las curvas de nivel del terreno, con piedras de tamaños manejables. En las laderas deben construirse sobre bases aplanadas y no superar los 60cm de altura. Si existe la presencia de ganado los muros no deben superar los 25m de largo y deben tener “pasos” entre ellos para la libre circulación del ganado.	-Nivel -Piedras en el terreno -Pala -Pico	-Reducción de la erosión -Aumento y conservación de la humedad -Mejora la fertilidad y estructura del suelo
3	Barreras muertas de rastrojos	Consiste en acomodar los residuos juntados durante el desarrollo y la cosecha de un cultivo sobre las curvas de nivel del terreno.	-Rastrojos -Nivel -Ausencia de ganado	-Reducción de la erosión -Reducción de la escorrentía -Mejora la infiltración -Aumento y conservación de la humedad -Mejora la fertilidad y estructura del suelo
4	Cero labranza	Consiste en sembrar directamente (plantío directo) sin arar el terreno.	-Aplicar previamente la tecnología N° 1	-Reducción de la erosión -Mejora la infiltración -Aumento y conservación de la humedad -Mejora la fertilidad y estructura del suelo
5	Cosecha de agua	Consiste en recolectar el agua proveniente de las precipitaciones en una de las siguientes maneras: -Captación de agua techo: Uso de canales en los techos para dirigir el agua a estructuras de almacenamiento -Micro presas: Construir represas en quebradas o ríos -Pozos de captación	Los requisitos dependerán del método a utilizarse	-Disponibilidad de agua
6	Terrazas individuales	Consiste en la construcción de plataformas redondas o cuadradas de hasta 2m de diámetro, en el centro se siembran árboles o cultivos perennes. Se realizan “cortando el terreno” rellenándolas de un material compacto. Deben tener una leve inclinación contra la pendiente y es recomendable una terraza en cada curva de nivel.	-Cinta métrica -Nivel -Pala -Pico -Azadón	-Reducción de la erosión -Aumento y conservación de la humedad -Maximiza el rendimiento de abonos para árboles
7	Terrazas de banco	Consiste en una serie de plataformas construidas al mismo nivel (curvas de nivel)	-Cinta métrica -Nivel -Pala	-Reducción de la erosión

N°	Tecnología	Descripción	Requisitos	Resultados
		para hacer una ladera cultivable, las medidas dependen de la pendiente y el tipo de suelo.	-Pico -Azadón	-Reducción de la escorrentía -Mejora la infiltración
8	Barreras vivas	Consiste en hileras de plantas permanentes con crecimiento denso, resistentes a la escorrentía y a la sequía. Se siembran en cada curva de nivel.	-Pico -Azadón	Los beneficios obtenidos dependerán de las plantas seleccionadas
9	Cultivos en franjas	Consiste en el establecimiento de hileras paralelas de árboles y cultivos sembrados en las franjas entre hileras. Los árboles deben podarse constantemente para facilitar el paso de la luz solar hacia los cultivos.	-Machetes o podadoras -Azadón	-Reducción de la erosión -Protección contra el viento -Mejora la fertilidad y estructura del suelo -Obtención de leña -Disminución de plagas
10	Labranza mínima	Consiste en arar mínimamente el terreno, pero lo suficiente como para que las semillas puedan germinar	-Nivel -Arado -Azadón	-Reducción de la erosión -Mejora la infiltración -Disminución de enfermedades
11	Zanjas de drenaje	Consiste en canales trapezoidales construidos en dirección transversal a la pendiente, a desnivel y a los bordes de la parcela	-Nivel -Pala -Pico -Azadón -Estacas	-Reducción de la erosión -Aumento y conservación de la humedad
12	Diques de piedras	Consiste en muros de piedras con base ancha, con el objetivo de retener el agua y la tierra erosionada con vertederas y delantales. Se deben construir en media luna y perpendicularmente a la cárcava.	-Cinta métrica -Pico -Azadón -Piedras de base ancha	-Control de las cárcavas -Reducción de la escorrentía -Mejora la infiltración -Formación de terrazas a largo plazo aptas para sembrar
13	Abonos verdes	Consiste en sembrar cultivos de cobertura y cortarlos en época de floración, los residuos se dejan en el terreno para aprovechar los nutrientes que poseen.	-Arado -Azadón -Pico	-Reducción de la erosión -Mejora la fertilidad y estructura del suelo -Reciclaje de nutrientes -Aumento y conservación de la humedad -Maximiza el rendimiento de abonos -Reducción de la necesidad de labranza -Mejora la capacidad de almacenamiento de agua -Disminución de plagas y enfermedades
14	Sistemas silvopastoriles	Consiste en un sistema donde se plantan arbustos forrajeros, árboles, leguminosas y	-Arado -Azadón	-Reducción de la erosión

N°	Tecnología	Descripción	Requisitos	Resultados
		pastos mejorados en un pastizal ganadero y alrededor del mismo.	-Pico -Taladro de plantación	-Aumento y conservación de la humedad -Mejora la fertilidad y estructura del suelo -Control de malezas -Protección contra el viento -Disminución de plagas y enfermedades -Reciclaje de nutrientes
15	Reforestación	Consiste en volver a plantar árboles en lugares donde la cobertura arbórea ha sido eliminada.		-Reducción de la erosión -Aumento y conservación de la humedad -Mejora la fertilidad y estructura del suelo -Protección contra el viento -Disminución de plagas y enfermedades
16	Forestación	Consiste en plantar árboles masivamente en lugares donde históricamente no ha existido cobertura arbórea.	-Azadón -Pico -Taladro de plantación	-Reducción de la erosión -Aumento y conservación de la humedad -Mejora la fertilidad y estructura del suelo -Protección contra el viento -Disminución de plagas y enfermedades
17	Restauración de la vegetación natural	Consiste en repoblar áreas que han sufrido disturbios (antrópicos o naturales) con especies vegetales nativas.	-Arado -Azadón -Pico -Taladro de plantación	-Contrarresta la degradación del suelo
18	Conservación	Consiste en el mantenimiento de los recursos naturales sin perder el equilibrio ecológico. Existen varias técnicas de conservación.	Los requisitos dependerán de las técnicas a utilizarse	Los beneficios obtenidos dependerán de las técnicas seleccionadas

Fuente: FAO, 2005; Segarra Galarza, 2014.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

TECNOLOGÍAS SOSTENIBLES DE ACUERDO AL USO DE SUELO, HUMEDAD Y PENDIENTE

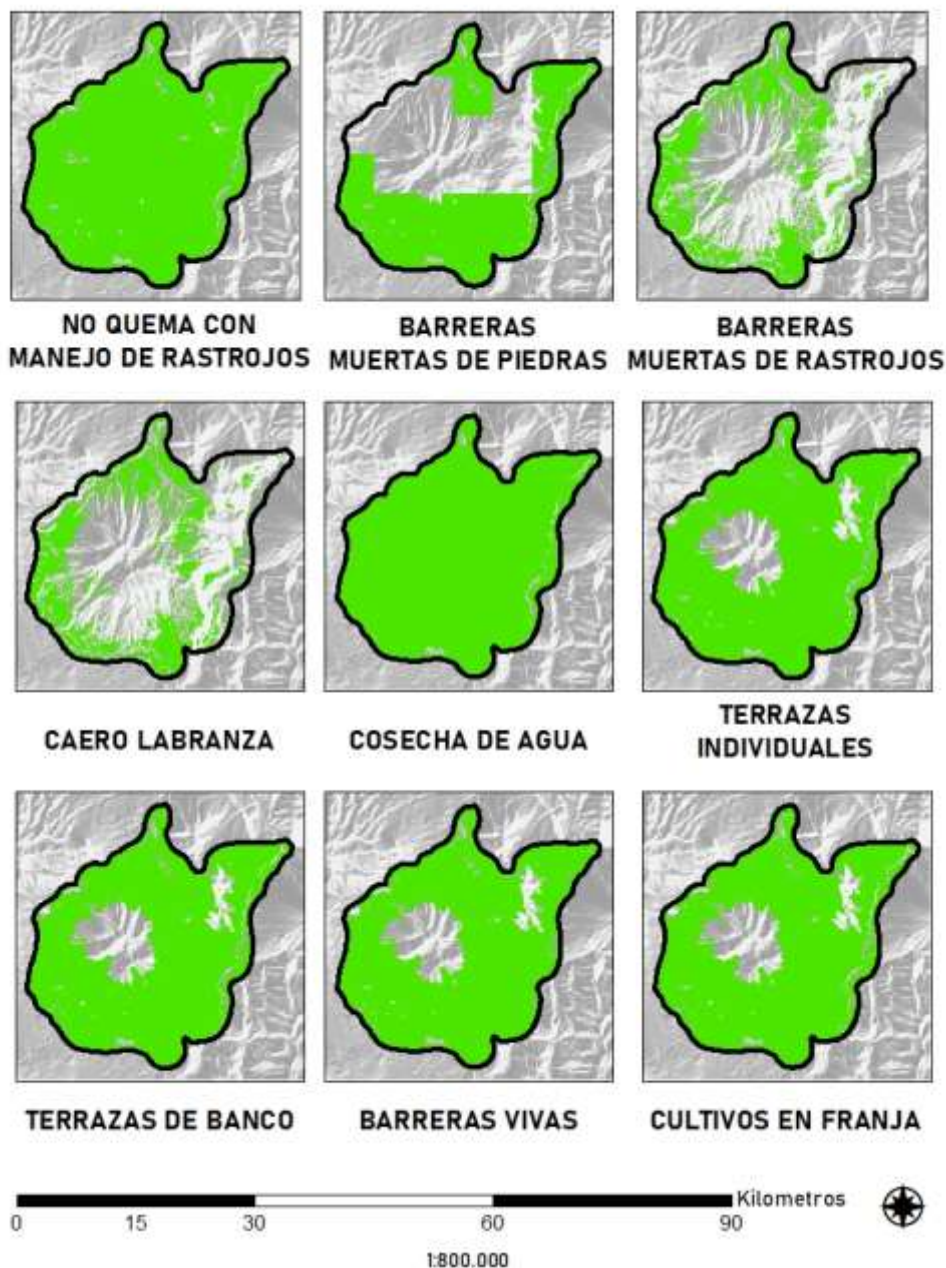


Ilustración 4-11: Mapa de tecnologías sostenibles de acuerdo al uso de suelo, humedad y pendiente 1.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

No quema con manejo de rastrojos: Esta tecnología es aplicable en toda el área de estudio. De acuerdo con (Ruiz, pág. 105), la no quema con manejo de rastrojos mejora la sostenibilidad agrícola, beneficia mucho la rotación de cultivos, mejora la infiltración del suelo, aumenta la microfauna del suelo, retarda la germinación de malezas, disminuye la erosión e incrementa la retención de humedad.

Barreras muertas de piedras: Esta tecnología es aplicable en la zona sur, este y en el extremo norte. (Pitayo Verde, 2021) manifiestan que el principal beneficio de esta actividad es mejorar la humedad del suelo a la par que incrementan su fertilidad puesto que las barreras captan los sedimentos que van en el agua de escurrimiento, a largo plazo resultan en la formación paulatina de terrazas.

Barreras muertas de rastrojos: Esta tecnología es aplicable en las zonas aledañas a la cima del volcán, exceptuando el extremo este. De acuerdo con (Pitayo Verde, 2021), estas barreras cumplen la misma función de la tecnología anterior, con la diferencia de que los rastrojos pasan a incorporarse al suelo una vez que se descomponen.

Cero labranza: Esta tecnología es aplicable en las zonas aledañas a la cima del volcán, exceptuando el extremo este. (Acevedo y Silva, 2003, pág. 34) enuncian que la cero labranza evita la erosión y contribuye a almacenar carbono en el suelo, mejorando sus propiedades. Cuando un suelo pasa de la labranza tradicional a la cero labranza, tiene lugar un largo periodo de transición en el que se desarrollan condiciones agronómicas más favorables.

Cosecha de agua: Esta tecnología es aplicable en toda el área de estudio. De acuerdo con (Hirozumi 2015, pág.), la principal ventaja es que, en épocas de sequía, los agricultores tienen disponibilidad de agua.

Terrazas individuales: Esta tecnología es aplicable en toda el área de estudio, excepto la cima del volcán y un sector ubicado al noreste. Por su parte, (Climaco Machorro, Bello Colorado y Herrera Rivera Jocelyn [sin fecha]) plantean que estas terrazas protegen al suelo de una erosión muy rápida y aumentan la humedad del suelo, no obstante, las terrazas requieren un mantenimiento constante a fin de evitar deslizamientos de tierra.

Terrazas de banco: Esta tecnología es aplicable en toda el área de estudio, excepto la cima del volcán y un sector ubicado al noreste. Estas terrazas ayudan a mejorar la humedad del suelo mientras reduce la velocidad de escurrimiento y facilitan las labores de cultivo y plantación (Terrazas de banco, pág. 2).

Barreras vivas: Esta tecnología es aplicable en toda el área de estudio, excepto la cima del volcán y un sector ubicado al noreste. De acuerdo con (Cubero Fernández & Elizondo Alvarado, 2005), las barreras vivas contribuyen a la recuperación de suelos degradados y a largo plazo permiten la formación de terrazas progresivas.

Cultivos en franja: Esta tecnología es aplicable en toda el área de estudio, excepto la cima del volcán y un sector ubicado al noreste. Es necesario utilizar coberturas tanto vías como muertas ya que la cobertura ya que esta combinación reduce el efecto de la radiación solar en el suelo, esto contribuye a la conservación de humedad e incluso se pueden controlar mejor las malezas (Ortíz Ramírez et al., 2006, pág. 9).

TECNOLOGÍAS SOSTENIBLES DE ACUERDO AL USO DE SUELO, HUMEDAD Y PENDIENTE

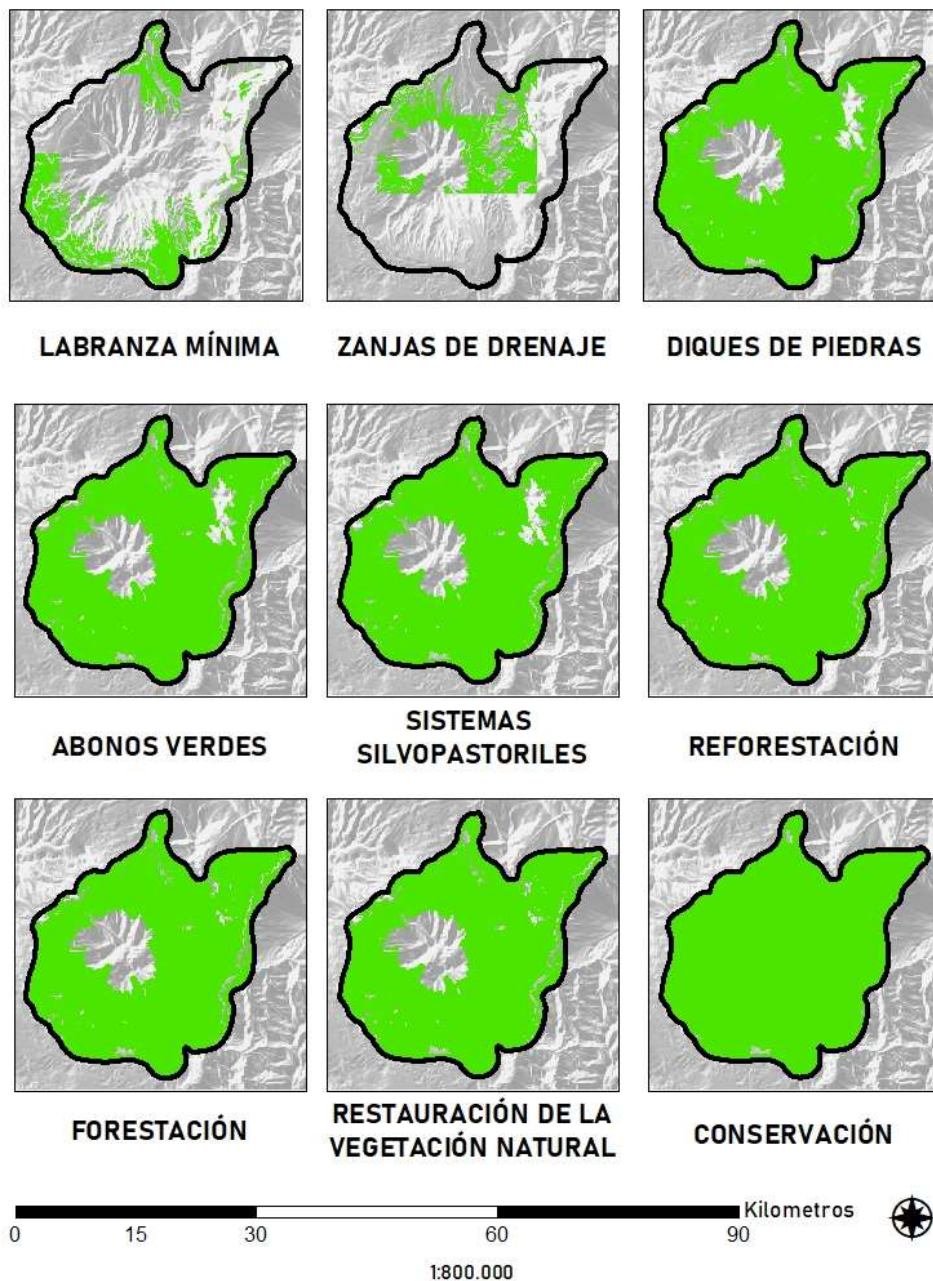


Ilustración 4-12: Mapa de tecnologías sostenibles de acuerdo al uso de suelo, humedad y pendiente 2.

Realizado por: Guamaní Hidalgo, Ronald, 2023.

Labranza mínima: Esta tecnología es aplicable en zonas cercanas al perímetro que delimita el área de estudio, a excepción de los sectores noreste y noroeste. La labranza mínima consiste en realizar una siembra directa en los residuos del cultivo anterior, así se conserva más humedad y se reduce la erosión del suelo (Rodríguez González et al. 2015, pág. 57). Cabe recalcar que esta tecnología no se recomienda aplicar en pendientes inclinadas.

Zanjas de drenaje: Esta tecnología es aplicable en los alrededores de la cima del volcán con mayor concentración al noreste, al sur no es recomendable. Las zanjas de drenaje ayudan a dirigir la escorrentía y es muy útil para proteger los cultivos en pendientes inclinadas y ligeramente escarpadas (Riesco Chueca 2007, pág. 28).

Diques de piedras: Esta tecnología es aplicable en toda el área de estudio exceptuando la cima del volcán, así como un sector al noreste. Los diques reducen el desgaste por la escorrentía en las quebradas, estabilizan las pendientes y a largo plazo las quebradas podrían llegar a ser terrenos cultivables (Pizarro et al. 2003, pág. 4).

Abonos verdes: Esta tecnología es aplicable en toda el área de estudio exceptuando la cima del volcán, así como un sector al noreste. Los abonos verdes aportan dos grandes beneficios para el suelo: la fijación de nitrógeno atmosférico y el incremento de materia orgánica en el suelo (Zavala Sierra et al. 2018, pág. 4324).

Sistemas silvopastoriles: Esta tecnología es aplicable en toda el área de estudio exceptuando la cima del volcán, así como un sector al noreste. Los sistemas silvopastoriles tienen entre sus ventajas: aumento de la producción de forraje e incremento en su valor nutricional, mayor retención de humedad y una mayor protección del suelo («Establecimiento y uso de sistemas silvopastoriles en República Dominicana, 2016, pág. 19).

Reforestación: Esta tecnología es aplicable en toda el área de estudio con excepción de la cima del Igualata. De acuerdo con (Molina Pereira, 2019, pág. 184), la reforestación ayuda a mantener un ambiente sano cuidando el agua, suelo y aire. Es recomendable aplicar esta tecnología en áreas cercanas a cuencas existentes.

Forestación: Esta tecnología es aplicable en toda el área de estudio con excepción de la cima del Igualata. La forestación contribuye con la conservación y recuperación ambiental, el mayor beneficio que otorga esta actividad de manejo sostenible es el aumento en la producción de oxígeno y la disminución de temperaturas en las áreas a aplicarse (Molina Pereira, 2019, pág. 192).

Restauración de la vegetación natural: Esta tecnología es aplicable en toda el área de estudio con excepción de la cima del Igualata. La restauración de la vegetación natural es crucial en el Igualata, puesto que en la cima existe una cobertura vegetal de páramo que se ha visto disminuida con el paso del tiempo, resulta imprescindible recuperar esta cobertura vegetal para mantener el área de estudio como una importante zona de recarga hídrica.

Conservación: Esta tecnología es aplicable en toda el área de estudio. Las actividades de conservación son las 17 tecnologías previamente descritas.

Finalmente, es importante mencionar que se pueden aplicar más de una tecnología a la vez, puesto que todas están enfocadas en el manejo sostenible del recurso suelo. Inclusive hay tecnologías que al combinarse se potencian y esto resulta en mayores beneficios para el suelo.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Mediante la aplicación del balance hídrico climático de Thornthwaite y Mather en el área de estudio, fue posible obtener una estimación de la cantidad de recurso hídrico disponible en todos los sectores del área de estudio. Esto sumado al análisis del balance hídrico mensual, se constituyen como productos importantes para la toma de decisiones que permitan preservar el recurso hídrico en el Igualata.

Por otra parte, los resultados comparativos entre los NDVI realizados muestran una clara disminución de la salud en la vegetación dentro de toda el área de estudio entre el primer y el segundo periodo de estudio. En esta perspectiva, es preciso enunciar que la cobertura vegetal del Igualata ha sufrido una clara degradación.

En cuanto a los resultados obtenidos del coeficiente de correlación de Pearson, es válido mencionar que la cobertura vegetal sí incide significativamente en el balance hídrico del volcán tomando en cuenta que existe una correlación directa positiva en prácticamente toda el área de estudio.

Finalmente, el aspecto más importante de la investigación es el análisis espacial que permite evidenciar las variaciones de la disponibilidad de agua, el aumento o disminución de la salud en la cobertura vegetal y las zonas en las que más incide la cobertura vegetal en el balance hídrico, lo que permitió espacializar las tecnologías de manejo sostenible en el área de estudio.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda integrar datos provenientes de estaciones meteorológicas a esta investigación, para contrastar las mediciones satelitales con respecto de las mediciones terrestres y mejorar el modelo hidrológico para la estimación del balance hídrico.

También se recomienda analizar la cobertura vegetal mediante otros índices diferentes al NDVI para evaluar las eventuales diferencias o similitudes que éstos puedan presentar.

Es recomendable considerar esta investigación como una herramienta que permita tomar decisiones con un enfoque sostenible para el manejo de los recursos naturales renovables dentro del área de estudio.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACEVEDO, E. y SILVA, P., 2003. Agronomía de la cero labranza [en línea]. Santiago de Chile: s.n. [consulta: 21 diciembre 2023]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/255971546_Agronomia_de_la_Cero_Labranza.
2. ADLER, J. y PARMRYD, I., 2010. Quantifying colocalization by correlation: The Pearson correlation coefficient is superior to the Mander's overlap coefficient. *Cytometry Part A*, vol. 77A, no. 8, ISSN 1552-4922. DOI 10.1002/cyto.a.20896.
3. ALONSO, D., 2020. mappinGIS. Los 6 Índices de Vegetación para completar el NDVI [en línea]. [consulta: 2 marzo 2024]. Disponible en: <https://mappinggis.com/2020/07/los-6-indices-de-vegetacion-para-completar-el-ndvi/>.
4. ANGULO PIZA GINETH CECILIA y VELÁSQUEZ FARFÁN WILMAR ALEJANDRO, 2017. Balance hídrico para la finca flores Canelón de GR Chía S.A.S., del consumo de agua subterránea en época de estiaje y aguas lluvias en época de invierno, integrado a tuberías presurizadas, canales abiertos y reservorios de almacenamiento [en línea]. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. [consulta: 6 diciembre 2023]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10983/14731>.
5. BATANERO, C., GEA, M.M., LÓPEZ-MARTÍN, M. del M. y ARTEAGA, P., 2017. Análisis de los conceptos asociados a la correlación y regresión en los textos de bachillerato. *Didacticae* [en línea], no. 1, [consulta: 2 enero 2024]. ISSN 24622737. DOI 10.1344/did.2017.1.60-76. Disponible en: <https://www.ugr.es/~batanero/documentos/Didacticae.pdf>.
6. CAICEDO-ROSETO, L.C., MÉNDEZ-ÁVILA, F. de J., GUTIÉRREZ-ZEFERINO, E. y FLORES-CUAUTLE, J. de J.A., 2021. Medición de humedad en suelos, revisión de métodos y características. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI* [en línea], vol. 9, no. 17, [consulta: 1 enero 2024]. DOI 10.29057/icbi.v9i17.7035. Disponible en: <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/595/5952727005/5952727005.pdf>.

7. CARBAJAL-MORÁN, H.I. y ONOFRE-ENRIQUEZ, F.I., 2020. Determinación con imágenes satelitales del índice de vegetación de diferencia normalizada del valle de Pampas-Tayacaja Determination with satellite images of the normalized difference vegetation index of the Pampas-Tayacaja valley Determinação com imagens de satélite do índice de vegetação de diferença normalizada do vale Pampas-Tayacaja Ciencias técnica y aplicada Artículo de investigación. [en línea], vol. 5, no. 1, DOI 10.23857/pc.v5i1.1893. Disponible en: <http://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es>.
8. CARTAYA RÍOS, S., ZURITA ALFARO, S., RODRÍGUEZ RÍOS, E. y MONTALVO PÁRRAGA, V., 2015. Comprobación del NDVI en imágenes rapideye para determinar cobertura vegetal y usos de la tierra en la provincia de Manabí Ecuador. San Gregorio, vol. 2,
9. Catálogo Nacional de Datos Geográficos. MAG [en línea], 2003. [consulta: 29 noviembre 2023]. Disponible en: <https://geocloud.sni.gob.ec/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/66fb5641-7260-443c-bbaf-96dbc66f8d56>.
10. CLIMACO MACHORRO, A., BELLO COLORADO, G. y HERRERA RIVERA JOCELYN, [sin fecha]. Terraza individual. [en línea], [consulta: 21 diciembre 2023]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/596943585/terrazza-individual-1>.
11. CUBERO FERNÁNDEZ, D. y ELIZONDO ALVARADO, M.J., 2005. Práctica: Uso de barreras vivas. . S.I.:
12. DUQUE-SARANGO, P., CAJAMARCA-RIVADENEIRA, R., WEMPLE, B.C. y DELGADO-
13. FERNÁNDEZ, M.E., 2019. Estimación del Balance Hídrico de una Cuenca Andina Tropical. Granja, vol. 29, no. 1, ISSN 13908596. DOI 10.17163/lgr.n29.2019.05.
14. EOS Data Analytics. NDVI: Índice De Vegetación De Diferencia Normalizada [en línea], 2022. [consulta: 2 enero 2024]. Disponible en: <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndvi/>.
15. Establecimiento y uso de sistemas silvopastoriles en República Dominicana. [en línea], 2016. Santo Domingo: [consulta: 16 febrero 2024]. Disponible en: <http://repositorio.iica.int/handle/11324/3018>.

16. FLÓREZ-YEPES, G.Y., RINCON-SANTAMARÍA, A., CARDONA, P.S. y ALZATE-ALVAREZ, A.M., 2017. Análisis multitemporal de las coberturas vegetales en el área de influencia de las minas de oro ubicadas en la parte alta del sector de Maltería en Manizales, Colombia. DYNA (Colombia), vol. 84, no. 201, ISSN 00127353. DOI 10.15446/DYNA.V84N201.55759.
17. GAZABA, F.J., 2021. Introducción a los Sistemas de Información Geográfica con QGIS [en línea]. Pergamino: s.n. [consulta: 2 enero 2024]. vol. 1. Disponible en: <https://pergamino.ar/descargas/introduccion-a-los-sig-con-qgis.pdf>.
18. GONZALES ZAMORA, V., 2021. Importancia de la radiación solar como fuente de energía. [en línea]. Lima: [consulta: 1 marzo 2024]. Disponible en: http://www.citeenergia.com.pe/wp-content/uploads/2021/01/Ing.-Victor-Gonzales-Zamora_2.pdf.
19. GREGORIO HERNÁNDEZ DÍAZ-AMBRONA, C. y TARQUIS, A.M., 2015. Selección de índices de vegetación para la estimación de la producción herbácea en dehesas. [en línea]. S.l.: Disponible en: <http://polired.upm.es/index.php/pastos>.
20. GUZMÁN GUARACA ADRIANA CATALINA, 2023. Vulnerabilidad hidrológica por el cambio de uso de suelo en la cuenca alta del río Sauce Chico, provincia de Buenos Aires, Argentina [en línea]. Buenos Aires: Universidad Nacional de La Plata. [consulta: 1 febrero 2024]. Disponible en: <https://click.endnote.com/viewer?doi=10.35537%2F10915%2F158570&token=WzI3MzY4MjYsIjEwLjM1NTM3LzEwOTE1LzE1ODU3MCIj.TAIa7JseSW0C5hsnXh3iuxdgugo>.
21. HIROZUMI, K., 2015. Guía práctica para cosechar el agua de lluvia. [en línea]. Riobamba: [consulta: 21 febrero 2024]. Disponible en: https://www.jica.go.jp/Resource/project/ecuador/001/materials/ku57pq000011cym2-att/water_harvest_sp.pdf.
22. INAMHI, 2017. Boletín Agrometeorológico Mensual. [en línea]. Celica: [consulta: 1 marzo 2024]. Disponible en: https://www.inamhi.gob.ec/meteorologia/resp_boletines/BOLET%CDN%20Junio.pdf.

23. JUELA SIVISACA OSCAR LENIN, 2011. Estudio hidrológico y balance hídrico de la cuenca alta del río Catamayo hasta la estación El Arenal en Loja [en línea]. Loja: Universidad Nacional de Loja. [consulta: 6 diciembre 2023]. Disponible en: <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/4950>.
24. LARA-VÁSCONEZ, N.X., CUSHQUICULLMA-COLCHA, D.F., ESPINOZA, V.M., GUAÍÑA-YUNGÁN, J.I. y ATI-CUTIUPALA, G.M., 2021. Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de agua subterránea en la subcuenca del Río Chambo mediante los sistemas de información geográfica y el análisis multicriterio. Polo del Conocimiento [en línea], vol. 6, [consulta: 14 enero 2024]. ISSN 2550 - 682X. DOI 10.23857/pc.v6i6.2745. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8017000>.
25. LARA-VÁSCONEZ, N.X., GUAÍÑA-YUNGÁN, I., CUSHQUICULLMA-COLCHA, D.F., ESPINOZA, V.M. y ATI-CUTIUPALA, G.M., 2022. Cálculo de la recarga hídrica potencial en los páramos de la Parroquia Pungalá e identificación de amenazas mediante el análisis multicriterio. Polo del conocimiento [en línea], vol. 7, no. 5, DOI 10.23857/pc.v7i5.4012. Disponible en: <http://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es>.
26. LOOR BERRAZUETA, Y.S., 2017. Estudio del balance hídrico superficial de las cuencas hidrográficas sector San Juan y San Bartolomé en el área de interceptación con el bosque y vegetación protector Aguarongo. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana .
27. LÓPEZ PADILLA, L.I., PEÑA MURILLO, R.F. y VELASTEGUI CÁCERES, J.D., 2019. Determinación del balance hídrico y mapeo con sistemas de información geográfica de la microcuenca de la quebrada de Quillalli en el Cantón Ambato. Ciencia Digital, vol. 3, no. 4.2, ISSN 2602-8085. DOI 10.33262/cienciadigital.v3i4.2.1014.
28. LÓPEZ-MONTECINOS, C., 2019. Fundamentos básicos de Teledetección. [en línea]. Antofagasta: Universidad Católica de Chile, DOI 10.13140/RG.2.2.20684.44161. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/343295557>.
29. Mapa Interactivo - MAATE. MAATE [en línea], 2024. [consulta: 29 enero 2024]. Disponible en: <http://ide.ambiente.gob.ec:8080/mapainteractivo/>.

30. MARTÍNEZ BATLLE JOSÉ RAMÓN, TAVAREZ SAN JOSÉ CAROLINA ESTIVALIA, DÍAZ DEL OLMO FERNANDO y CÁMARA ARTIGAS RAFAEL, 2013. Ordenación para la Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas. US. S.l.: s.n.
31. MARTÍNEZ, S. y GARBI, M., 2020. Evapotranspiración y balance hidrológico del suelo. [en línea]. La Plata: [consulta: 1 enero 2024]. Disponible en: https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/67875/mod_resource/content/1/08%20-%20Unidad%20tem%C3%A1tica%20E%20-%20Evapotranspiraci%C3%B3n%20y%20balance%20hidrol%C3%B3gico%20del%20suelo.pdf
32. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, 2022. Recuperación de cobertura vegetal en áreas disturbadas. [en línea]. Bogotá: [consulta: 1 enero 2024]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/03/Guia-Methodologica-PT-Cobertura-Vegetal.pdf>.
33. MOLINA PEREIRA, Y.A., 2019. La Reforestación como Estrategia Ambiental para la Conservación de ríos y quebradas. Revista Scientific, vol. 4, no. 13, DOI 10.29394/scientific.issn.2542-2987.2019.4.13.9.182-199.
34. MUÑOZ AGUAYO, P., 2013. Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación. CIREN. S.l.: s.n.
35. OMEGA ENGINEERING MEXICO, 2017. Guía práctica de medición de temperatura [en línea]. S.l.: s.n. [consulta: 1 marzo 2024]. Disponible en: <https://mx.omega.com/e-book/282090/ebook-temp.pdf>.
36. ORDOÑEZ GÁLVEZ, J.J., 2011. Balance Hídrico Superficial. . Lima:
37. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN, 2009. Guía para la descripción de suelos. [en línea]. Roma: [consulta: 28 febrero 2024]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/a0541s/a0541s.pdf>.
38. ORTÍZ RAMÍREZ, G., GÓMEZ SOTO, J. y CAICEDO ARANA, Á., 2006. Validación de opciones tecnológicas para la conservación de suelos en los sistemas de ladera del

valle del Cauca. [en línea]. S.l.: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. [consulta: 26 febrero 2024]. Disponible en: https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/17202/Ver_Documento_17202.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

39. OSORIO RIVERA, M.Á., LÓPEZ SAMPEDRO, S.E., HARO ALTAMIRANO, J.P. y CARILLO BARAHONA, W.E., 2023. El Suelo Principios y Análisis [en línea]. 3. La Plata: Puerto Madero Editorial Académica. [consulta: 1 enero 2024]. ISBN 978-987-82912-0-8. Disponible en: <https://puertomaderoeditorial.com.ar/index.php/pmea/catalog/view/29/103/170>.
40. OVALLE-CASTIBALNCO, A.M., CÁRDENAS AGUIRRE, D.M., JIMÉNEZ VARÓN, C.F. y ABENDAÑO BELTRÁN, C.A., 2021. Influence of field slope on manual harvesting indicators on citrus in the agricultural sector in Caldas-Colombia. INGENIERÍA Y COMPETITIVIDAD [en línea], vol. 24, no. 1, [consulta: 2 enero 2024]. ISSN 0123-3033. DOI 10.25100/iyc.v24i1.10996. Disponible en: https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/10996/14311.
41. PABÓN SALAZAR, E.D., 2022. Análisis de los procesos de cambio de uso y cobertura del suelo en la microcuenca del río Tabacay. Quito: Universidad Andina Simón Bolívar.
42. PALENQUE, J.Ú. y PALACIOS ESTREMER, D., 2008. El clima de la vertiente del Pacífico de los Andes Centrales y sus implicaciones geomorfológicas. , vol. 20, ISSN 1016-9148.
43. PINEDA CORTES CRISTIAN GIOVANI y GUTIERREZ DE PIÑERES DÍAS NATHALY, 2020. Comparación de un balance hidrológico de la cuenca del río Checua haciendo uso de métodos tradicionales (Estaciones meteorológicas) y de sensores remotos (Teledetección), a partir del análisis de sensibilidad. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
44. Pitayo Verde. Barreras muertas, una práctica resiliente a la erosión [en línea], 2021. [consulta: 21 enero 2024]. Disponible en: <https://pitayoverde.enunclic.mx/index.php/blog/item/364-barreras-muertas-un-practica-resiliente-a-la-erosion>.

45. PIZARRO, R., SAGUESA, C., BRAVO, C., FARÍAS, C., SOTO, M. y FLORES, P., 2003. Manual de conservación de aguas y suelos: Instructivo N° 4 Diques para retención de sedimentos. Talca:
46. Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Guano. [en línea], 2015. Guano: [consulta: 11 enero 2024]. Disponible en: <https://multimedia.planificacion.gob.ec/PDOT/descargas.html>.
47. Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Quero. [en línea], 2018. Quero: [consulta: 11 enero 2024]. Disponible en: <https://multimedia.planificacion.gob.ec/PDOT/descargas.html>.
48. POMA-COPA, M.P. y USCA-TIUQUINGA, M.R., 2020. Estimación del balance hídrico climático (BHC) de las microcuencas del cantón Joya de los Sacha, Orellana. FIPCAEC, vol. 5, DOI <https://doi.org/10.23857/fipcaec.v5i5.183>.
49. Propiedades de los suelos. [en línea], 2019. Bogotá: [consulta: 2 marzo 2024]. Disponible en: https://www.utadeo.edu.co/sites/tadeo/files/collections/documents/field_attached_file/18.propiedades_suelos.pdf.
50. PUCHA-COFREP, F., FRIES, A., CÁNOVAS-GARCÍA, F., OÑATE-VALDIVIESO, F., GONZÁLES JARAMILLO, V. y PUCHA-COFREP, D., 2017. Fundamentos de SIG Aplicaciones con ArcGIS [en línea]. S.l.: Ediloja Cia Ltda. [consulta: 2 enero 2024]. ISBN 9789942289018. Disponible en: https://www.academia.edu/34927204/Fundamentos_de_SIG.
51. RIESCO CHUECA, P., 2007. ¿Ríos o zanjas de drenaje? Las pequeñas corrientes fluviales y la nueva agricultura. Ríos con vida [en línea]. S.l.: Universidad de Sevilla, pp. 28-31. [consulta: 26 enero 2024]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/215475334_Rios_o_zanjas_de_drenaje_Las_pequenas_corrientes_fluviales_y_la_nueva_agricultura?enrichId=rgreq-d18a9d6ddc9d36c8cbde16a4ad5c2076-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzIxNTQ3NTMzNDtBUzo5NzY1MzM4Nzk1NjJzOEAxNDAwMjkzNzkwOTI0&el=1_x_3&_esc=publicationCoverPdf.

52. RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, A., ARCIA PORRUA, J., MARTÍNEZ CAÑIZARES, J.A., GARCÍA LAMAS, J., CID LAZO, G. y FLEITES CASTRO, J., 2015. Los sistemas de labranza y su influencia en las propiedades físicas del suelo. *Revista Ingeniería Agrícola* [en línea], vol. 5, no. 2, ISSN 2306-1545. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=586261425010>.
53. RUIZ, C., [sin fecha]. Producción sustentable de cultivos con manejo de rastrojos. [en línea]. Santiago de Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias, pp. 105-115. [consulta: 21 enero 2024]. Disponible en: <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/67616/Capitulo%204.pdf?sequence=5#:~:text=No%20quemar%20los%20rastrojos%20de,%25%20a%2090%25%20de%20azufre>.
54. SALAZAR, C. y DEL CASTILLO, S., 2018. *Fundamentos Básicos de Estadística* [en línea]. 1. S.l.: s.n. [consulta: 2 enero 2024]. ISBN 9789942306166. Disponible en: <http://librodigital.sangregorio.edu.ec/librosusgp/B0009.pdf>.
55. SÁNCHEZ CARMONA, M.L., 2019. Metodología para el análisis espacial. Una aproximación hacia las investigaciones de diseño. De los métodos y las maneras [en línea], vol. 5, Disponible en: <http://hdl.handle.net/11191/6250>.
56. SANTILLÁN-FERNÁNDEZ, A., CRUZ- RAMÍREZ, S.Z., CALVA-CASTILLO, A., IRETA-PAREDES, A. del R. y BAUTISTA-ORTEGA, J., 2019. Balance hídrico climático de bosque mesófilo de montaña en la huasteca. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, vol. 7, no. 1, ISSN 2007-9028. DOI 10.19136/era.a7n1.2016.
57. SEGARRA GALARZA, P., 2014. Sinergias entre Degradación de la Tierra y Cambio Climático en los Paisajes Agrarios del Ecuador [en línea]. MAE. Quito: s.n. Disponible en: www.flacsoandes.edu.ecContenido.
58. SOKOLOV, A.A. y CHAPMAN, T.G., 1981. *Métodos de cálculo del balance hídrico: guía internacional de investigación y métodos*. S.l.: Inst. de Hidrología de España. ISBN 8450050812.

59. TADEU, J., TOMMASELLI, G. y LEAL, A.C., 2015. Cálculo de balance hídrico usando modelamiento de datos espaciales: estudio aplicado a la cuenca del río Buena Vista, Ecuador. *Revista Formação* [en línea], vol. 1, DOI 10.33081/formacao.v1i22.3165. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/360311434>.
60. Tecnologías y metodologías validadas para mejorar la seguridad alimentaria en las zonas secas de Honduras, 2005. Tegucigalpa:
61. Terrazas de banco. [en línea], [sin fecha]. Ciudad de México: [consulta: 10 noviembre 2023]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/173243583/14-Terrazas-de-Banco>.
62. UNIVERSIDAD DE MURCIA y UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA, 2020. *Glosario Geografía* [en línea]. 2020. S.l.: s.n. [consulta: 21 enero 2024]. Disponible en: https://www.um.es/documents/877924/4876771/EBAU2020_Geograf%C3%ADa_T%C3%A9rminos+geogr%C3%A1ficos_glosario.pdf/d8c2251d-f2ab-497c-a3e2-d2722cfd2317.
63. ZAMBRANO NAVARRETE, X.A., CAICEDO TORO, M.D. y FARÉZ-ROMÁN, V., 2021. Balance hídrico distribuido con funciones de pedotransferencia para estimar eventos extremos. *Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores* [en línea], [consulta: 20 agosto 2023]. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/dilemas/v8nspe2/2007-7890-dilemas-8-spe2-00023.pdf>.
64. ZAVALA SIERRA, D., RODRÍGUEZ ORTÍZ, J.C., ALCALÁ JÁUREGUI, J., RUÍZ ESPINOZA, F., GONZALES MANCILLAS, R., RODRÍGUEZ FUENTES, H. y DELGADO SÁNCHEZ, P., 2018. Potencial de cinco especies de leguminosas como abonos verdes en la zona altiplano de San Luis Potosí, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* [en línea], vol. 20, [consulta: 26 marzo 2024]. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v9nspe20/2007-0934-remexca-9-spe20-4323.pdf>.

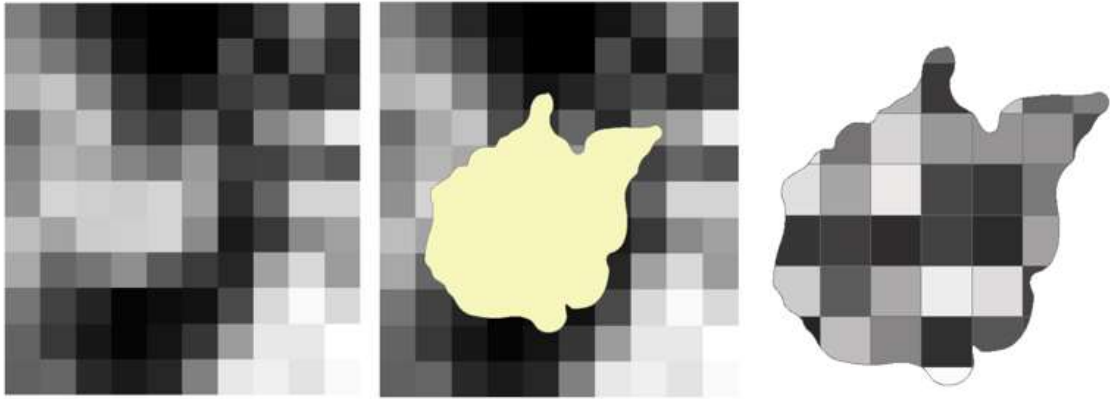
0535-DBRA-UPT-2025

27-05-2024

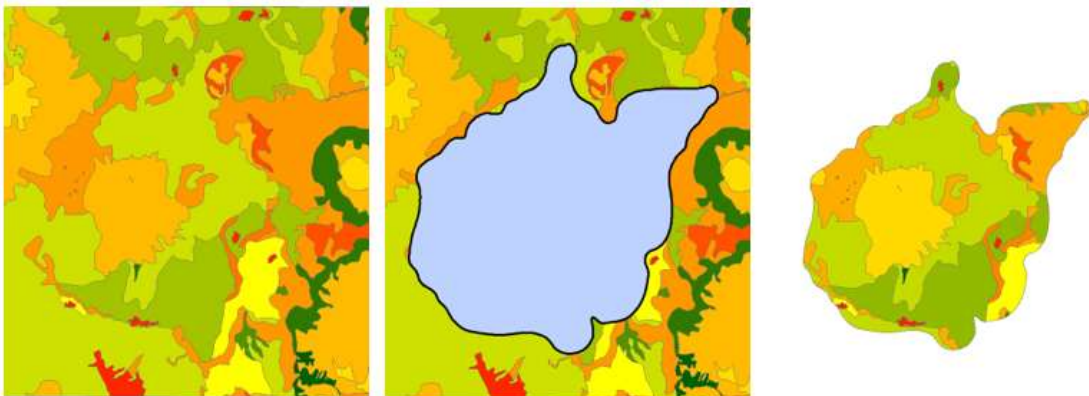


ANEXOS

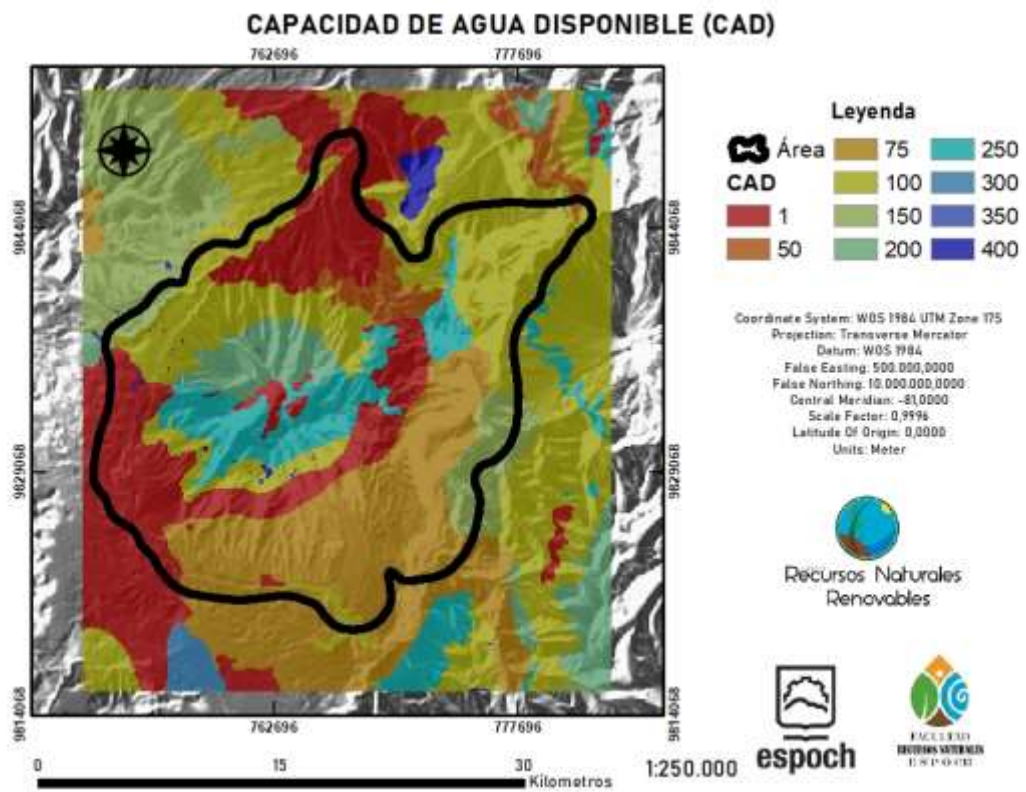
ANEXO A: VISUALIZACIÓN DEL PROCESO PARA RECORTAR LAS CAPAS RÁSTER DE PM Y TM EN FUNCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO



ANEXO B: VISUALIZACIÓN DEL PROCESO PARA RECORTAR UNA CAPA SHP EN FUNCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO



ANEXO C: VISUALIZACIÓN DE LA CAPA RÁSTER CORRESPONDIENTE A LA CAPACIDAD DE AGUA DISPONIBLE





ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LA GUÍA PARA
NORMALIZACIÓN DE TRABAJOS DE FIN DE GRADO

Fecha de entrega: 07/03/2024

INFORMACIÓN DEL AUTOR
Nombres – Apellidos: Ronald Nicolay Guamaní Hidalgo
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Recursos Naturales
Carrera: Recursos Naturales Renovables
Título a optar: Ingeniero en Recursos Naturales Renovables
 Ing. Jorge Daniel Córdova Lliquín Director del Trabajo de Titulación
 Ing. Adriana Catalina Guzmán Guaraca Asesora del Trabajo de Titulación