

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS

**ANÁLISIS MULTIESPECTRAL MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES PARA
IDENTIFICAR ZONAS DE RECARGA HÍDRICA SUBTERRÁNEA EN LA
CUENCA JEQUETEPEQUE**

PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO GEÓLOGO

PRESENTADO POR:

Bach. SILVIA ROSMERI DÍAZ CRUZ

ASESOR:

M.Cs.Ing. CRISPÍN ZENÓN QUISPE MAMANI

CAJAMARCA – PERÚ - 2018

DEDICATORIA

A mis padres, Silvia Evel Cruz Collantes y Silos Magno Díaz Llaja, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su gran amor.

A mis hijos, Santiago Pozo Díaz y Abigail Pozo Díaz, mis dos grandes amores, mi fuente de inspiración, motivación y superación para seguir adelante.

A toda mi familia y amigos, en especial a las personas que me ayudaron a desarrollar la tesis.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A la Universidad Nacional de Cajamarca – Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica y a cada docente que hizo parte de este presente integral de formación. Especialmente a mi asesor M. Cs. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani, por su ayuda brindada a la elaboración y desarrollo de mi investigación.

A todas las personas que me apoyaron y creyeron en la realización de esta tesis.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE MAPAS	vii
ABREVIATURAS	viii
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 ANTECEDENTES	6
2.1.1 Internacional.....	6
2.1.2 Nacional	6
2.1.3 Local	7
2.2 BASES TEÓRICAS	8
2.2.1 Fundamentos de la observación remota.....	8
2.2.2 El espectro electromagnético	11
2.2.3 Sensores remotos	12
2.2.4 Satélite ASTER Modelo Digital de Elevación Global (GDEM).....	18
2.2.5 Satélite Landsat 8	19
2.2.6 Clasificador en árbol.....	21
2.2.7 Temperatura superficial.....	22
2.2.8 Pendientes	23
2.2.9 Índices de vegetación.....	24
2.2.10 Interpretación hidrogeológica de una imagen	26
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	27
CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS	30

3.1	UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	30
3.1.1	Demarcación Política.	30
3.1.2	Demarcación Hidrográfica.	30
3.1.3	Ubicación Geográfica.	31
3.1.4	Clima, Vegetación, Unidades Hidrográficas, Geología de la cuenca del río Jequetepeque.....	34
3.2	PROCEDIMIENTO	47
3.2.1	Obtención de imágenes satelitales.	47
3.2.2	Preparación de las imágenes satelitales	47
3.2.3	Parámetros de clasificador en árbol	54
3.2.4	Metodología	62
3.2.5	Instrumentos de recolección de datos.	63
3.3	ANÁLISIS DE PARÁMETROS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DEL CLASIFICADOR EN ÁRBOL.	63
3.3.1	Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	63
3.3.2	Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI).	66
3.3.3	Temperatura.....	68
3.3.4	Pendiente.....	70
	CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	72
4.1	CLASIFICADOR EN ÁRBOL.	72
4.2	CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS.	74
	CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	78
5.1	CONCLUSIONES	78
5.2	RECOMENDACIONES	79
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
	ANEXOS.....	82

ÍNDICE DE TABLAS

Pág

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE LAS IMÁGENES LANDSAT 8.....	20
TABLA 2. COORDENADAS DE REFERENCIA UTM	31
TABLA 3. TIPOS DE COBERTURA VEGETAL EN LA CUENCA DEL RÍO JEQUETEPEQUE.....	35
TABLA 4. UNIDADES HIDROGRÁFICAS	43
TABLA 5. CLASIFICACIÓN Y TIPOS DE INVESTIGACIÓN.	62
TABLA 6. FALSO COLOR RGB PARA LA CLASIFICACIÓN DE MATERIALES EN NDVI.....	64
TABLA 7. FALSO COLOR RGB PARA LA CLASIFICACIÓN DE MATERIALES EN NDWI.....	66
TABLA 8. ANÁLISIS DE RANGO DE TEMPERATURA EN CUBIERTAS.	68
TABLA 9. GRADO DE INFILTRACIÓN EN FUNCIÓN DE LA PENDIENTE.	70
TABLA 10. FALSO COLOR RGB PARA LA CLASIFICACIÓN DE PENDIENTES.	70
TABLA 11. PARÁMETROS CLAVE PARA IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA.	74

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág
FIGURA 1. (I) REFLEXIÓN, (II) EMISIÓN Y (III) EMISIÓN-REFLEXIÓN.....	8
FIGURA 2. ESQUEMA DE UNA ONDA ELECTROMAGNÉTICA.....	10
FIGURA 3. EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.	11
FIGURA 4. SENSORES ACTIVOS Y PASIVOS	13
FIGURA 5. ANCHO DE BANDA PARA LOS SENSORES OLI Y TIRS EN LANDSAT 8 Y ETM + EN LANDSAT 7.....	21
FIGURA 6. CLASIFICADOR EN ÁRBOL.....	22
FIGURA 7. IMÁGENES MULTIESPECTRAL PERTENECIENTE AL BARRIDO PATH=9 / ROW=65.....	49
FIGURA 8. IMÁGENES MULTIESPECTRAL PERTENECIENTE AL BARRIDO PATH=10 / ROW=65.....	50
FIGURA 9. UNIÓN DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES.....	51
FIGURA 10. IMAGEN MULTIESPECTRAL ANTES DE LA CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA Y RADIOMÉTRICA	52
FIGURA 11. IMAGEN MULTIESPECTRAL DESPUÉS DE LA CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA Y RADIOMÉTRICA	53
FIGURA 12. OBTENCIÓN DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI).....	55
FIGURA 13. OBTENCIÓN DEL ÍNDICE DE AGUA DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDWI). ..	57
FIGURA 14. OBTENCIÓN DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL.	59
FIGURA 15. OBTENCIÓN DE LAS PENDIENTES.....	61
FIGURA 16. CLASIFICADOR EN ÁRBOL DE LA ZONA DE ESTUDIO.	73

ÍNDICE DE MAPAS

	Pág
MAPA 1. MAPA DE DEMARCACIÓN POLÍTICA.....	32
MAPA 2. MAPA DE DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA.....	33
MAPA 3. MAPA GEOLÓGICO.....	46
MAPA 4. ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI).....	65
MAPA 5. ÍNDICE DE AGUA DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDWI).	67
MAPA 6. DE TEMPERATURA SUPERFICIAL.....	69
MAPA 7. DE PENDIENTES.....	71
MAPA 8. CLASIFICADOR EN ÁRBOL.....	75
MAPA 9. CLASIFICADOR EN ÁRBOL VS POZOS INVENTARIADOS POR ANA.	76
MAPA 10. CLASIFICADOR EN ÁRBOL VS POZOS INVENTARIADOS POR VARGAS, V. (2010)	77

ABREVIATURAS

ANA:	Autoridad Nacional del Agua.
ASTER:	Radiómetro Avanzado De Emisión Térmica Y Reflexión Espacial
AU:	Tierras Urbanas
BN:	Tierras con Bosques Naturales
BN-VA:	Tierras con Bosques Naturales y Vegetación Arbustiva
BS:	Tierras con Bosque Seco
CA:	Cuerpos de Agua
CA-CP:	Tierras con Cultivos Agrícolas y Cultivos permanentes
CA-PN:	Tierras con Cultivos Agrícolas y Pastos Naturales
CA-VA:	Tierras con Cultivos Agrícolas y vegetación Arbustiva
CA-VE:	Tierras con Cultivos Agrícolas, Vegetación Escasa y Afloramientos Rocosos
CP3:	Componente principal 3
DEM:	Modelo Digital De Elevaciones
ERE:	Elemento de Resolución Efectiva
EIFOV:	Campo de Visión Instantáneo Efectivo
EO-1:	Observador De La Tierra
F:	Tierras con Plantaciones Forestales
F-CA:	Tierras con Plantaciones Forestales y Cultivos Agrícolas
F-PN:	Tierras con Plantaciones Forestales y Pastos Naturales
GDEM:	Modelo Digital De Elevación Global
GLDAS:	Sistema global de datos terrestres
GOES:	Satélite Geoestacionario Operacional Ambiental
GRACE:	Recuperación por gravedad y experimento climático
GWS:	Agua subterránea
LANDSAT:	Satélite Tierra
Lsen:	Recibido Por El Sensor
Lsu:	Emitido Desde El Suelo
M:	Tierras con Mosaico de cultivos, pastos y vegetación arbustiva
NASA:	Administración Nacional De La Aeronáutica Y Del Espacio

ND:	Numero Digital
NDVI:	Índice De Vegetación De Diferencia Normalizada
NDWI:	Índice De Agua De Diferencia Normalizada
NIR:	Infrarrojo Cercano
OLI:	Sensor Operacional De Imágenes De Tierra
PATH-ROW:	Latitud – Longitud
PEN:	Pendiente
PC-CA:	Tierras con Pastos Cultivados y Cultivos Agrícolas
PC-VA:	Tierras con Pastos Cultivados y Vegetación Arbustiva
PN:	Tierras con Pastos Naturales
PN-VA:	Tierras con Pastos Naturales y Vegetación Arbustiva
PN-VE:	Tierras con Pastos Naturales, Vegetación Escasa Afloramientos Rocosos
RGB:	Rojo, Verde, Azul
SM:	Humedad del suelo
SIG:	Sistema De Información Geográfica
SWIR:	Infrarrojo De Onda Corta
TD:	Tierras degradadas
TM:	Mapeador Temático
TIRS:	Infrarrojo Térmico
TS:	Temperatura Superficial
TWS:	Acumulación de agua terrestre
USGS:	Servicio Geológico De Los Estados Unidos
UTM:	Sistema De Coordenadas Transversal De Marcador
VA:	Tierras con Vegetación Arbustiva
VA-VE:	Tierras con Vegetación Arbustiva, Vegetación Escasa y Afloramientos Rocosos
VE:	Tierras con Vegetación Escasa y Afloramientos Rocosos
C°:	Grados centígrados
T°:	Temperatura

RESUMEN

Las técnicas satelitales representan una nueva oportunidad para monitorear cambios en la acumulación del recurso hídrico desde el espacio, dadas las limitaciones que existen hoy en día para obtener medidas completas y confiables de los niveles de agua subterránea en grandes regiones geográficas, lo cual conlleva a que no se obtenga el máximo provecho de un recurso sobre todo porque es un recurso con uniformidad en su calidad, buena distribución espacial y en muchos casos con menor grado de contaminación con respecto a las aguas superficiales, por lo cual en la investigación se ha propuesto como objetivo el uso de las imágenes satelitales de tipo LANDSAT 8 y ÁSTER GDEM en un área de 3 956 Km² correspondiente a la cuenca Jequetepeque, para ubicar las zonas de recarga hídrica subterránea, la cual fue contrastada con los pozos inventariados por el ANA y 93.6% en función a los pozos inventariados según Vargas (2010). Dentro del procedimiento y a manera de resumen, podemos definirlo como: obtención de imágenes satelitales Landsat 8; preparación de las imágenes satelitales dentro de la cual está incluida la corrección, unión, obtención de parámetros para el clasificar en árbol como son: índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), Temperatura y pendientes; consecuentemente se realizó el análisis de parámetros para ingresarlo a un clasificador en árbol; teniendo como resultado la ubicación de zonas de recarga hídrica subterránea. Concluyendo con este estudio que es posible identificar zonas de recarga hídrica subterránea usando imágenes satelitales con una certeza promedio de 94 %, en función de los pozos existentes en la zona de estudio.

Palabras claves: Teledetección, índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), recarga hídrica.

ABSTRACT

Satellite techniques represent a new opportunity to monitor changes in the accumulation of water resources from space, given the limitations that exist today to obtain complete and reliable measurements of groundwater levels in large geographic regions, which leads to not get the most out of a resource especially because it is a resource with uniformity in quality, good spatial distribution and in many cases with less degree of contamination with respect to surface waters, so in the research has been proposed as objective the use of LANDSAT 8 and ÁSTER GDEM satellite images in an area of 3 956 Km² corresponding to the Jequetepeque basin, to locate the underground water recharge zones, which was contrasted with the wells inventoried by the ANA and 93.6% according to the inventoried wells according to Vargas (2010). Within the procedure and as a summary, we can define it as: obtaining Landsat 8 satellite images; preparation of the satellite images within which the correction, union, obtaining parameters for classifying in tree are included, such as: standardized difference vegetation index (NDVI), standardized difference water index (NDWI), temperature and slopes ; consequently, the parameters analysis was performed to enter it into a tree classifier; resulting in the location of underground water recharge zones. Concluding with this study it is possible to identify areas of underground water recharge using satellite images with a certainty of 94%, depending on the existing wells in the study area.

Key words: Remote sensing, standardized difference vegetation index (NDVI), standardized difference water index (NDWI), water recharge.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico es una necesidad cada vez más creciente y en los últimos años un problema que va afectando cada vez más a distintas regiones, es por ello que debe ser atendida de manera tecnológica; especialmente en regiones de déficit hídrico superficial. Las técnicas satelitales representan una nueva oportunidad tal es el caso del método clasificador en árbol para la ubicación de zonas de recarga hídrica, dadas las limitaciones que existen hoy en día para obtener medidas completas y confiables de los niveles de agua subterránea para grandes regiones geográficas conlleva a que no se obtenga el máximo provecho de un recurso que potencialmente valioso en nuestro país, una mejor distribución espacial y por lo general menor grado de contaminación con respecto a las aguas superficiales, por lo cual la presente investigación propone el uso de las imágenes satelitales de tipo LANDSAT 8 (LAND=tierra y SAT=satélite) y ÁSTER (The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), GDEM (modelo digital de elevación global) en la cuenca Jequetepeque para ubicar las zonas de recarga hídrica subterránea; es por ello que se formula la pregunta: ¿Es posible identificar zonas de recarga hídrica subterránea usando imágenes satelitales en la cuenca Jequetepeque?, teniendo como hipótesis principal que: mediante análisis multiespectral y teniendo en cuenta las variables tales como: el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), temperatura y pendientes, será capaz de identificar zonas de recarga hídrica subterránea, justificando el estudio en que la falta de información sobre las principales zonas de recarga hídrica conlleva al desconocimiento de acciones eficaces y una acertada toma de decisiones para garantizar el correcto uso del recurso hídrico. Esta falta de atención en el tema ha generado un desconocimiento en cuanto a la existencia de áreas de recarga por su comportamiento, movimiento del agua y modo adecuado de utilización del recurso. Tomando en cuenta estos aspectos, es fundamental realizar un estudio enfocado

al aprovechamiento del recurso hídrico basado en los principios del uso sostenible de las fuentes de agua por lo que esta investigación pretende dar un aporte de la identificación de zonas de recarga hídrica subterránea para un mejor aprovechamiento del líquido elemento, ya sea de manera doméstica, agrícola o industrial.

La investigación tendrá un enfoque mixto cualitativo – cuantitativo, correlacional y se desarrolló entre los meses de febrero - julio del 2018, con una delimitación espacial en la Cuenca del Jequetepeque. Con el objetivo general de identificar zonas de recarga hídrica subterránea usando imágenes Landsat 8 en la cuenca Jequetepeque y objetivos específicos como: realizar un análisis multiespectral de imágenes Landsat 8, mediante el procesamiento del software ENVI 5.3, para identificar zonas de recarga hídrica subterránea, determinar los parámetros que favorecen la recarga hídrica subterránea, realizar el análisis multiespectral mediante el clasificador en árbol para combinar cada una de las variables correspondientes, objetivos que guiarán la presente investigación en la identificación de zonas de recarga hídrica subterránea.

Dentro de la investigación se desarrolló los siguientes capítulos: Capítulo II marco teórico en el cual se presentó los antecedentes internacionales, nacionales y locales de estudios de teledetección en el cual emplean métodos espectrales de clasificación de datos. Además, se nombró las principales leyes y principios que rigen la teledetección.

Dentro del Capítulo III se desarrolló los aspectos básicos de la zona de estudio como son la demarcación política, demarcación hidrográfica, vegetación, hidrografía y estratigrafía; además también se realizó el procedimiento de análisis y a manera de resumen podemos definirlo como: obtención de las imágenes satelitales, preparación de las imágenes satelitales, obtención de parámetros para el clasificar en árbol, análisis de parámetros. Dentro del Capítulo IV se presentó el análisis y discusión de resultados, dentro del cual se contrastó la hipótesis llegando a definir que es posible identificar zonas de recarga hídrica subterránea con una certeza de 95 % en función de los pozos subterráneos inventariados por el ANA y 93.6% en función a los pozos inventariados según Vargas (2010).

Finalmente, en el Capítulo V se presentaron las conclusiones y recomendación de la investigación, dentro del cual podemos expresar como conclusión principal que las firmas espectrales son una buena fuente de información al momento de realizar

un análisis espectral para la identificación de zonas de recarga hídrica en la Cuenca Jequetepeque, se recomienda realizar un análisis espectral minucioso, al momento de la clasificación de cubiertas por rangos espectrales en todos los parámetros que se trabaje, pues si uno de los parámetros falla en el análisis, generará un error de cálculo en el clasificador.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

Para la zona de estudio no se tiene estudios desarrollados en lo que respecta a zonas de recarga hídrica subterránea usando imágenes satelitales, sin embargo, encontramos estudios referentes a la evaluación del potencial minero y estudios geológicos, tales como:

2.1.1 Internacional

Ospina (2016). Análisis de la información proveniente del satélite Grace para el monitoreo de la acumulación de agua subterránea: caso ejemplo provincia hidrogeológica de los Llanos orientales-Colombia.

Las series de tiempo de precipitación, TWS, SM y GWS, para la provincia hidrogeológica de los Llanos Orientales en el periodo comprendido entre el 2003 y 2014, usando información proveniente de GRACE, el sistema GLDAS y de las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM, permiten identificar que las variaciones temporales en las anomalías de acumulación de agua terrestre, humedad del suelo y agua subterránea, corresponden con los periodos secos y lluviosos de la región. Algunos periodos presentan contrastes que pueden estar asociados a los fenómenos del Niño y la Niña.

2.1.2 Nacional

Rivera et. al. (1998). INGEMMET, PERUPETRO S.A, BOLETIN N°20: Estudio geológico regional aplicando imágenes satelitales para la evaluación del potencial minero en un área en el norte de la republica de Perú.

El propósito de Rivera es evaluar el potencial regional de recursos minerales del norte del Perú mediante el análisis de imágenes satelitales. Este estudio está siendo llevado a cabo conjuntamente con el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET), Perúpetro S.A. La duración del proyecto está

programada para tres años, siendo éste el primer año. El área de estudio para este año se ubica entre las latitudes 7°S Y 9°30´ S y entre el Océano Pacífico al Oeste y la frontera con Brasil al Este.

2.1.3 Local

Mendoza, J y Rojas, J. (2013). Clasificación de imágenes ETM+ y ÁSTER GDEM por el método árbol de decisiones para la detección de agua subterránea en Perú. Caso de estudio: Lambayeque. El estudio se basa en la complementación de técnicas geofísicas para la detección de acuíferos libres de agua subterránea, Con los datos de las imágenes ETM+ se calculó los componentes principales, con las Bandas 1,2,3,4,5 y 7 y con el componente principal 3 (CP3), se estimó los valores de la red de drenaje, con los datos de imágenes ÁSTER GDEM se determinó el modelo de pendiente del área de estudio, finalmente de un árbol de decisiones, basado en los valores de CP3, NDVI, temperatura superficial y modelo de pendientes se caracterizan las zonas potencialmente con agua subterránea de acuíferos libres, concluyéndose así que es posible la detección de agua subterránea mediante el método de árbol de decisiones, usando parámetros superficiales de clasificación.

Vargas, V. (2010). Caracterización hidrogeológica de las cuencas de los ríos Jequetepeque-chaman, regiones Cajamarca, La Libertad Y Lambayeque.

La caracterización hidrogeológica ha permitido identificar las siguientes unidades: un acuífugo, en rocas metamórficas; acuitardos en rocas sedimentarias, volcánicas e intrusivas; acuíferos como son los porosos no consolidados, los fisurados sedimentarios y los fisurados volcánicos. El análisis hidrogeoquímico de las aguas nos ha permitido definir las características químicas de las aguas y clasificarlas, así como establecer las diferentes posibilidades de uso de las mismas.

Finalmente se propone de manera descriptiva algunas obras de intervención las cuales podrían favorecer la captación y recarga de acuíferos, establecer medidas de protección para el acuífero poroso no consolidado y para las diversas captaciones existentes. Todo esto con el afán de contribuir a una adecuada gestión del recurso hídrico en la cuenca.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Fundamentos de la observación remota

Anteriormente se definió la teledetección como aquella técnica que nos permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre. Para que esta información remota sea posible es preciso que entre los objetos y el sensor exista algún tipo de interacción. Nuestros sentidos perciben un objeto solo cuando pueden descifrar la información que este les envía. Por ejemplo, somos capaces de ver un árbol porque nuestros ojos reciben y traducen convenientemente una energía luminosa procedente del mismo. Esa señal, además no es originada por el árbol, sino por un foco energético exterior que lo ilumina. De ahí que no seamos capaces de percibir ese árbol en plena oscuridad (Chuvienco, 2010).

Este pequeño ejemplo nos sirve para introducir los tres principales elementos de cualquier sistema de teledetección: sensor (nuestro ojo), objeto observado (árbol) y flujo energético que los pone en relación y permite, en última instancia, detectar el objeto (Chuvienco, 2010).

En nuestro ejemplo, ese flujo procede del árbol por reflexión de la luz solar. Podría también tratarse de un tipo de energía emitida por el propio objeto (en caso de que fueran capaces de detectar el calor que emiten), o incluso por el sensor (por ejemplo, si tuviéramos una cámara equipada con flash). Estas son, precisamente, las tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto: por reflexión, por emisión, y por emisión – reflexión (Chuvienco, 2010), (Ver Figura 1).

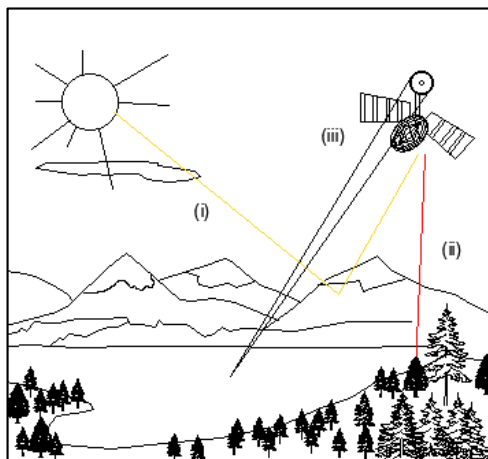


Figura 1: (i) reflexión, (ii) Emisión y (iii) emisión-reflexión. Fuente: Drozd y Ferrero, 2011.

La primera de ellas es la forma más importante en teledetección, pues deriva directamente de la luz solar, principal fuente de energía de nuestro planeta. El sol ilumina la superficie terrestre, la cual refleja esa energía en función del tipo de cubierta sobre ella. Ese flujo reflejado se recoge por el sensor, que lo trasmite posteriormente a las estaciones receptoras.

Entre superficie y sensor se interpone la atmósfera, que dispersa y absorbe parte de la señal original. De igual forma, la observación remota puede basarse en la energía emitida por las propias cubiertas, o en la que podríamos enviar desde un sensor que fuera capaz, tanto de generar su propio flujo energético como de recoger posteriormente su reflexión sobre la superficie terrestre. (Chuvieco, 2010)

En cualquiera de estos casos, el flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor constituye una forma de radiación electromagnética. Como es sabido, la energía se transfiere de un lugar a otro por tres procesos: convección, conducción y radiación. De ellos, nos centraremos en el último, pues constituye la base de los sistemas de teledetección. (Chuvieco, 2010)

Históricamente, las propiedades de la radiación electromagnética se han explicado por dos teorías aparentes compuestas: aquella que la concibe como un haz ondulatorio según HUYENS (2000), y aquella otra que la considera como una sucesión de unidades discretas de energía, fotones o cuantos, con masa igual a 0. Actualmente parece que las dos teorías se pueden compaginar pues se ha demostrado que la luz presenta comportamientos que pueden explicarse de acuerdo con ambos planteamientos.

Según la teoría ondulatoria, la energía electromagnéticamente se trasmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: eléctrico y magnético (ver Figura 2).

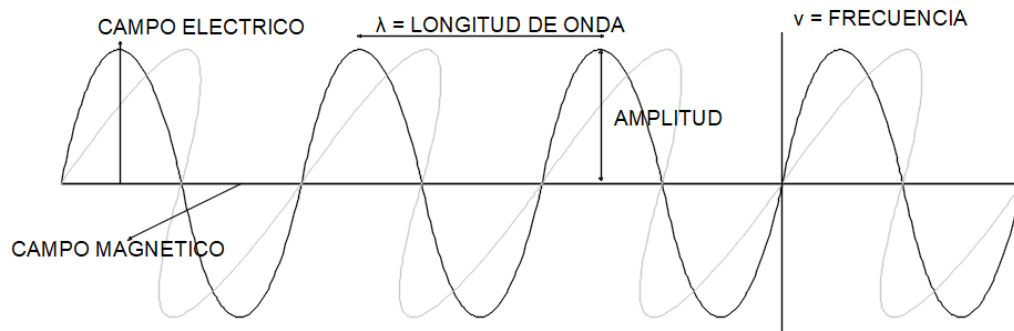


Figura 2: Esquema de una onda electromagnética. Fuente: Chuvieco, E. (2010).

Las características de este flujo energético pueden describirse por dos elementos: longitud de onda (λ) y frecuencia (ν). La primera hace referencia a la distancia entre dos picos sucesivos de una onda, mientras que la frecuencia designa el número de ciclos pasando por un punto fijo en una unidad de tiempo. Ambos elementos están inversamente relacionados.

$$c = \lambda \nu \dots 2.1$$

Donde c , indica la velocidad de la luz (3×10^8 m/s), la λ expresa la longitud de onda (habitualmente en micrómetros, $1 \mu\text{m}$ es igual a 10^{-6}m o nanómetros, $1 \text{ nm} = 10^{-9}\text{m}$). Y ν la frecuencia (en Hertz, $1 \text{ Hz} = 1$ ciclo por segundo). En definitiva, a mayor longitud de onda, menor frecuencia y viceversa, por lo que basta con indicar un solo término para identificar propiamente el tipo de energía mencionado (Chuvieco, 2010).

A partir de la teoría cuantitativa podemos calcular la cantidad de energía transportada por un fotón, siempre que se conozca su frecuencia:

$$Q = h \nu \dots 2.2$$

Donde Q es la energía radiante de un fotón (en julios), ν la frecuencia y h la constante de Planck ($6,6 \times 10^{-34}$ Js). Sustituyendo en la ecuación 2.1, se puede expresar:

$$Q = h (c/\lambda) \dots 2.3$$

Lo que significa, en definitiva, que, a mayor longitud de onda o menor frecuencia, el contenido energético será menor o viceversa. Esto implica que la radiación en longitudes de onda largas es más difícil de detectar que aquella proveniente de

longitudes cortas, de ahí que las primeras requieran medios de detección más refinados (Chuvieco, 2010).

2.2.2 El espectro electromagnético

De las fórmulas anteriores se deduce que podemos definir cualquier tipo de energía radiante en función de la longitud de onda o frecuencia. Aunque la sucesión de valores de onda es continua suelen establecerse una serie de bandas donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. La organización de estas bandas se denomina espectro electromagnético, es decir una distribución en función de la longitud de onda (ver figura 3).

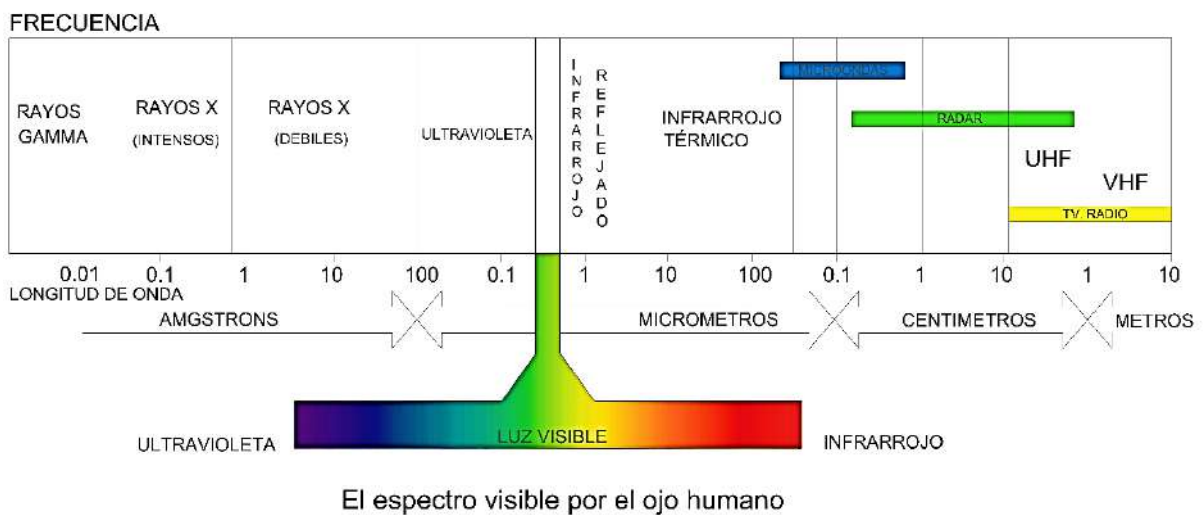


Figura 3: El Espectro Electromagnético. Fuente: USGS, 2015.

Comprende desde las longitudes de onda más cortas (rayos X y Gamma), hasta las kilométricas (telecomunicaciones). Las unidades de medida más comunes se relacionan con la longitud de onda. Para las más cortas se utilizan micrómetros, mientras las más largas se miden en centímetros o metros. Normalmente a estas últimas (denominadas micro-ondas) se las designa también por valores de frecuencia (en Gigahertz, GHz = 10^9 Hz), (Chuvieco, 2010).

Desde el punto de vista de la teledetección, conviene destacar una serie de bandas espectrales, que son las más frecuentemente empleadas con la tecnología actual. Su denominación y amplitud varían según distintos autores, si bien la terminología más común es la siguiente:

Espectro visible (0.4 a 0.7 μm). Se denomina así por tratarse de la única radiación electromagnética que pueden percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Dentro de esta región suelen distinguirse tres bandas elementales que se denominan azul (A, 0.4-0.5 μm), verde (V, 0.5-0.6 μm), y rojo (R, 0.6-0.7 μm), debido a los colores primarios que nuestros ojos perciben a esas longitudes de onda (Chuvieco, 2010).

Infrarrojo cercano (IRC, 0.7 a 1.3 μm). También se denomina infrarrojo próximo, reflejado o fotográfico, puesto que parte de él puede detectarse a partir de películas dotadas de emulsiones especiales. Como veremos luego, resulta de especial importancia por su especial capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad (Chuvieco, 2010).

Infrarrojo medio (1.3 a 8 μm). En esta región se entremezclan los procesos de reflexión de luz solar y de emisión de la superficie terrestre. La primera banda se sitúa entre 1.3 y 2.5 μm y se denomina infrarrojo de onda corta (Short Wave Infrared, SWIR), que resulta idónea para estimar el contenido de humedad en la vegetación o los suelos. La segunda, comprendida principalmente en torno a 3.7 μm , se conoce propiamente como infrarrojo medio (IRM), siendo determinante para la detección de focos de alta temperatura (incendios o volcanes activos) (Chuvieco, 2010).

Infrarrojo lejano o térmico (IRT, 8 a 14 μm), que incluyen la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.

Micro ondas (M, por encima de 1mm), con gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa (Chuvieco, 2010).

2.2.3 Sensores remotos

2.2.3.1 Tipos de sensores

Entre las variadas formas de clasificar los sensores remotos, una de las más habituales considera su procedimiento de recibir energía procedente de las distintas cubiertas. En este sentido, se habla de dos tipos de sensores: pasivos, cuando se

limitan a recibir la energía proveniente de un foco exterior a ellos, y activos, cuando son capaces de emitir su propio haz de energía. Estos últimos son, lógicamente, más flexibles, puesto que no dependen tanto como los primeros de las condiciones al sistema sensor – tierra.

Una anterior clasificación entre los sensores pasivos considera su procedimiento para grabar la energía recibida, de acuerdo con ello, puede hablarse de sensores fotográficos, óptico - electrónicos y de antena. Los primeros resultan muy familiares, puesto que se basan en las mismas técnicas aplicadas en la fotografía convencional. El resto son poco conocido por el público, si bien sistemas similares se utilizan rutinariamente: cámaras de video, equipos de barrido o scanners en exploración médica, y radiómetros de micro - ondas en radio difusión.

En cuanto a los sensores a los sensores activos, el equipo más conocido es el radar, bastante utilizado en aplicaciones militares, así como en control de tráfico aéreo. El radar trabaja en la región de las micro – ondas. Por su parte, el lidar opera con luz polarizada (laser) en el espectro óptico (Chuvienco, 2010).

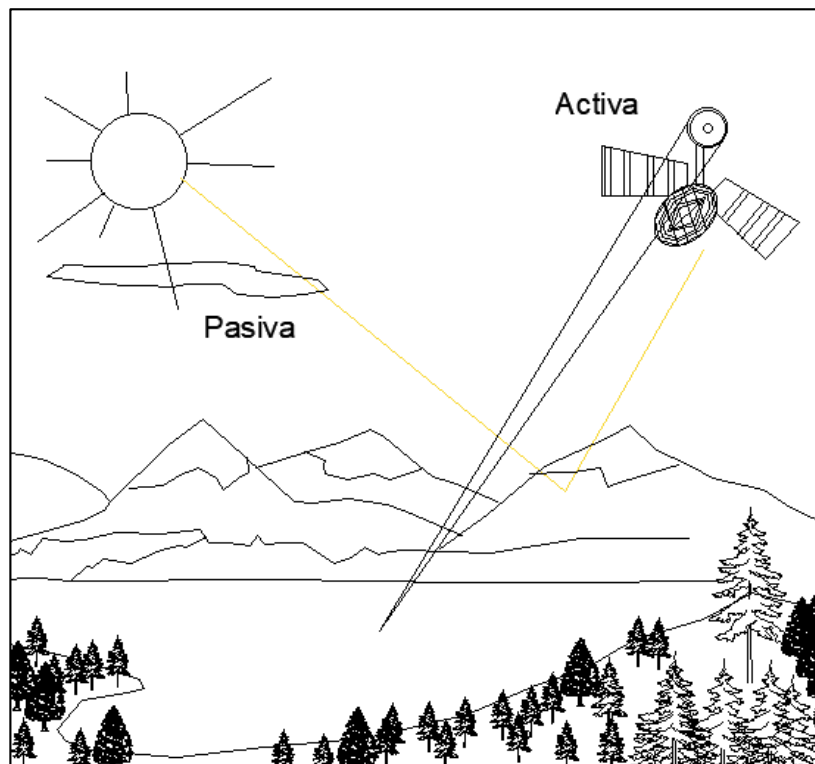


Figura 4: Sensores activos y pasivos. Fuente: Drozd y Ferrero. (2011).

2.2.3.2 Resolución de un sistema de sensor

Se puede definir la resolución de un sistema sensor como su habilidad para discriminar información de detalle, esta definición engloba varios aspectos que merecen un comentario más detallado. Por un lado, se habla de resolución de un sensor, indicando que este concepto se refiere al conjunto del equipo y no a cada uno de sus partes. Dicho de otra forma, la resolución de un sensor depende del efecto combinado de sus distintos componentes. Una mejora en la lente, por ejemplo, no supondrá necesariamente adquirir fotografías con mayor resolución, si no se acompaña de una película de mayor sensibilidad, o no se modifican las condiciones de exposición.

Los términos de la definición “discriminan” e “información de detalle” merecen también una breve reflexión. Ambos son relativos al propósito y al entorno geográfico del proyecto que se está abordando. La discriminación refiere a la capacidad de distinguir un objeto de otros. Esa distinción puede referirse a una simple determinación de que está ahí (detección) o una delimitación precisa de su contorno (identificación). Lógicamente, la segunda tarea requiere mayor resolución espacial que la primera (Robin, 1998), ya que un objeto puede detectarse por sus efectos en la radiancia global observada (por ejemplo, el brusco aumento de temperatura que implica una erupción volcánica), pero para identificarlo con detalle (localizar con precisión en cráter) será necesario que el mínimo objeto que identifica el sistema sea mucho más pequeño que el tamaño del propio cráter.

En cuanto al significado de “información de detalle”, conviene considerar que se refiere no solo al detalle espacial que proporciona el sensor, sino también al número y anchura de las bandas del espectro que alberga, a su cadencia temporal, y a su capacidad para distinguir variaciones en la energía que detecta (Campbell, 1996). Todas estas dimensiones son de interés para discriminar cubiertas o establecer modelos de significado físico. En definitiva, el concepto de resolución implica diversas manifestaciones, las más habituales en la literatura especializada han sido la espacial, espectral, radiométrica y temporal. En los últimos años a estas podemos añadir también la resolución angular, que haría referencia a la capacidad de un sistema de observar el mismo objetivo desde distintas posiciones. A continuación, comentaremos con más detalle cada una de ellas (Chuvienco, 2010).

A. Resolución espacial

Este término designa al objeto más pequeño, distinto sobre una imagen, Se mide en milímetros sobre la foto o metros sobre el terreno, y depende de la longitud focal de la cámara y de su altura sobre la superficie. En los sensores ópticos – electrónicos se prefiere utilizar el concepto de campo de visión instantáneo (instantaneous field of view, IFOV); el IFOV se define como la sección angular, medida en radianes, observada en un momento determinado por el sensor. En lugar de esta definición, habitualmente suele utilizarse la distancia sobre el terreno que corresponde a ese ángulo, que puede calcularse a partir de él, conociendo la distancia del suelo al sensor. Esa distancia se corresponde al tamaño de la mínima unidad de información incluida en la imagen, que se denomina pixel (del inglés picture element). Esta es la medida más generalizada de resolución espacial, aunque también se emplean otros términos más complejos, como ERE (Elemento de Resolución Efectiva) o EIFOV (Campo de Visión Instantáneo Efectivo), que consideran la señal detectada como una función modulada compuesta (Townshend, 1980).

En cualquier caso, conviene considerar que la resolución espacial de un sensor óptico- electrónico depende de varios factores, como son la altura orbital, velocidad de exploración, y número de detectores. En cuanto a los sensores de antena, su resolución depende del radio de apertura, de la altura de la plataforma, y de la longitud de onda, la resolución será tanto más detallada (Chuvieco, 2010).

La resolución espacial de los sensores de observación terrestre en funcionamiento recoge un rango bastante amplio; los satélites que cuentan con mayor resolución ofrecen un detalle espacial próximo a 1 x 1 m, mientras los de recursos naturales, diseñados para adquirir información sobre áreas muy heterogéneas, suelen contar con resoluciones comprendidas entre los 6 x 6 m del sensor pancromático IRS-1C, hasta los 120 x120 m del canal térmico del Landsat- TM. Otro grupo de sensores, orientado hacia aplicaciones más globales, como el IRS- Wifs, Modis, eawifs, SPOT- Vegetation o SNOAA-AVHRR, facilitan píxeles de un tamaño comprendido entre 200 y 1.100 m de lado. En el extremo de este abanico estarían los satélites meteorológicos de órbita geoestacionaria (Meteosat, GOES), que, al ofrecer una visión global de la superficie terrestre, proporcionan escaso detalle espacial, con píxeles de hasta 5 km de lado. En el futuro cercano está previsto continuar con el lanzamiento de satélites comerciales (Ikonos -2 activo desde 1999, y desde 2000

EROS A1), que ofrecen imágenes de muy alta resolución espacial (entre 0.61 y 4 m). como ya vimos en el primer capítulo, esta mayor disponibilidad de imágenes de alta resolución permitirá ampliar el rango actual de aplicaciones de esta técnica, entrando en dominios anteriormente reservados a los medios aéreos de observación (Chuvienco, 2010).

La resolución espacial tiene un papel protagonista en la interpretación de la imagen, por cuanto marca, de alguna forma; el nivel de detalle que esta ofrece. Parece obvio decir que solo serán identificables sobre la imagen elementos que superen el tamaño de varios pixeles, si bien pueden detectarse rasgos de tamaño similar o incluso más pequeño al del pixel cuando exista suficiente contraste radiométrico.

En consecuencia, la resolución espacial está en estrecha relación con la escala de trabajo y con la fiabilidad finalmente obtenida en la interpretación. Cuanto menor sea el tamaño del pixel, menor también la probabilidad de que este sea un compuesto de dos o más cubiertas fronterizas. Un pixel mixto estará definido por una señal intermedia a las distintas cubiertas que lo componen. En consecuencia, puede no asemejarse a ninguna de ellas, lo que dificultara notablemente su correcta identificación.

Sin embargo, en el caso concreto de algunas cubiertas, singularmente las urbanas, se ha comprobado que incrementar la resolución espacial puede afectar negativamente a la interpretación, cuando esta se realiza digitalmente, al incrementar excesivamente la heterogeneidad interna en algunas categorías. En lo que se refiere a análisis visual, queda fuera de toda duda el interés de mejorar la resolución espacial para facilitar una interpretación más certera de la imagen (Chuvienco, 2010).

B. La resolución espectral

Indica el número y la anchura de las bandas espectrales que pueden discriminar el sensor. En este sentido un sensor será tanto más idóneo cuanto mayor número de bandas proporcione, ya que facilita la caracterización espectral de las siguientes cubiertas. A la vez, conviene que esas bandas sean suficientemente estrechas, con objeto de recoger la señal sobre regiones coherentes del espectro.

Bandas muy amplias muy anchas suponen registrar un valor promedio, que pueden encubrir la diferenciación espectral entre cubiertas de interés (Meijering, 2007).

C. La resolución radiométrica

La resolución radiométrica indica la sensibilidad del sensor, es decir la capacidad de discriminar entre pequeñas variaciones en la radiación que capta. Suele expresarse mediante el número de bits necesarios que se precisan para almacenar cada celdilla. Por ejemplo, Landsat-TM utiliza 8 bits lo que da $2^8 = 256$ niveles de energía (Niveles Digitales, ND) que pueden ser captados.

Cuanto mayor sea la precisión radiométrica mayor número de detalles podrán captarse en la imagen.

La resolución o sensibilidad radiométrica, hace referencia al rango dinámico o número de niveles digitales usados al digitalizar la información procedente del sensor (bits por pixel). En general, mayor número de niveles mayor detalle de la información. Al igual que ocurría en la resolución espectral, existe una relación directa entre la resolución radiométrica y la relación S/N (Peguero, 2012).

D. La resolución temporal

Este concepto alude a la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor. En otras palabras, se refiere a la periodicidad con la que este adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. El ciclo de cobertura está en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación), así como del diseño del sensor, principalmente del ángulo total de cobertura. Conviene tener en cuenta que la resolución temporal efectiva dependerá también de las condiciones atmosféricas, ya que son sensores ópticos o térmicos, no podremos observar áreas cubiertas por nubes, por lo que en algunas zonas las cadencias de imágenes útiles pueden ser notablemente más baja que el ciclo de adquisición del sensor. Para obviar de alguna manera estos problemas, los sensores más modernos incluyen la capacidad de observación no vertical (lo que se denomina sensores enfocables), facilitando así la adquisición de datos sobre una zona de interés desde una órbita próxima (Meijering, 2007).

E. La resolución angular

Es un término que refiere a la capacidad de un sensor para observar la misma zona desde distintos ángulos. (Diner et al, 1999). Tradicionalmente se ha asumido que las cubiertas presentan una reflectividad lambertiana, lo que implica que ofrecerían una señal similar independientemente del ángulo con que se observan. Esta

práctica no es así, especialmente para algunas superficies que presentan fuertes efectos de reflectividad bidireccional. Una manera de modelar estos efectos es observar la cubierta desde distintas posiciones, facilitando así su mejor caracterización. También la observación multi angular resulta de gran interés para estimar algunas variables atmosféricas, ya que al variar el ángulo de mira se están observando la superficie con distinto espesor atmosférico, variando en consecuencia los procesos de absorción y dispersión (Meijering, 2007).

2.2.4 Satélite ASTER Modelo Digital de Elevación Global (GDEM)

El Ministerio de Economía, Comercio e Industria (METI) de Japón y la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (NASA) anunciaron conjuntamente el lanzamiento del Modelo de Elevación Digital Global Versión 2 (Radiómetro de Emisión y Reflexión Térmica Avanzado) (ASTER V2) el 17 de octubre de 2011.

La primera versión de ASTER GDEM, lanzada en junio de 2009, se generó utilizando imágenes de par estéreo recopiladas por el instrumento ASTER a bordo de Terra. La cobertura de ASTER GDEM se extiende desde 83 grados de latitud norte hasta 83 grados sur, abarcando el 99 por ciento de la masa terrestre de la Tierra.

El mejorado GDEM V2 agrega 260,000 estéreo-pares adicionales, mejorando la cobertura y reduciendo la aparición de artefactos. El algoritmo de producción refinado proporciona una resolución espacial mejorada, una mayor precisión horizontal y vertical, y una mejor cobertura y detección del cuerpo de agua. ASTER GDEM V2 mantiene el formato GeoTIFF y la misma estructura de cuadrículas y mosaicos que V1, con publicaciones de 30 metros y tejas de 1 x 1 grado.

La versión 2 muestra mejoras significativas con respecto a la versión anterior. Sin embargo, se informa a los usuarios que los datos contienen anomalías y artefactos que impedirán la efectividad para su uso en ciertas aplicaciones. Los datos se proporcionan "tal cual", y ni la NASA ni METI / Japan Space Systems (J-spacesystems) serán responsables de los daños que se deriven del uso de los datos.

Como una contribución de METI y NASA al Sistema de Sistemas Globales de Observación de la Tierra (GEOSS), los datos de ASTER GDEM V2 están disponibles de forma gratuita para los usuarios en todo el mundo del Land

Procurement Distributed Active Archive Center (LP DAAC) y J-spacesystems (USGS, 2017).

2.2.5 Satélite Landsat 8

El satélite LANDSAT 8, fue lanzado el 11 de febrero de 2013, es un satélite óptico de resolución media cuyo objetivo es proporcionar información para actividades relacionadas con la agricultura, la educación, los negocios, la ciencia y también en el ámbito estatal. Es un satélite más completo respecto a su antecesor, LANDSAT-7, con sus funciones mejoradas para monitorizar la calidad del agua y nubes atmosféricas altas.

Este satélite contiene dos sensores: El Sensor operacional de imágenes de tierra (OLI) y un sensor Infrarrojos Térmico (TIRS). OLI está formado por las primeras 9 bandas espectrales que van desde lo visible pasando por los infrarrojos hasta el espectro de radiación de bajas ondas. Con las imágenes de resolución espaciales, que oscilan entre los 15 y los 30m (ver tabla 1) LANDSAT-8 proporciona imágenes de satélite de calidad que podrían demostrar los diferentes usos que se le podría dar a la tierra desde el espacio.

TIRS está compuesto por dos bandas espectrales, las cuales detectan infrarrojos térmicos, una herramienta imprescindible para medir la temperatura de la superficie de la Tierra (USGS, 2017).

Las imágenes de Landsat miden rangos de longitudes de onda del espectro electromagnético, incluidas algunas que son invisibles para el ojo humano. Estos rangos se denominan "bandas espectrales". Las bandas se describen en la siguiente tabla.

Tabla 1: Características de las imágenes Landsat 8.

DESCRIPCIÓN	BANDA	ANCHO (μM)	RESOLUCIÓN (M)
AEROSOL COSTERO	Band 1 Coastal	0.43 – 0.45	30
AZUL	Band 2 Blue	0.45 – 0.51	30
VERDE	Band 3 Green	0.53 – 0.59	30
ROJO	Band 4 Red	0.64 – 0.67	30
INFRARROJO CERCANO	Band 5 NIR	0.85 – 0.88	30
INFRARROJO DE ONDA CORTA 1	Band 6 SWIR1	1.57 – 1.65	30
INFRARROJO DE ONDA CORTA 2	Band 7 SWIR2	2.11 – 2.29	30
PANCROMÁTICO	Band 8 Pan	0.50 – 0.68	15
CIRRO	Band 9 Cirrus	1.36 – 1.38	30
INFRARROJO TÉRMICO 1	Band 10 TIRS1	10.6 – 11.19	100
INFRARROJO TÉRMICO 2	Band 11 TIRS2	11.5 – 12.51	100

Fuente: USGS, 2017.

Los instrumentos Landsat 8 representan un avance evolutivo en la tecnología. OLI mejora los sensores Landsat pasados usando un enfoque técnico demostrado por un sensor volado en el satélite experimental EO-1 de la NASA. OLI es un sensor push-broom con un telescopio de cuatro espejos y una cuantización de 12 bits. OLI recolecta datos para bandas espectrales infrarrojas, de infrarrojo cercano y de onda corta, así como para una banda pancromática. Tiene una vida de diseño de cinco años (Meinjerin, 2007).

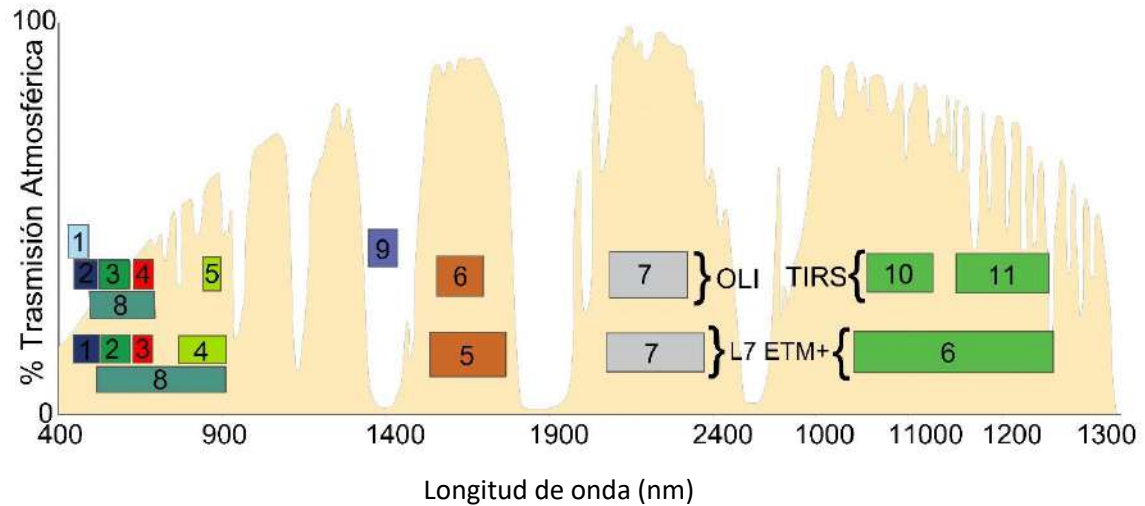


Figura 5: Ancho de banda para los sensores OLI y TIRS en Landsat 8 y ETM + en Landsat 7. Fuente: USGS,2013.

2.2.6 Clasificador en árbol

El clasificador en árbol puede considerarse como un sencillo ejemplo de sistema experto (skidmore, 1989), tan extendido en los últimos años en el marco de las denominadas técnicas de inteligencia emocional. En pocas palabras un sistema experto está compuesto por un conjunto de reglas que permiten al algoritmo tomar una serie de decisiones en función de los valores que se observa en la imagen y/o en información auxiliar de la misma zona.

Los clasificadores en árbol se han utilizado en los últimos años con cierto éxito, tanto en la cartografía de especies forestales (Saura y San Miguel, 2001), como para asignar tipos de vegetación y cobertura de suelos; con especial relieve en aplicaciones de ámbito global (Friedl y Brodley, 1989).

El clasificador de árboles de decisión realiza clasificaciones de varias etapas utilizando una serie de decisiones binarias para colocar píxeles en clases. Cada decisión divide los píxeles de un conjunto de imágenes en dos clases basadas en una expresión. Puede dividir cada nueva clase en dos clases más basada en otra expresión. Puede definir tantos nodos de decisión, según sea necesario. Los resultados de las decisiones son clases. De este modo se puede utilizar los datos de diferentes fuentes y archivos para hacer un clasificador de árbol de decisión individual. Puede editar y podar los árboles de decisión de forma interactiva, y

también puede salvar los árboles y aplicarlos a otros conjuntos de datos” (Peguero, 2012).

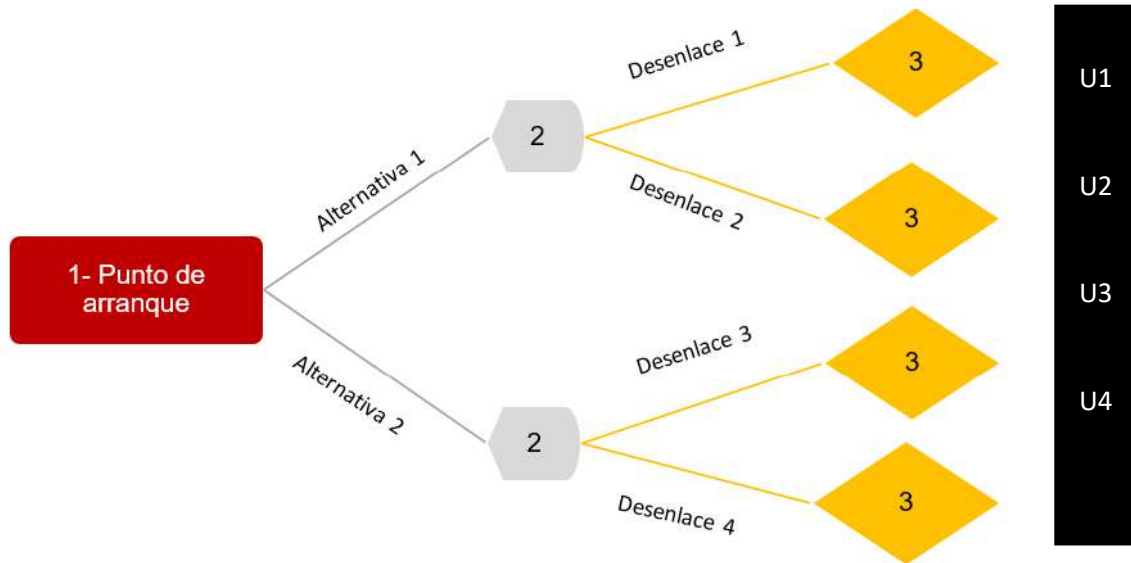


Figura 6: Clasificador en árbol

Donde:

1: Nodo de decisión 1

2: Nodo de decisión 2

3: Nodo terminal

Ui-U4: Calificación dada a cada desenlace

Fuente: Chuvieco, E. (2010).

2.2.7 Temperatura superficial

El proceso para el cálculo de temperatura se inicia con los ND (número digital) detectados por el sensor. Al igual que en el espectro óptico, estos valores codifican un valor de radiancia en este caso correspondiente a las dos bandas del infrarrojo térmico (Meijerink, 2007).

Aquí el objetivo no es encontrar la relación entre el flujo incidente en el suelo y el reflejo al sensor sino entre el flujo emitido desde el suelo (L_{su}) y el recibido por el sensor (L_{sen}). Entre ambas magnitudes vuelven a interponerse los componentes

de la atmosfera y emiten su propia energía distorsionando la radiancia recibida por el sensor (Meijerink, 2007).

Al igual que en el caso del NDVI el primer paso en el cálculo de la temperatura es convertir los ND en radiancia, una vez calculada la radiancia puede estimarse la temperatura de brillo a partir de la inversión de la ecuación de Planck (Kidwell, 1991), este algoritmo será insertado en el software ENVI 5.3 para determinar la temperatura superficial:

$$T_s = T^{\circ}i + A(T^{\circ}i - T^{\circ}j) - B$$

Donde

T_s : Temperatura del suelo

$T^{\circ}i$ y $T^{\circ}j$: Temperatura de brillo en dos bandas contiguas del espectro

A Y B: son coeficientes dependientes del tipo de atmosfera (nubes y aerosoles).

2.2.8 Pendientes

Para cada celda, la herramienta Pendiente calcula la tasa máxima de cambio del valor de esa celda a sus vecinas. Básicamente, el cambio máximo en la elevación sobre la distancia entre la celda y sus ocho vecinas identifica el descenso cuesta abajo más empinado desde la celda (Meijerink, 2007).

Conceptualmente, la herramienta ajusta un plano a los valores z (elevación) de una vecindad de celdas de 3×3 alrededor de la celda de procesamiento o central. El valor de pendiente de este plano se calcula mediante la técnica de promedio máximo. La dirección a la que apunta el plano es la orientación para la celda de procesamiento. Mientras menor sea el valor de la pendiente, más plano será el terreno; mientras más alto sea el valor de la pendiente, más empinado será el terreno (Meijerink, 2007).

Si hay una ubicación de celda en la vecindad con un valor z No Data, se asignará el valor z de la celda central a la ubicación. En el borde del ráster, al menos tres celdas (fuera de la extensión del Ráster) contendrán valores z No Data. A estas celdas se les asigna el valor z de la celda central. El resultado es un aplanamiento del plano de 3×3 ajustado a estas celdas del borde, lo que generalmente lleva a una reducción en la pendiente. El Ráster de pendiente de salida se puede calcular en dos tipos de unidades: grados o porcentaje (elevación en porcentaje), el cual

nos ayudara a identificar las zonas más probables de infiltración de agua subterránea (Meijerink, 2007).

2.2.9 Índices de vegetación

Un índice de vegetación tiene como objetivo mostrar e inventariar píxeles (áreas) con vegetación verde.

El interés por la hidrogeología es:

- La determinación de las superficies regadas por aguas subterráneas para estudios de presupuestos de aguas subterráneas.
- En áreas secas la ausencia o presencia de agua subterránea en fracturas, asumiendo la respuesta de la vegetación a la presencia de agua.
- La vegetación afecta los presupuestos de humedad del suelo, la recarga y en algunas áreas la absorción del agua subterránea por raíces profundas.
- Las áreas con vegetación más densa pueden indicar áreas con mayor precipitación y presencia de aguas subterráneas, que puede pasar desapercibido debido a la baja densidad de pluviómetros.
- En caso de que la fluctuación del agua subterránea cause problemas, puede ser conveniente estudiar la respuesta de la vegetación a través de un índice de vegetación e imágenes secuenciales (Meijering, 2007).

2.2.9.1 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

La vegetación verde refleja mucha luz en la banda infrarroja cercana (NIR) pero no mucho en la banda roja (RED). Por lo tanto, el índice de vegetación más simple es (NIR-RED) porque esa diferencia tiene un valor positivo y grande, valor mucho más de lo que se obtendría para las otras cubiertas terrestres. Dado que el dominio NIR es invisible para el ojo humano, la mayor reflectancia en la banda verde hace que veamos la vegetación como verde. La baja reflectancia y transmitancia en el rango visible es causada por la fuerte absorción de clorofila pigmento. Los efectos absorbentes son menos fuertes en el infrarrojo cercano (0.7-1.30 μm) pero la reflectancia y la transmitancia son más altos. Tipo de pigmento, contenido de agua de la hoja, estructura celular, espesor de las hojas y su orientación en la trayectoria del sensor solar influye en los detalles de la firma espectral (Meijering, 2007).

El estado de desarrollo de las plantas y los árboles a través de las estaciones y dentro de la temporada como una función de la lluvia y la temperatura es, por supuesto, una fuente de variación en el desarrollo de la vegetación y, por lo tanto, de la reflectancia características. Para complicar las cosas, el fondo del suelo influye en la reflectancia cuando no presentan cubiertas artificiales. La diferencia en la reflexión (expresada por DN) de las bandas NIR y RED es mucho mayor para la vegetación verde. Una imagen que contiene los valores de píxel de la diferencia se denomina imagen de índice de vegetación. El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es ampliamente utilizado, donde la normalización se da al dividir la diferencia entre la suma, para traer el rango de valores NDVI a -1 y 1.

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$$

Los píxeles con una vegetación exuberante en una imagen NDVI aparecerán como tonos blanquecinos (si dichos tonos están asignados a alta valores, como es habitual) y píxeles sin vegetación o con poca vegetación en tonos de gris oscuro a negro (Meijering, 2007).

2.2.9.2 Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI)

Se han utilizado otros índices de vegetación en estudios de vegetación de aguas subterráneas, un índice de vegetación que está relacionado con el contenido de agua en la vegetación ronderosa (dosel) y plantas, es el índice de agua de diferencia normalizada, NDWI según Gao (1996). El índice en forma general es el siguiente:

$$\text{NDWI} = (\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$$

donde SWIR es la reflectancia o radiancia en un canal de onda infrarroja de onda corta (1.2 - 2.5 μm). Los Landsat 8, NIR y SWIR corresponden a las bandas 5 (0.85 - 0.88 μm) y 6 (1.57-1.65 μm), respectivamente. NDWI es sensible a los cambios en el contenido de agua líquida de los doseles de vegetación (región de las copas y regiones superiores de los árboles).

Los efectos atmosféricos de dispersión de aerosoles (polvo, cenizas, cristales de sal oceánica, esporas, bacterias, neblina) en la región de 0.86 -1.24 μm son débiles.

NDWI es menos sensible a la atmosférica efectos que NDVI. NDWI no elimina por completo los efectos de reflectancia del suelo de fondo, similar a NDVI (Chuvienco, 2010).

2.2.10 Interpretación hidrogeológica de una imagen

El arte de la interpretación de imágenes es extraer información de relevancia hidrogeológica a partir de imágenes que representan el terreno. La interpretación se centra, de hecho, en dos aspectos interrelacionados:

1. La característica subterránea hidrogeológica (litología, estructuras litológicas)
2. Características de la superficie (pendiente, temperatura, presencia de agua superficial, presencia de vegetación) que influyen en la recarga y muestran evidencia de salida del agua subterránea (Chuvienco, 2010).

Aunque el trabajo de interpretación se ejecuta hoy en día en la pantalla de la computadora, debe tenerse en cuenta que las imágenes impresas a gran escala con una superposición transparente ofrecen la ventaja de seleccionar toda la imagen durante el proceso de interpretación, permitiendo que la interpretación sea cotejada en toda la escena. La interpretación luego puede transferirse a un archivo de computadora, ya sea manualmente o escaneando la superposición (Bannert, 1980).

Sería absurdo afirmar que la configuración subsuperficial se puede obtener mediante la interpretación de imágenes, pero no se puede hacer una evaluación adecuada de la hidrogeología sin dicho conocimiento. Obviamente, mapas geológicos, se requieren secciones, registros de perforación y datos geofísicos, pero en el intento de desarrollar aguas subterráneas conceptuales es útil intentar extrapolar las características de la superficie geológica observadas en la imagen al subsuelo, es decir que a través de características superficiales poder definir características subterráneas. El esfuerzo es particularmente valioso cuando los mapas geológicos a gran escala (1: 25,000 o 1: 50,000) no son disponible y existen pocos registros de perforación. El mapa de interpretación de imágenes del campo previo hará que el trabajo de campo sea más eficiente. Deben intentarse secciones geológicas preliminares en la etapa inicial de la prospección hidrogeológica, porque esto aclarará dónde se encuentran las dificultades que deben ser inspeccionadas

en el campo y mediante la perforación exploratoria y estudio geofísico (Chuvieco, 2010).

Con la rica variedad de situaciones hidrogeológicas en diferentes climas, geología y geomorfología, muchas preguntas se pueden plantear, sobre la base de las expectativas. En la práctica de la exploración de aguas subterráneas, hay un doble proceso de razonamiento involucrado en la interpretación de imágenes hidrogeológicas: por un lado, las imágenes ayudan en la construcción de las expectativas subterráneas de forma visual y por otro lado reinterpretan a etapa posterior las características relacionadas con el agua subterránea en la superficie, haciendo un análisis espectral.

2.2.10.1 Interpretación geomorfológica

La interpretación geomorfológica es de importancia en los estudios hidrogeológicos, especialmente para la recarga, por dos razones:

Los accidentes geográficos están asociados con suelos, depósitos superficiales y denudación, que afectan la naturaleza y propiedades hidrogeológicas de los materiales cercanos a la superficie, denominados “sobrecarga” en ingeniería.

La proporción de lluvia disponible para la recarga de agua subterránea depende no solo de la permeabilidad de los suelos y rocas, sino también en el tiempo de residencia del agua de lluvia sobre las áreas de toma de agua subterránea. Suelos poco profundos con arcillas expansivas, redes de drenaje integradas de alta densidad, áreas y demás, causan un escurrimiento rápido, dejando relativamente poca agua para recargar. Condiciones opuestas, por las cuales se retiene mucha agua, son propicias para la recarga (Meijering, 2007).

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Absorción atmosférica: Indica la eliminación que realiza la atmósfera de distintos tipos de energía, debido a sus propios componentes, y principalmente del ozono, oxígeno atómico y vapor de agua (Chuvieco, 2010).

Banda espectral: se refiere este término a una selección de longitudes de onda con comportamiento electromagnéticos similares (Chuvieco, 2010).

Calibración: Proceso de comparar ciertas medidas específicas con otro instrumento estándar (Chuvienco, 2010).

Correcciones atmosféricas: Indican las operaciones digitales tendentes a eliminar errores en la adquisición de las imágenes, ya sean radiométricos o geométricos (Chuvienco, 2010).

Emisividad: proporción entre la energía emitida por un determinado objeto y la que emitiría un cuerpo negro a la misma temperatura (Chuvienco, 2010).

Espectro electromagnético: Se trata de la agrupación de la radiación electromagnética en distintas bandas, definidas por la longitud de onda o la frecuencia, que presentan un comportamiento radiométrico similar (Chuvienco, 2010).

Firma espectral: Forma peculiar de reflejar o emitir energía de un determinado objeto o cubierta. Está afectadas por las características físicas o químicas del objeto que interaccionan con la energía electromagnética, y varía según las longitudes de onda (Chuvienco, 2010).

Infrarrojo: Porción del espectro comprendida entre 0,7 y 100 micras, que tiene gran importancia para estudios de teledetección. Normalmente suele dividirse en infrarrojo cercano, medio y lejano. Este último también se conoce como infrarrojo térmico (Chuvienco, 2010).

Landsat: Serie de satélites construida por NASA dedicados específicamente a la detección de recursos naturales (Chuvienco, 2010).

Longitud de onda: Es la medida de la distancia que separa dos valores culminantes entre sucesivas ondas (Chuvienco, 2010).

Número digital: Valor entero que traduce numéricamente la intensidad radiométrica recibida por un sensor óptico-electrónico (Chuvienco, 2010).

Píxel: Derivado del inglés "picture element". Es el elemento pictórico más pequeño de las imágenes que es susceptible de ser procesado (Chuvienco, 2010).

Reflectividad: Porcentaje de radiación incidente que es reflejada por una superficie bidimensional (Chuvienco, 2010).

Resolución: La resolución es la medida de la habilidad de un sistema sensor para discriminar información dentro de la imagen. Refiere al tamaño de la mínima unidad de información en el terreno (espacial), al número de bandas disponibles (espectral), a los niveles de codificación (radiométrica) o a la frecuencia de cobertura (temporal), (Chuvienco, 2010).

Sensor: Cualquier instrumento que detecta energía electromagnética, la convierte en una señal y la presenta en forma susceptible de ser aprovechada para su estudio (Chuvienco, 2010).

Teledetección: Es la técnica que permite obtener información sobre un objeto, área o fenómeno a través del análisis de los datos adquiridos por un instrumento que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno bajo investigación (Chuvienco, 2010).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1 Demarcación Política.

Desde el punto de vista político, la cuenca Jequetepeque comprende a 4 provincias del Departamento de Cajamarca y la provincia de Pacasmayo en La Libertad; las provincias a su vez comprenden los siguientes distritos distribuidos de la siguiente manera:

Provincia de Pacasmayo con los distritos de Guadalupe, San José y Jequetepeque, siendo la ciudad de Guadalupe el mayor centro urbano localizado a 700 Km de Lima
Provincia de San Miguel con los distritos de San Silvestre de Cochán, Llapa, San Miguel, El Prado, Agua Blanca y parcialmente Calquis.

Provincia de Contumazá con los distritos de Contumazá, Chilete, Santa Cruz de Toledo, Tantarica Yonan y parcialmente Cupisnique.

Provincia de San Pablo con los distritos de Tumbaden, San Pablo, San Bernardino y San Luis; Provincia de Cajamarca con los distritos de Chetilla, Magdalena, San Juan, Asunción y parcialmente Cajamarca y Jesús, (ver mapa 1).

3.1.2 Demarcación Hidrográfica.

La cuenca del río Jequetepeque pertenece a la Vertiente del Pacífico y tiene sus límites con las siguientes cuencas:

Por el Norte: Cuenca Chancay Lambayeque y Marañón

Por el Este: Cuenca Crisnejas.

Por el Sur: Cuenca Chicama.

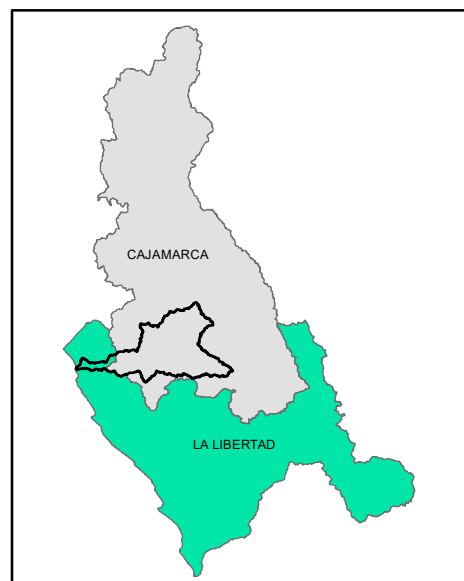
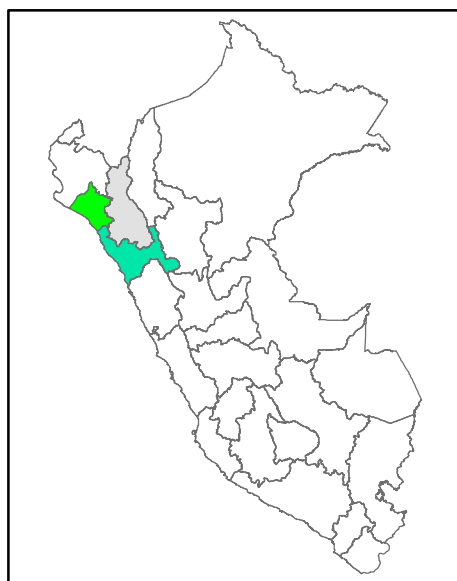
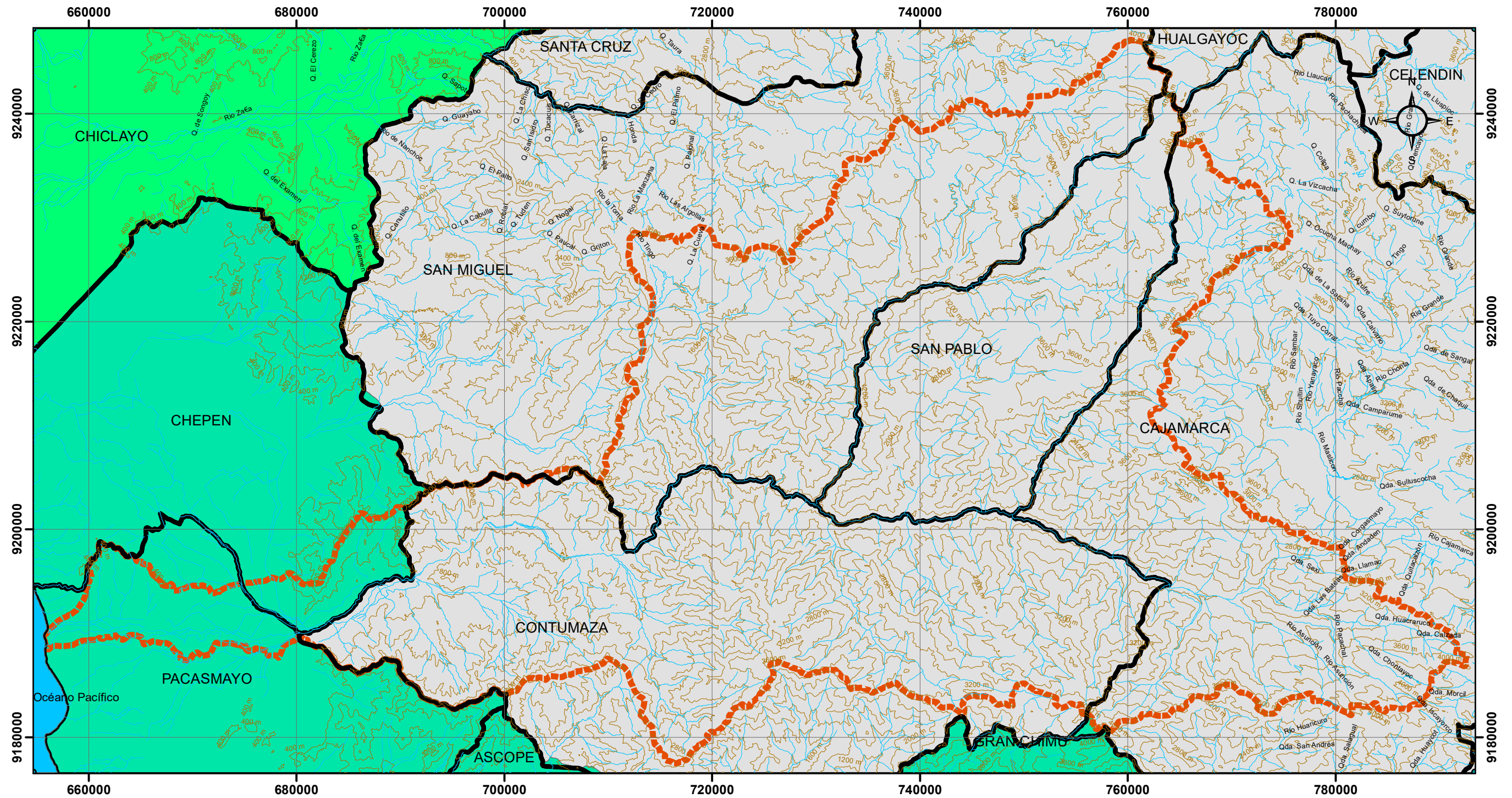
Por el Oeste: Cuenca Zaña y Chaman. (Ver Mapa 2).

3.1.3 Ubicación Geográfica.

La cuenca del río Jequetepeque ocupa una superficie de 3 956 Km² y se ubica en la costa norte del territorio peruano, principalmente en el departamento de Cajamarca y parte de La Libertad, enmarcada en la zona 17S con Datum WGS 84, comprendida entre las siguientes coordenadas de referencia. (Ver tabla 02)

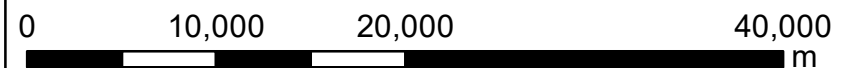
Tabla 2: Coordenadas de referencia UTM

Vértices	Latitud	Longitud
1	9248175	654675
2	9248175	793425
3	9176578	793425
4	9176578	654675



SIMBOLOGÍA

- LIMITE DE LA CUENCA JEQUETEPEQUE
- DRENAJE
- CURVAS A NIVEL CADA 400m
- OCÉANO PACÍFICO



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984

LEYENDA

- LIMITES PROVINCIALES
- LÍMITE DEPARTAMENTAL**
- CAJAMARCA
- LA LIBERTAD
- LAMBAYEQUE



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
 FACULTAD DE INGENIERIA - E.A.P.I.G

TESIS: ANÁLISIS MULTIESPECTRAL MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES PARA IDENTIFICAR ZONAS DE RECARGA HIDRICA SUBTERRANEA EN LA CUENCA JEQUETEPEQUE

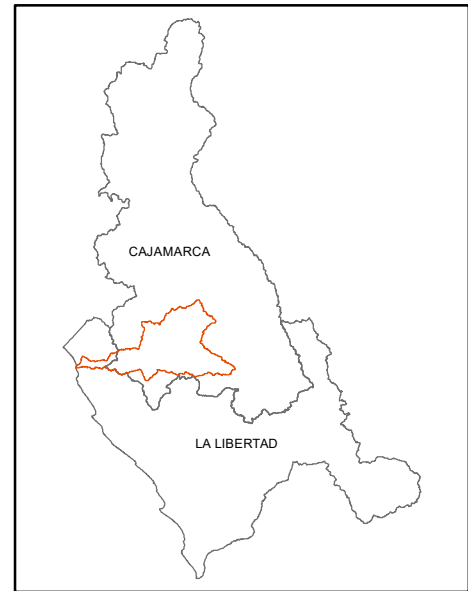
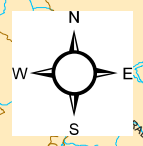
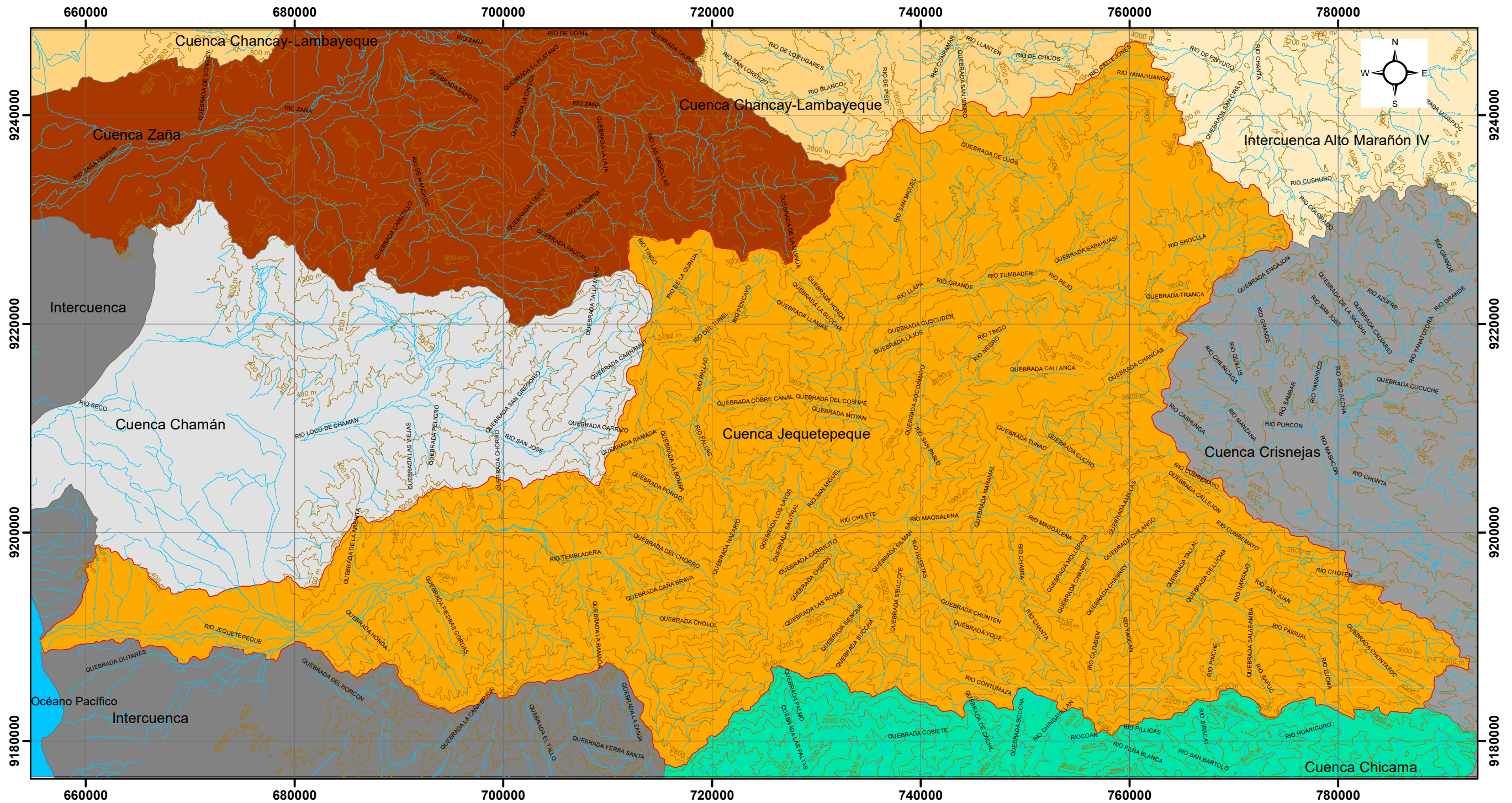
MAPA: DEMARCACIÓN POLITICA

TESISTA: BACH. DÍAZ CRUZ, SILVIA ROSMERI

ASESOR: MCs.ING. CRISPÍN ZENÓN QUISPE MAMANI

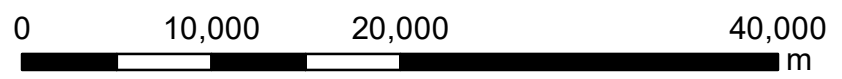
DATUM: WGS 84 - ZONA 17S ESC: 1/ 400 000 FECHA: Cajamarca 2018 FUENTE: ANA, 2015.

MAPA:
01



SIMBOLOGÍA

- CURVAS A NIVEL CADA 400m
- DRENAJE
- OCEANO PACÍFICO
- LIMITE DE LA CUENCA JEQUETEPEQUE



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984

LEYENDA CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Cuenca Chamán	Cuenca Jequetepeque
Cuenca Chancay-Lambayeque	Cuenca Zaña
Cuenca Chicama	Intercuenca
Cuenca Crisnejas	Intercuenca Alto Marañón IV



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
 FACULTAD DE INGENIERIA - E.A.P.I.G

TESIS:	ANÁLISIS MULTIESPECTRAL MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES PARA IDENTIFICAR ZONAS DE RECARGA HIDRICA SUBTERRANEA EN LA CUENCA JEQUETEPEQUE	MAPA:	02				
MAPA:	DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA						
TESISTA:	BACH. DÍAZ CRUZ, SILVIA ROSMERI						
ASESOR:	MCs.ING. CRISPÍN ZENÓN QUISPE MAMANI						
DATUM:	WGS 84 - ZONA 17S	ESC:	1/400 000	FECHA:	Cajamarca 2018	FUENTE:	ANA, 2015.

3.1.4 Clima, Vegetación, Unidades Hidrográficas, Geología de la cuenca del río Jequetepeque.

3.1.4.1 Clima

La cuenca del río Jequetepeque debido a sus características orográficas, la gradiente altitudinal y los vientos húmedos que ingresan a los valles, son detenidos por las elevaciones de la meseta andina, presenta dos sectores claramente diferenciados; una parte baja y una parte alta. La cuenca alta puede clasificarse como de clima húmedo, donde ocurren la mayor parte de las precipitaciones que elevan notoriamente el caudal del río Jequetepeque, debido a la altura su cobertura vegetal es limitada a la poca vegetación altoandina, se distingue con precipitaciones anuales entre 299 y 1472 mm, que en general ocurre en el periodo húmedo entre diciembre a abril, y un periodo seco, de junio a octubre, con escasas lluvias. La cuenca baja es árida, sin vegetación, salvo aquellas zonas bajo riego ubicadas en el valle, las precipitaciones, en general son escasas (menos de 96 mm anuales) y se presentan casi siempre en los meses de verano, concentrándose en febrero y marzo y pueden ser muy intensas durante la presencia del Fenómeno El Niño en la Costa Norte del Perú (ANA, 2015).

En función a las temperaturas, los meses de febrero a marzo tiene un promedio de 26°C, julio, agosto y setiembre con un promedio de 18°C. Conforme aumenta la altura a 4,000 m.s.n.m, la temperatura disminuye hasta llegar a 10° C. Los cielos son claros y sin turbulencia. La precipitación aumenta con la altura (ANA, 2015).

3.1.4.2 Cobertura Vegetal

La cobertura y el uso de la tierra están referidas a los rasgos o cuerpos que se hallan sobre la superficie terrestre, los mismos que son utilizados por la población para satisfacer sus necesidades de supervivencia de acuerdo a sus características sociales, culturales y económicas; estos rasgos están constituidos por la vegetación natural, cultivos, centros poblados, infraestructura, entre otros y cuya distribución es mostrada en la tabla 3 (ANA, 2015).

Tabla 3: Tipos de cobertura vegetal en la cuenca del río Jequetepeque.

SIMBOLOGÍA	DESCRIPCIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL	AREA	AREA	%
AU	Tierras con áreas urbanas	10.70	1066.30	0.30%
BN	Tierras con bosques naturales	0.20	17.20	0.00%
BN-VA	Tierras con bosques naturales y vegetación arbustiva	21.50	2147.20	0.50%
BS	Tierras con bosque seco	510.90	51086.30	12.90%
CA-CP	Tierras con cultivos agrícolas y cultivos permanentes	197.90	19792.90	5.00%
CA-PN	Tierras con cultivos agrícolas y pastos naturales	43.20	4323.00	1.10%
CA-VA	Tierras con cultivos agrícolas y vegetación arbustiva	144.10	14414.40	3.60%
CA-VE	Tierras con cultivos agrícolas, vegetación escasa y afloramientos rocosos	74.90	7488.80	1.90%
F	Tierras con plantaciones forestales	174.60	17455.20	4.40%
F-CA	Tierras con plantaciones forestales y cultivos agrícolas	15.60	1564.60	0.40%
F-PN	Tierras con plantaciones forestales y pastos naturales	13.10	1312.20	0.30%
Lag	Cuerpos de agua	0.90	86.30	0.00%
M	Mosaico de cultivos, pastos y vegetación arbustiva	686.30	68627.40	17.30%
PC-CA	Tierra con pastos cultivados y cultivos agrícolas	426.40	42638.10	10.80%
PC-VA	Tierras con pastos cultivados y vegetación arbustiva	27.80	2784.40	0.70%
PN	Tierras con pastos naturales	51.10	5110.70	1.30%
PN-VA	Tierras con pastos naturales y vegetación arbustiva	182.20	18216.30	4.60%
PN-VE	Tierras con pastos naturales, vegetación escasa y afloramientos rocosos	298.20	29820.00	7.50%
Rs	Reservorio	13.20	1324.40	0.30%

Fuente: ANA, 2015.

SIMBOLOGÍA	DESCRIPCIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL	AREA	AREA	%
TD	Tierras degradadas	18.20	1819.90	0.50%
VA	Tierras con vegetación arbustiva	64.50	6450.40	1.60%
VA-VE	Tierras con vegetación arbustiva, vegetación escasa y afloramientos rocosos	611.00	61102.20	15.40%
VE	Tierras con vegetación escasa y afloramientos rocosos	369.90	36994.20	9.40%
TOTAL		3956.40	395642.60	100.00%

Fuente: ANA, 2015.

Tierras Urbanas (AU)

Constituidos por el casco urbano tanto pertenecientes a la cuenca. Cubren una extensión de 10.66 km². Estas ciudades se encuentran interconectadas a través de la red vial nacional, departamental y vecinal, que facilitan el intercambio comercial y otras actividades, no solo al interior de los departamentos, sino también con otros departamentos del Perú, llegando hasta el nivel internacional (ANA, 2015).

Tierras con Bosques Naturales (BN)

Estos bosques naturales (BN: 100%), están conformados por especies nativas de árboles y arbustos brindando una cobertura bastante densa a estos espacios; en su interior albergan una importante biodiversidad de flora y fauna silvestre de un alto valor bioecológico (ANA, 2015).

Tierras con Bosques Naturales y Vegetación Arbustiva (BN-VA)

Es una asociación cuyo espacio está conformado por bosques naturales y vegetación arbustiva (BN: 50% y PN: 50%). Constituyen ecosistemas importantes que también albergan importantes especies de flora y fauna. Esta asociación ocupa una extensión 21.47 km², que representa el 0.54 % del área de la cuenca (ANA, 2015).

Tierras con Bosque Seco (BS)

Estas unidades de bosques secos (BS: 100%), estos bosques están constituidos por árboles y arbustos que se presentan ligeramente defoliados la mayor parte del año, para tornarse verdes durante el periodo de lluvias en estas zonas; el clima dominante es seco, abrigado y con bajos niveles de precipitación. Cubren un área de 510.86 km², que representa el 12.91 % del área de la cuenca (ANA, 2015).

Tierras con Cultivos Agrícolas y Cultivos permanentes (CA-CP)

Se trata de una asociación ocupada por cultivos agrícolas y cultivos permanentes principalmente frutales (CA: 50% y CP: 50%). Esta asociación se localiza en pequeños valles abrigados. Esta asociación ocupa una extensión de 197.93 km², que representa el 5.00 % del área de la cuenca (ANA, 2015).

Tierras con Cultivos Agrícolas y Pastos Naturales (CA-PN)

Esta asociación se encuentra ocupada por cultivos agrícolas y pastos naturales (CA: 50% y PN: 50%). Esta asociación mayormente se localiza en las partes altas de la cuenca, donde los principales cultivos son la papa, trigo, cebada, ocas y ollucos; y los pastos naturales representados mayormente por un estrato herbáceo principalmente de gramíneas de géneros diversos. Esta asociación ocupa una extensión de 43.23 km², que representa el 1.09 % del área de la cuenca (ANA, 2015).

Tierras con Cultivos Agrícolas y vegetación Arbustiva (CA-VA)

Se trata de una asociación muy importante, que en forma aislada cubre casi toda la superficie de la cuenca; se encuentra cubierto por cultivos agrícolas propios de la zona y vegetación arbustiva (CA: 50% y VA: 50%). Esta asociación se encuentra distribuida en extensiones variables, sobre todo en aquellas áreas donde se ha ampliado la frontera agrícola y está ocupando un paisaje heterogéneo de relieve mayormente ondulado. Los cultivos agrícolas son propios de cada zona y ambiente ecológico, mientras que la vegetación arbustiva está constituida por arbustos diversos que se cubre de verde y tiene mayor densidad durante la época de lluvias. Esta asociación ocupa una extensión de 144.14 km², que representa el 3.64 % del área de la cuenca (ANA, 2015).

Tierras con Cultivos Agrícolas, Vegetación Escasa y Afloramientos Rocosos (CA-VE)

Esta asociación está constituida por cultivos agrícolas, vegetación escasa y afloramientos rocosos (CA: 50% y VE: 50%). Los cultivos agrícolas en este caso están constituidos por cereales por estar ubicados en suelos con pendientes pronunciadas y de escasa profundidad efectiva. Esta asociación ocupa una extensión de 74.89 km², que representa el 1.89 % del área de la cuenca (ANA, 2015).

Tierras con Plantaciones Forestales (F)

Las plantaciones forestales en la cuenca son muy escasas, son pocos los esfuerzos que se vienen haciendo por parte de las instituciones públicas y privadas por reforestar nuestras laderas. Esta unidad ocupa una extensión de 174.55km², que representa el 4.41 % del área de la cuenca (ANA, 2015).

Tierras con Plantaciones Forestales y Cultivos Agrícolas (F-CA)

Esta asociación es relativamente de poca extensión en la cuenca, está constituida por cultivos agrícolas y plantaciones forestales (CA: 50% y F: 50%). Esta asociación ocupa una extensión de 15.65 km²., que representa el 0.40 % del área de la cuenca (ANA, 2015).

Tierras con Plantaciones Forestales y Pastos Naturales (F-PN)

Esta asociación está representada también por una sola unidad en cuyo espacio se encuentra plantaciones forestales y pastos naturales (F: 50% y PN: 50%). Las plantaciones forestales son de pinos y eucaliptos y los pastos naturales están representados por diversos géneros de la familia de las gramíneas. Esta asociación ocupa una extensión de 13.12 km², que representa el 0.33 % del área de la cuenca (ANA, 2015).

Cuerpos de Agua (Ca)

Esta unidad se encuentra constituida por lagunas; algunas de ellas, se localizan en el ecosistema de Páramo; pero la gran mayoría se encuentran formando parte del ecosistema denominado Jalca; todas ellas de gran importancia, pues albergan una alta Biodiversidad en flora y fauna silvestre que le otorgan un Plus para seguir

siendo importantes centros turísticos de la cuenca. Cubren una extensión de 0.86 km², que representa el 0.02 % del área de la cuenca (ANA, 2015).

Tierras con Mosaico de cultivos, pastos y vegetación arbustiva (M)

Los cultivos agrícolas por razones de parcelación de la propiedad (tenencia de tierras), de pérdida de la capacidad productiva de los suelos y sobre todo debido a la variabilidad de estos, así como a la falta de agua de riego, y a la fisiografía heterogénea de la zona, en su gran porcentaje, no se encuentran solos, si no asociado a pastos y a vegetación arbustiva. Estas unidades se encuentran ocupadas por suelos moderadamente desarrollados, de características favorables para la instalación de cultivos propios de la zona, pero en su mayor extensión conducidos al secano. Los cultivos que predominan en estos mosaicos son el trigo, la cebada y en menor extensión el maíz, la papa, el centeno, oca y ollucos, la mayor parte de los cuales son utilizados para autoconsumo. En las unidades de mosaicos acompañan a los cultivos los pastos naturales en mal estado de desarrollo, donde predominan las gramíneas, la mayor parte de las cuales son especies palatables para el ganado. De igual manera en estos mosaicos se tiene vegetación arbustiva que progresivamente se viene deforestando para ampliar la frontera agrícola, así como para ser usado como leña por las familias campesinas. Esta unidad ocupa una extensión 686.27 km², que representa el 17.35 % del área de la cuenca (ANA, 2015).

Tierras con Pastos Cultivados y Cultivos Agrícolas (PC-CA)

Esta asociación se encuentra ocupada por cultivos agrícolas y pastos cultivados (CA: 50% y PC: 50%). Los cultivos agrícolas están representados por aquellos cultivos propios de cada lugar, como maíz, papa y los pastos cultivados mayormente representados por la asociación rye grass más trébol blanco. Esta asociación ocupa una extensión de 426.38 km², que representa el 10.78 % del área de la cuenca (ANA, 2015).

Tierras con Pastos Cultivados y Vegetación Arbustiva (PC-VA)

Esta asociación está constituida por pastos cultivados y vegetación arbustiva (PC:50% y VA: 50%). Los pastos cultivados son rye grass y trébol blanco, y la vegetación arbustiva está constituida por vegetación herbácea relativamente

densa. Esta asociación ocupa una extensión de 27.84 km², que representa el 0.70 % del área de la cuenca (ANA, 2015).

Tierras con Pastos Naturales (PN)

Estos pastos naturales, lo ubicamos principalmente en las zonas altas de la cuenca. Existen otras unidades de menor extensión que por el nivel de escala se encuentran asociadas a otro tipo de cobertura. El tipo de cobertura que cubre estos espacios, en su totalidad, son pastos naturales (PN:100%), en su mayoría de la familia de las gramíneas, con predominancia de los géneros *Stypa*, *Eragrostis*, *Calamagrostis*, *Festuca*, etc. En estas zonas los registros de precipitación son mayores y están alrededor de los 800 a 1000 mm. Promedio anual, lo cual garantiza el equilibrio natural de este ecosistema. Estos pastos naturales se encuentran en laderas de los principales cerros de este piso ecológico. Esta unidad ocupa una extensión de 51.11 km², que representa el 1.29 % del área de la cuenca (ANA, 2015).

Tierras con Pastos Naturales y Vegetación Arbustiva (PN-VA)

Esta asociación está constituida por pastos naturales y vegetación arbustiva (PN: 50% y VA: 50%). Esta asociación ocupa una extensión de 182.16 km², que representa el 4.60 % del área de la cuenca (ANA, 2015).

Tierras con Pastos Naturales, Vegetación Escasa Afloramientos Rocosos (PN-VE)

Esta asociación está constituida por pastos naturales, tierras con escasa vegetación y presencia de afloramientos rocosos (PN: 50% y VE: 50%). La mayor parte de estas unidades se ubican en zonas altas con escasa cobertura vegetal mayormente pastos naturales en mal estado de desarrollo asociado con afloramientos rocosos y suelos esqueléticos y muy erosionados. Esta asociación ocupa una extensión de 298.20 km², que representa el 7.54 % del área de la cuenca (ANA, 2015).

Tierras degradadas (TD)

Se trata de espacios alterados por trabajos de exploración y explotación minera, que incluye tajos, accesos, podsoil, Spoil, pads, construcciones, campamentos y explotaciones a cielo abierto que han alterado el paisaje natural de estos

ecosistemas altoandinos. Se espera que todos estos espacios sean revegetados, acondicionando el paisaje para la recuperación de la flora y fauna anteriormente existente. Esta unidad ocupa una extensión de 18.20 km², que representa el 0.46 % del área de la cuenca (ANA, 2015).

Tierras con Vegetación Arbustiva (VA)

Esta categoría está formada en su totalidad por un estrato de vegetación arbustiva en partes bastante densa, con una cobertura herbácea que crece abundantemente en la época de lluvias; ocupan un paisaje ligeramente accidentado, de pendientes pronunciadas. Las unidades se encuentran cortadas por pequeñas quebradas y cárcavas producto de la erosión severa de estos lugares. La mayor parte del año se evidencia que estos arbustos se encuentran en mal estado de desarrollo, producto de las sequías prolongadas; sin embargo, durante el periodo de lluvias la vegetación recobra su verde intenso. Esta unidad está ocupada en su totalidad por una vegetación arbustiva (VA: 100%), que mayormente es utilizada por los pobladores del lugar como leña para preparar sus alimentos, en otros lugares se viene deforestando para ganar espacio y estas tierras sean incorporadas a la actividad agrícola, acelerando de esta manera el proceso erosivo de los suelos. Esta unidad ocupa una extensión de 64.50 km², que representa el 1.63 % del área de la cuenca (ANA, 2015).

Tierras con Vegetación Arbustiva, Vegetación Escasa y Afloramientos Rocosos (VA-VE)

Se trata de la asociación más grande en toda la cuenca, ocupada por vegetación arbustiva más tierras de escasa vegetación y afloramientos rocosos (VA: 50% y VE: 50%) en las zonas altas del territorio. La vegetación arbustiva está constituida por arbustos diversos bastante densos, sobre todo durante el periodo de lluvias; mientras que el resto de las unidades están cubiertas por escasa vegetación con presencia de afloramientos rocosos. Esta asociación ocupa una extensión de 611.02 km², que representa el 15.44 % del área de la cuenca (ANA, 2015).

Tierras con Vegetación Escasa y Afloramientos Rocosos (VE)

Esta unidad está constituida por todas aquellas laderas desérticas y cerros, incluye también los afloramientos rocosos y terrenos desnudos o con escasa vegetación (VE: 100%); constituyen todas aquellas áreas marginales para todo tipo de actividades agrícolas, pecuarias y forestales, debido a las limitantes de clima y suelo. En esta unidad se observan numerosas cárcavas que forman un paisaje fisiográfico muy heterogéneo de laderas y cerros, de pendientes que varían desde moderadamente empinados hasta muy empinadas. La mayor parte de las unidades de esta categoría se ubica en las zonas altas de la cuenca hidrográfica. Esta unidad ocupa una extensión de 369.94 km², que representa el 9.35 % del área de la cuenca (ANA, 2015).

3.1.4.3 Unidades hidrográficas

La cuenca del río Jequetepeque (que comprende a nueve subcuencas descritas en este Estudio) tiene un área total de 3 956 Km², el perímetro una longitud total de 655,4 Km y la altitud media es de 577,2 msnm. El cauce del río Jequetepeque presenta una longitud de recorrido de 175 Km, presenta una pendiente promedio de 1,7% y las descargas son continuas durante todo el año (ANA, 2015).

El río Jequetepeque, cuyos principales tributarios provienen de zonas montañosas de ambos márgenes, se origina por la unión de los ríos Chilete y San Miguel, tiene tributarios como los ríos: Magdalena, Chanta, Huertas, Contumaza, Llamínchan, en la parte baja destacan el río Pallac y Chiminote. La presa Gallito Ciego se ubica aguas abajo de la estación hidrométrica Yonan (ANA, 2015).

Tabla 4: Unidades hidrográficas

Nombre de la Unidad Hídrica	Área Km²	Área %	Rio Principal
Bajo Jequetepeque	660.5	16.7 %	Tramo del rio jequetepeque
Chausis	205.9	5.2 %	Quebrada Chiminote
Medio Bajo Jequetepeque	153.3	3.9 %	Tramo del rio jequetepeque
Pallac	236.9	6.0 %	Rio Pallac
Medio Jequetepeque	144.3	3.6 %	Tramo del rio jequetepeque
Contumaza	187.7	4.7 %	Rio contumaza
Medio Alto Jequetepeque	3.6	0.1 %	Tramo del rio jequetepeque
San Miguel	1041.9	2.63 %	Rio San Miguel
Alto Jequetepeque	1322.2	33.4 %	Rio Magdalena
TOTAL	3956.4	100 %	

Fuente: ANA, 2015.

3.1.4.4 Geología de la cuenca del rio Jequetepeque.

Mesozoico

Cretácico Inferior

Las series del Cretácico inferior están representadas por el Grupo Goyllarisquizga, que tiene como litología principal areniscas cuarzosas, arcillitas y delgadas capas de carbón en la parte inferior de la Formación Chimú; arcillitas grises en la base, calizas margosas fosilíferas y areniscas de grano fino gris oscuro con aportes calcáreos pertenecientes a la Formación Santa. La unidad continúa con intercalación de areniscas rojizas, de grano fino a medio con lutitas de color gris oscuro que presentan estratificación cruzada y pertenecen a la Formación Carhuaz. La Formación Farrat está compuesta de potentes bancos de areniscas cuarzosas de color blanquecino, totalmente fracturadas, dispuestas en capas gruesas y estratificación cruzada. Además del Grupo Goyllarisquizga, en el Cretácico inferior, se observan areniscas calcáreas, intercaladas con calizas y arcillitas fosilíferas gris oscuras de la Formación Inca, las cuales presentan un color rojizo muy característico, seguida de una secuencia compuesta por intercalación de margas, calizas arenosas gris claras, arcillitas calcáreas arenosas, presencia de abundantes

fósiles de la Formación Chulec. Finalmente, se observa intercalación de calizas con delgados bancos de arcillitas finamente estratificadas, calizas con nódulos silíceos frecuentemente cortadas por venillas de calcita. (INGEMET, 2015).

Cretácico Superior

Está representado por secuencias de margas y calizas con presencia de delgados niveles de arcillitas con fósiles y microfósiles de la Formación Yumagual, se observa secuencia de calizas nodulares macizas seguidas de intercalación de lutitas, margas, de la Formación Mujarrun y el Grupo Quilquiñán, cuyo espesor aproximado es de 500 metros. Finalmente se tiene una secuencia de bancos de calizas macizas de color gris oscuro azulado de la Formación Cajamarca, con sectores donde se observan delgados niveles de arcillitas y margas, y su espesor aproximado se encuentra entre 600 a 720 metros.

Cenozoico

Paleógeno – Neógeno

En la cuenca del río Jequetepeque aflora una variedad de depósitos volcánicos, denominados inicialmente por Cossío (1964) como Formación Calipuy. Este volcanismo es subaéreo, se emplazó entre el Eoceno al Mioceno (Farrar y Noble, 1976; Rivera et al., 2005). Es el producto de un vulcanismo postectónico y representa el magmatismo efusivo que siguió al emplazamiento definitivo del batolito costanero. En la cuenca del río Jequetepeque se localiza en toda la parte central y superior, donde ocurrieron diferentes episodios efusivos y explosivos, que originaron el emplazamiento de numerosos depósitos, (INGEMET, 2015).

Holoceno

Representa los depósitos del Cuaternario reciente. En la cuenca del río Jequetepeque se observan depósitos fluvioglaciares, aluviales, fluviales y eólicos; todos con aspecto detrítico, porosos y no consolidado.

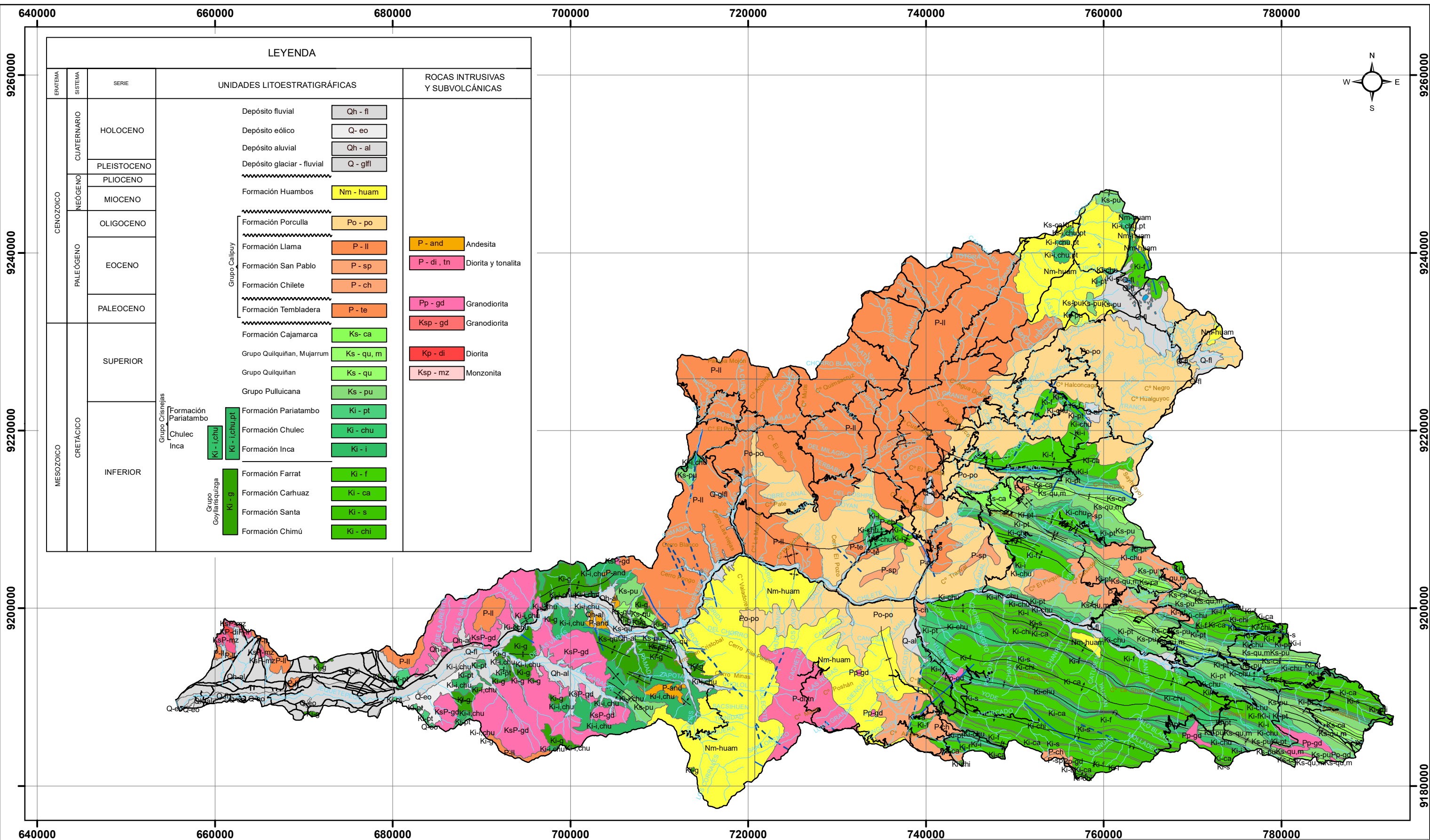
Los depósitos fluvioglaciares se ubican en zonas de planicies elevadas, se observa la presencia de depósitos morrénicos, los cuales presentan una matriz areno-limo-arcillosa con disposición irregular de sus clastos, que van de angulosos a subangulosos. Estos depósitos se encuentran en la parte norte de la cuenca alta (sector El Empalme), su extensión no es muy significativa dentro de la zona de

estudio, pero es importante desde el punto de vista hidrogeológico, tiene grandes condiciones para el almacenamiento y circulación de aguas subterráneas, evidenciado por un gran número de bofedales, aniegos y lagunas que sirven de recarga a los acuíferos subterráneos.

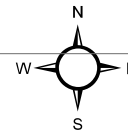
Los depósitos aluviales se ubican en la parte baja de los cerros y en la desembocadura de las quebradas, cuyos materiales predominantes son gravas, cantos y bloques que van desde angulosos a redondeados dentro de una matriz de arena, limo y arcilla. Por su gran extensión representan los depósitos cuaternarios más importantes dentro de la zona de estudio (en el piso de valle), su potencia varía desde unos cuantos metros hasta más de 250 metros. Su importancia radica en que estos depósitos albergan al sistema de acuíferos poroso no consolidado que abarca la planicie costanera de la cuenca Jequetepeque.

Los depósitos fluviales se encuentran en llanuras dejadas por el paso de los ríos. Estos depósitos contienen clastos que van desde subredondeados a redondeados en una matriz areno-limosa. En sectores, se observan bancos de arenas finas, medias, gruesas, así como gravas, cantos rodados y bloques de grandes dimensiones, estos materiales son muy permeables y favorables para el almacenamiento y circulación de aguas subterráneas.

Los depósitos eólicos se ubican en zonas de playa, cercanas al mar, los cuales no constituyen gran extensión, se presentan en forma de dunas de diferentes tamaños y formas, pero de composición permeable, (INGEMET, 2015).



ERATEMA		SERIE	UNIDADES LITOSTRATIGRÁFICAS	ROCAS INTRUSIVAS Y SUBVOLCÁNICAS
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Depósito fluvial (Qh - fl)	
			Depósito eólico (Q - eo)	
			Depósito aluvial (Qh - al)	
	PLEISTOCENO		Depósito glaciar - fluvial (Q - glfl)	
	NEÓGENO	PLIOCENO	Formación Huambos (Nm - huam)	
	PALEÓGENO	OLIGOCENO	Formación Porculla (Po - po)	
		EOCENO	Formación Llama (P - ll)	P - and Andesita
			Formación San Pablo (P - sp)	P - di, tn Diorita y tonalita
			Formación Chilite (P - ch)	
PALEOCENO		Formación Tembladera (P - te)	Pp - gd Granodiorita	
MESOZOICO	SUPERIOR	Formación Cajamarca (Ks - ca)	Ksp - gd Granodiorita	
		Grupo Quiquiñán, Mujarrum (Ks - qu, m)		
		Grupo Quiquiñán (Ks - qu)		
		Grupo Pullucana (Ks - pu)		
	INFERIOR	Formación Pariatambo (Ki - pt)	Kp - di Diorita	
		Formación Chulec (Ki - chu)	Ksp - mz Monzonita	
		Formación Inca (Ki - i)		
		Formación Farrat (Ki - f)		
		Formación Carhuaz (Ki - ca)		



SIMBOLOGÍA		
PLIEGUES	DRENAJE	FALLAS
Anticlinal	LÍMITE DE LA CUENCA JEQUETEPEQUE	De Rumbo
Anticlinal Volcado	ACCESOS	Inversa_W
Sinclinal		Normal
Sinclinal Volcado		Normal Inferida



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
 FACULTAD DE INGENIERIA - E.A.P.I.G

TESIS:	ANÁLISIS MULTIESPECTRAL MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES PARA IDENTIFICAR ZONAS DE RECARGA HIDRICA SUBTERRANEA EN LA CUENCA JEQUETEPEQUE	MAPA:	03
MAPA:	GEOLÓGICO		
TESISTA:	BACH. DÍAZ CRUZ, SILVIA ROSMERI		
ASESOR:	MCs.ING. CRISPÍN ZENÓN QUISPE MAMANI		
DATUM:	WGS 84 - ZONA 17S	ESC:	1 / 400 000
		FECHA:	Cajamarca 2018
		FUENTE:	INGEMMET, 2015.

3.2 PROCEDIMIENTO

3.2.1 Obtención de imágenes satelitales.

Para la obtención de las imágenes satelitales Landsat usadas en la zona se ingresó a la página de la USGS (Instituto Geológico de los Estados Unidos) y corresponden a los barridos Path=9/Row=65 y Path=10/Row=65, (ver figura 7 y 8)., las imágenes seleccionadas son de tipo Landsat 8 con fecha de barrido de julio y agosto del año 2017, que corresponden a la época de estiaje y son imágenes de descarga libre.

3.2.2 Preparación de las imágenes satelitales

3.2.2.1 Unión de las imágenes satelitales.

Se utilizó dos barridos satelitales correspondientes a los meses de julio y agosto del 2017 con Path=9/Row=65 y Path=10/Row=65 respectivamente, debido a que la Cuenca del Jequetepeque abarca una zona extensa. Para lo cual se realizó la unión de las imágenes satelitales, para obtener un análisis uniforme de valores.

El resultado será una única imagen con características uniformes y lista para realizar la corrección atmosférica y radiométrica respectiva. (ver figura 9)

3.2.2.2 Corrección Atmosférica y Radiométrica.

Este proceso permite convertir la información de la imagen original (información comprimida), es decir descomprimir la información contenida en la imagen de tal modo que transforma los Niveles Digitales ND a Niveles de Reflectancia captada por el sensor en el tope de la atmósfera, de tal modo que permite disminuir los efectos de dispersión o absorción causados por la presencia de partículas.

Adicionalmente, se busca remover el efecto de los diferentes ángulos de incidencia de la energía solar y de la distancia Tierra - Sol, que se producen como consecuencia de las diferencias de tiempo de adquisición de las imágenes, realizándose también una ortorectificación y así poder trabajar en coordenadas UTM métricas.

Es conveniente su aplicación en el caso de utilizar imágenes tomadas en diferentes fechas, pues permite normalizar las diferencias de valores de la radiación solar causados por las diferencias de los rangos espectrales entre las bandas de las imágenes.

En general con estas correcciones se busca minimizar los errores que influyen en la radiación o en el valor radiométrico de cada elemento captado en la escena.

Dentro del proceso de corrección atmosférica se aplicó la corrección de neblina y en caso sea necesario el enmascaramiento de nubes de manera posterior, por lo cual es necesario inspeccionar previamente la imagen para detectar la presencia de nubes y/o neblina evidente. Como resultado final de este sub-proceso, se obtiene una imagen en valores de reflectancia que mejora la clasificación espectral de los objetos presentes en la imagen corregida (coberturas de la Tierra) respecto a la imagen original, mejorando los resultados finales del proceso de clasificación digital (ver figura 10 y 11). En la cual se aprecia las gráficas espectrales antes y después de las correcciones realizadas, es decir la variación en función al porcentaje de reflectancia vs la longitud de onda de cada material, una corregidas pasan de valores de información comprimida a valores de información de reflectancia neta.



Figura 7: Imagen multiespectral perteneciente al barrido Path=9 / Row=65.
Fuente: USGS, 2017

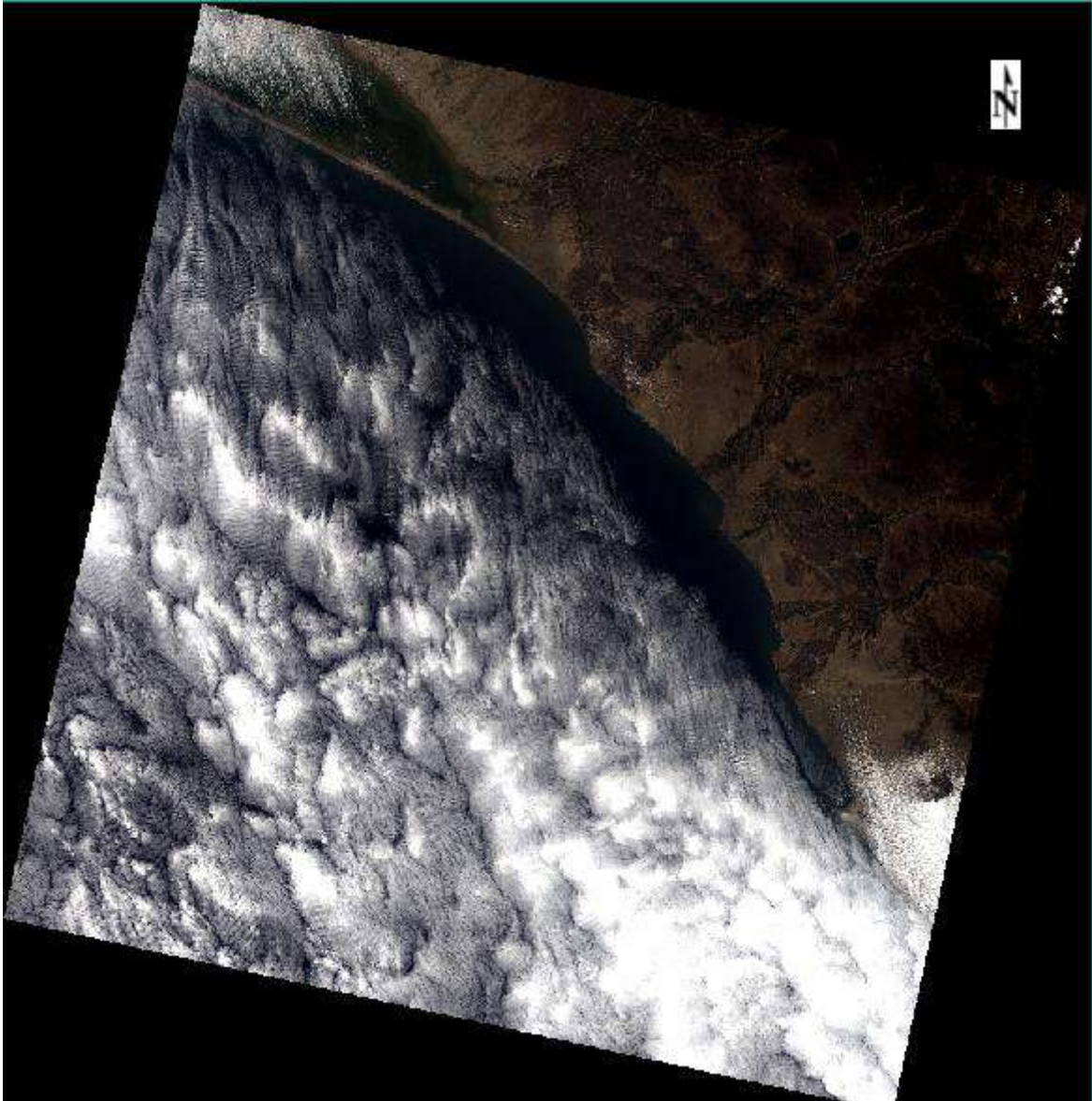


Figura 8: Imagen multiespectral perteneciente al barrido Path=10 / Row=65.
Fuente: USGS, 2017

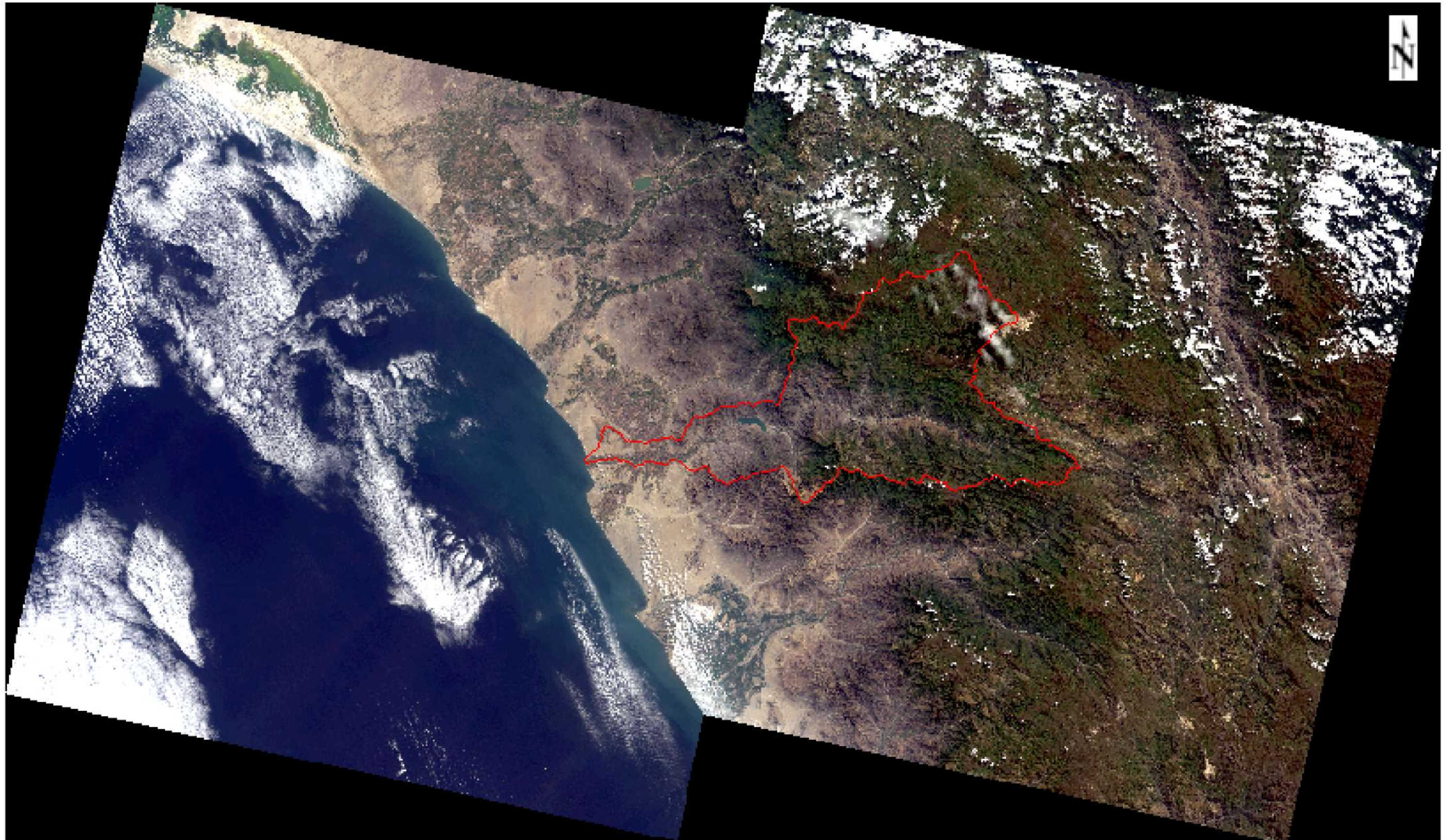


Figura 9: Unión de Imágenes multiespectrales.

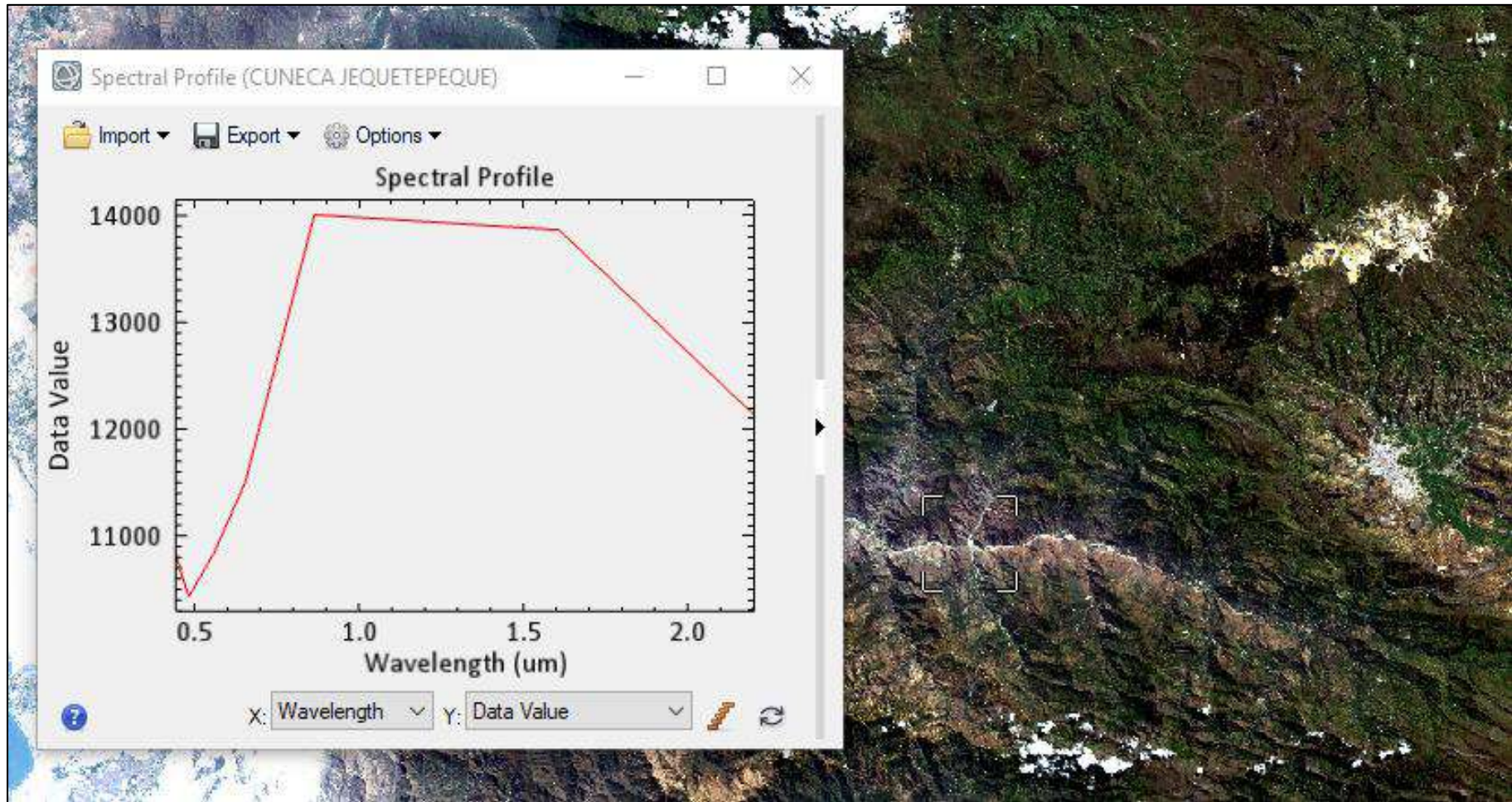


Figura 10: Imagen multispectral antes de la corrección atmosférica y radiométrica

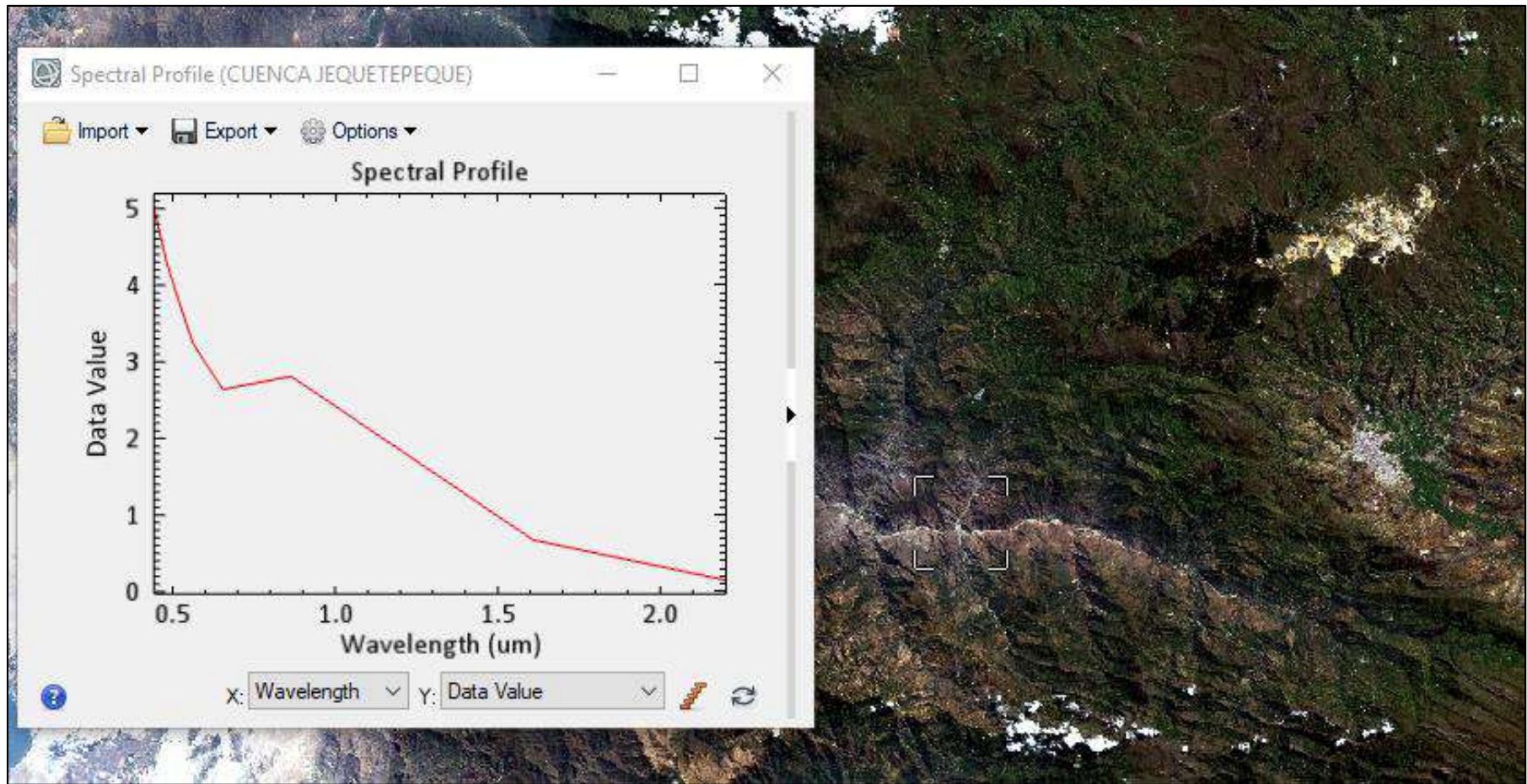


Figura 11: Imagen multispectral después de la corrección atmosférica y radiométrica

3.2.2.3 Remuestreo.

Se homogeniza la resolución espacial y espectral de las imágenes multiespectral, termal y Modelo Digital de Elevaciones (MDE) en función de la banda 8 pancromática de 15m de resolución y así evitar errores de cálculo espectral.

3.2.3 Parámetros de clasificador en árbol

3.2.3.1 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

Este índice será utilizado con la finalidad de clasificar las cubiertas vegetales y determinar la densidad de color verde, partiendo del principio de comportamiento radiométrico de la vegetación, esta razón se produce ya que en la banda RED (banda 4) presenta absorción elevada y una mayor reflectividad con mayor contraste en la NIR (banda 5), esto se plasma en una firma espectral característica codificada a partir del grado de clorofila presente en la vegetación.

La fórmula para la obtención de este índice es la siguiente:

$$NDVI = (B5 - B4) / (B5 + B4)$$

Correspondiente al RED (Banda 4) y NIR (Banda 5) respectivamente, (Ver Figura 12). En la cual se aprecia que las zonas en color blanco representan zonas de vegetación, es decir zonas con mayor reflectividad de clorofila en la banda 5 las cuales serán detalladas posteriormente por su vigor correspondiente a su rango espectral.

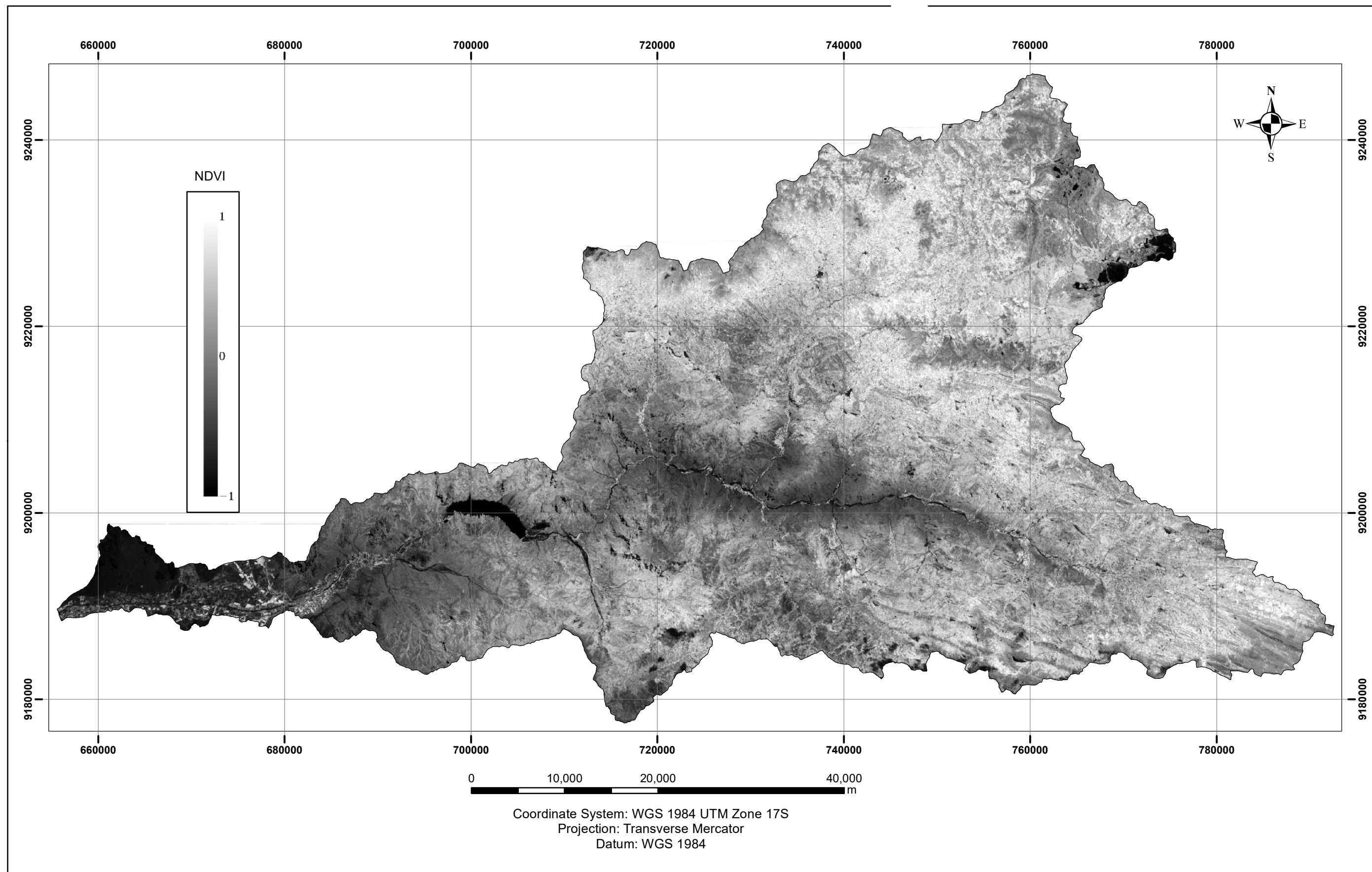


Figura 12: Obtención del índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI)

3.2.3.2 Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI).

Es un subíndice derivado del NDVI, el cual sirve para determinar la cantidad de agua, identificar masas de agua y zonas de elevada saturación de humedad presentes en las diferentes cubiertas de la superficie terrestre.

Este índice oscila entre los valores de -1 a 1.

El NDWI se calculó usando la siguiente ecuación:

$$\text{NDWI} = (B5 - B6) / (B5 + B6)$$

Donde:

NIR corresponde a la banda 5 y SWIR corresponde a la banda 6, (Ver Figura 13). En la cual se aprecia que las zonas en color blanco representan zonas de mayor saturación hídrica superficial las cuales serán detalladas posteriormente por su tipo de cubierta correspondiente a su rango espectral.

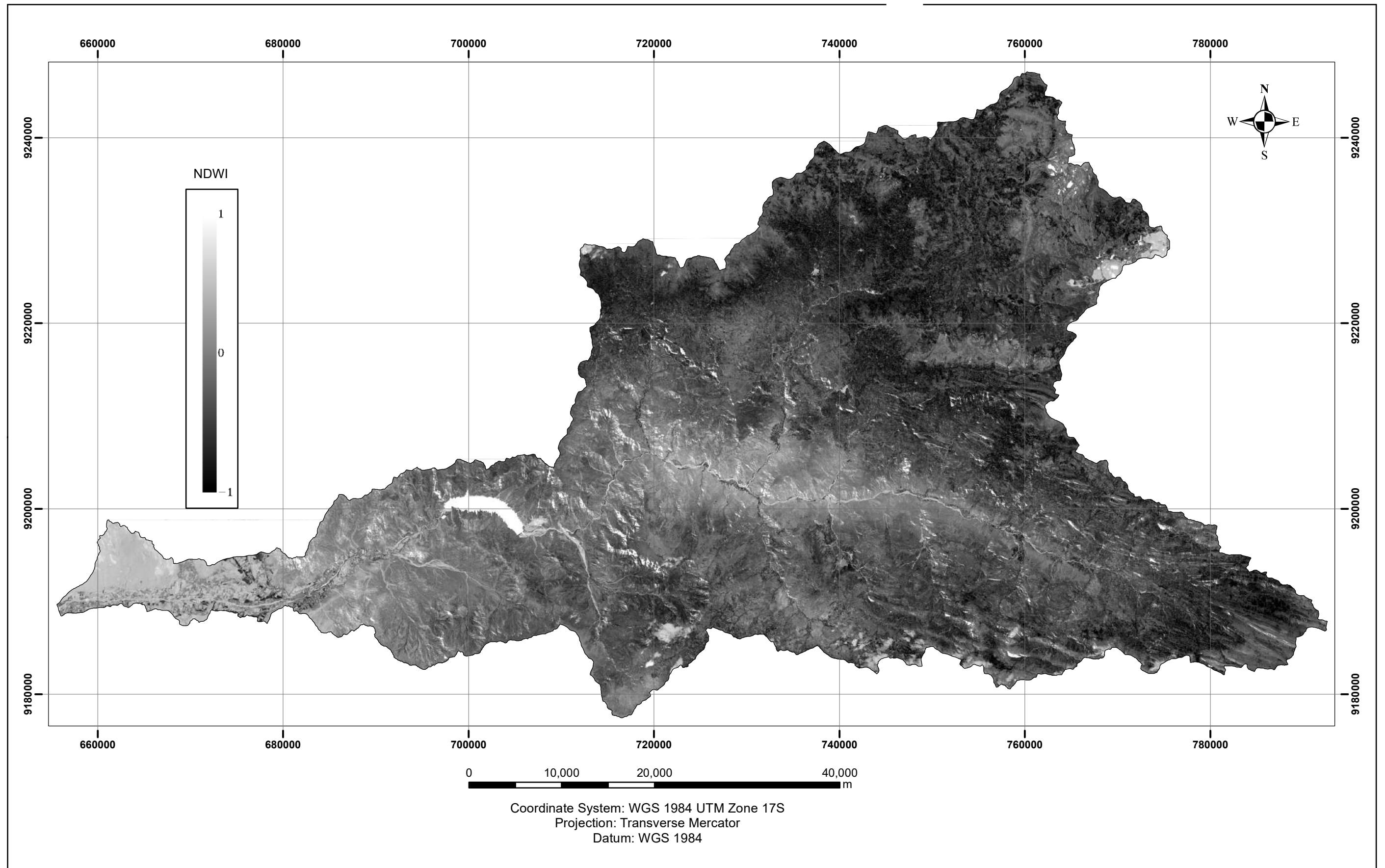


Figura 13: Obtención del índice de agua de diferencia normalizado (NDWI)

3.2.3.3 Temperatura superficial

Las bandas obtenidas por el sensor TIRS pueden ser convertidas en radiancia espectral a temperatura de brillo en grados kelvin (k), usando para ello la constante térmica suministrada en el archivo de metadatos:

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L\lambda} + 1\right)}$$

Donde:

T = Temperatura de brillo aparente

Lλ = Corresponde a la reflectancia en el techo de la atmosfera TOA

K1 = Es la constante de conversión K1 específica para cada banda, dicha constante térmica se suministra en el metadato (K1_CONSTANT_BAND_x, donde x es el número de la banda, 10 o 11)

K2 = Es la constante de conversión K2 específica para cada banda, dicha constante térmica se suministra en el metadato (K2_CONSTANT_BAND_x, donde x es el número de la banda, 10 o 11)

Debido a que el cálculo nos da como resultado temperaturas en grados Kelvin, es necesario al final de la formula restarle el valor 273.15 que es el factor de conversión para grados Celsius. (Ver Figura 14). En la cual se aprecia que las zonas de color blanco corresponden a temperaturas altas y zonas en color negros a zonas bajas de temperatura.

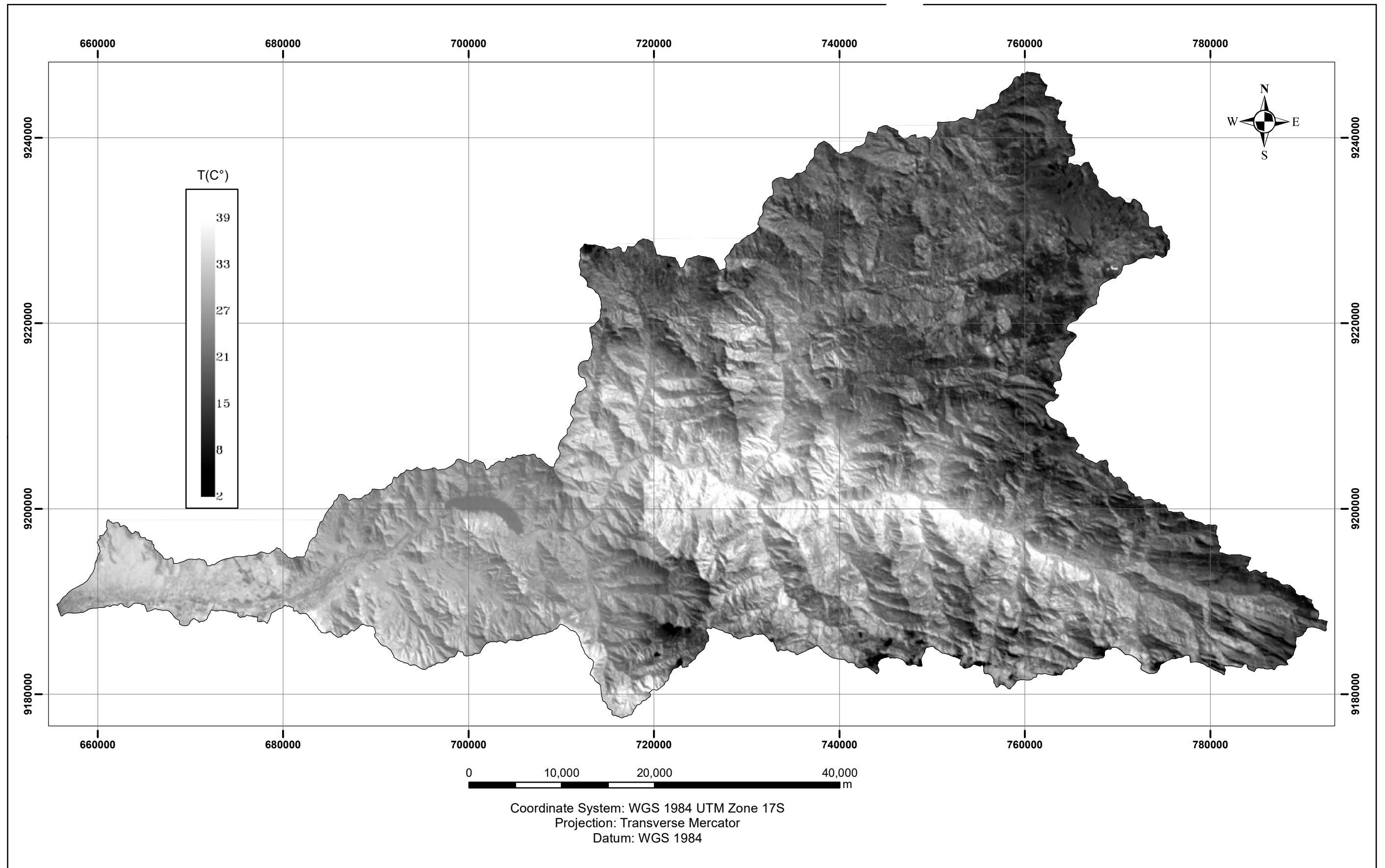


Figura 14: Obtención de la temperatura superficial

3.2.3.4 Pendiente

A partir de la imagen Aster GDEM es posible generar modelos de pendientes de la zona de estudio, por lo cual el detalle de la topografía es importante para la precisión de los datos.

La pendiente nos servirá en la investigación para determinar el grado de potencial de infiltración de agua superficial que juntamente con los parámetros ya mencionados servirá para identificar las zonas de recarga hídrica subterránea.

(Ver Figura 15). En la cual se aprecia que las zonas en color blanco corresponden a zonas con mayor pendiente y coloración negra corresponde a zonas llanas o de baja pendiente, parámetro que será útil para determinar cuáles son las zonas favorables de recarga en función de la pendiente.

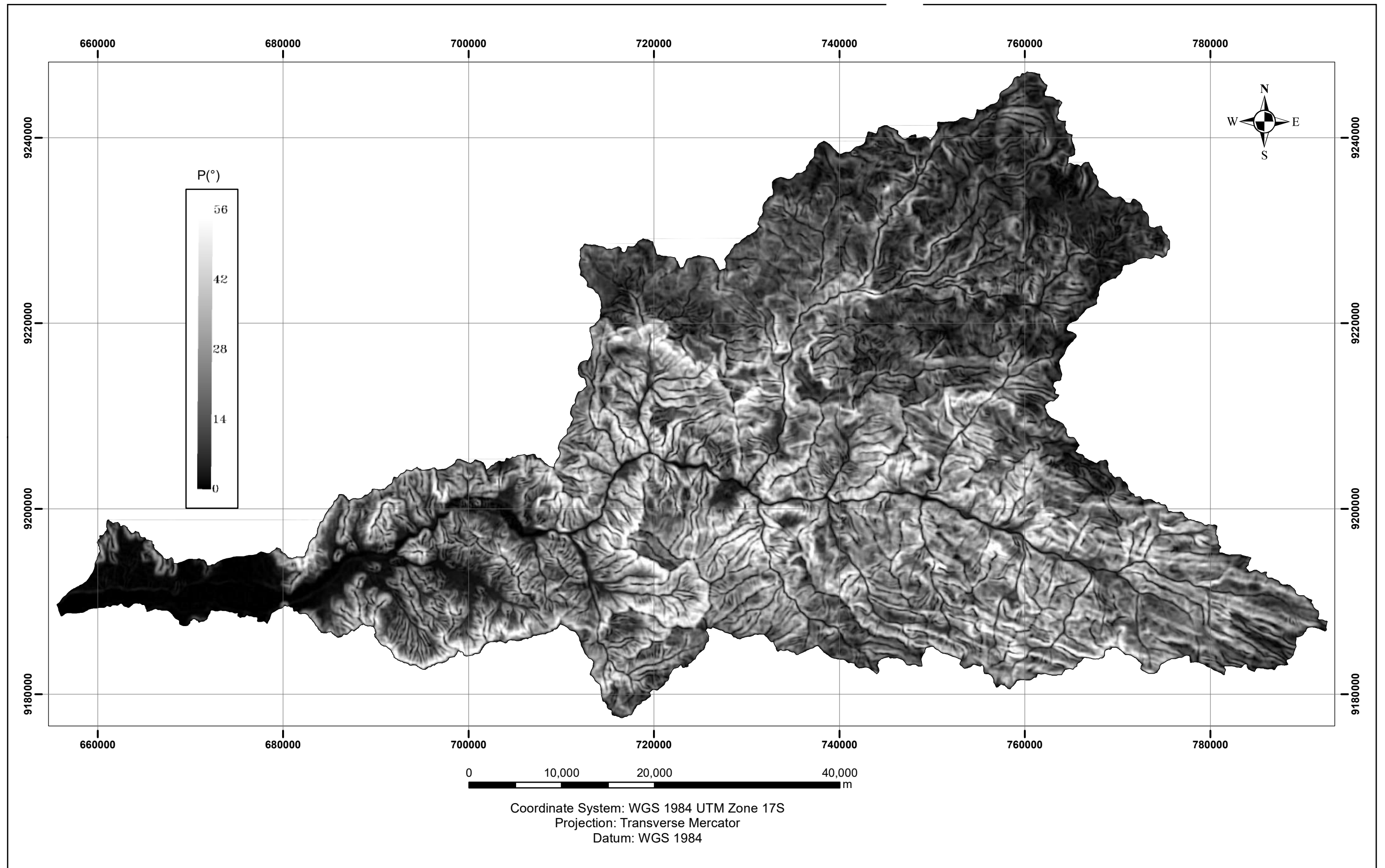


Figura 15: Obtención de las pendientes

3.2.4 Metodología

La investigación será nivel descriptivo, analítico, correlacional, con diseño no experimental-transversal, de naturaleza cualitativa con finalidad aplicada.

La investigación es del nivel:

Descriptivo: Pues la investigación busca describir de manera analítica el comportamiento, propiedades y características de las variables que permitan la ubicación de zonas de recarga hídrica mediante el análisis multiespectral.

Correlacional: Ya que la investigación busca la correlación de las variables pendiente, NDVI, NDWI y temperatura para la localización de zonas de recarga hídrica.

Con diseño:

No experimental: Se utilizará este tipo de diseño pues no se modifica o varía ninguna variable o parámetro, ya que, al captar la información mediante la energía electromagnética, solo se podrá observar las características de las variables correspondientes a los parámetros ya definidos para la búsqueda de zonas de recarga hídrica.

Transversal: Pues Las imágenes satelitales proporcionan información en un punto espacio temporal definido.

Naturaleza: Cualitativa, ya que analizará las cualidades y características de cada parámetro.

Finalidad: Aplicativa, pues generará conocimientos y prototipos de investigación para la mejora de trabajos de recopilación de información y mapeo en campo.

Tabla 5: Clasificación y tipos de investigación.

CLASIFICACIÓN	TIPOS DE INVESTIGACIÓN
Según el nivel	Descriptivo/ Analítico/ Correlacional
Según el diseño	No experimental
Según su naturaleza o modo	Cualitativo
Según la finalidad	Aplicativa

Fuente: Supo, J. (2016).

3.2.4.1 Población de estudio

La población de estudio será en un área de 3956 Km² correspondiente a la cuenca Jequetepeque.

3.2.4.2 Muestra

La cuenca del río Jequetepeque constituidos por su litología, vegetación, drenaje y las firmas espectrales del Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), Temperatura, Pendiente.

3.2.4.3 Unidad de análisis

Zona de recarga hídrica

3.2.4.4 Identificación de variables.

Variables Independientes: Pendiente, Temperatura.

Variables Dependientes: Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI)

3.2.5 Instrumentos de recolección de datos.

Las técnicas utilizables son análisis espectral mediante el árbol de decisiones y la observación, instrumentos como software ArcGIS 10.5 y Envi 5.3, para identificar zonas de recarga hídrica subterránea.

3.3 ANÁLISIS DE PARÁMETROS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DEL CLASIFICADOR EN ÁRBOL.

3.3.1 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

3.3.1.1 Análisis y resultados

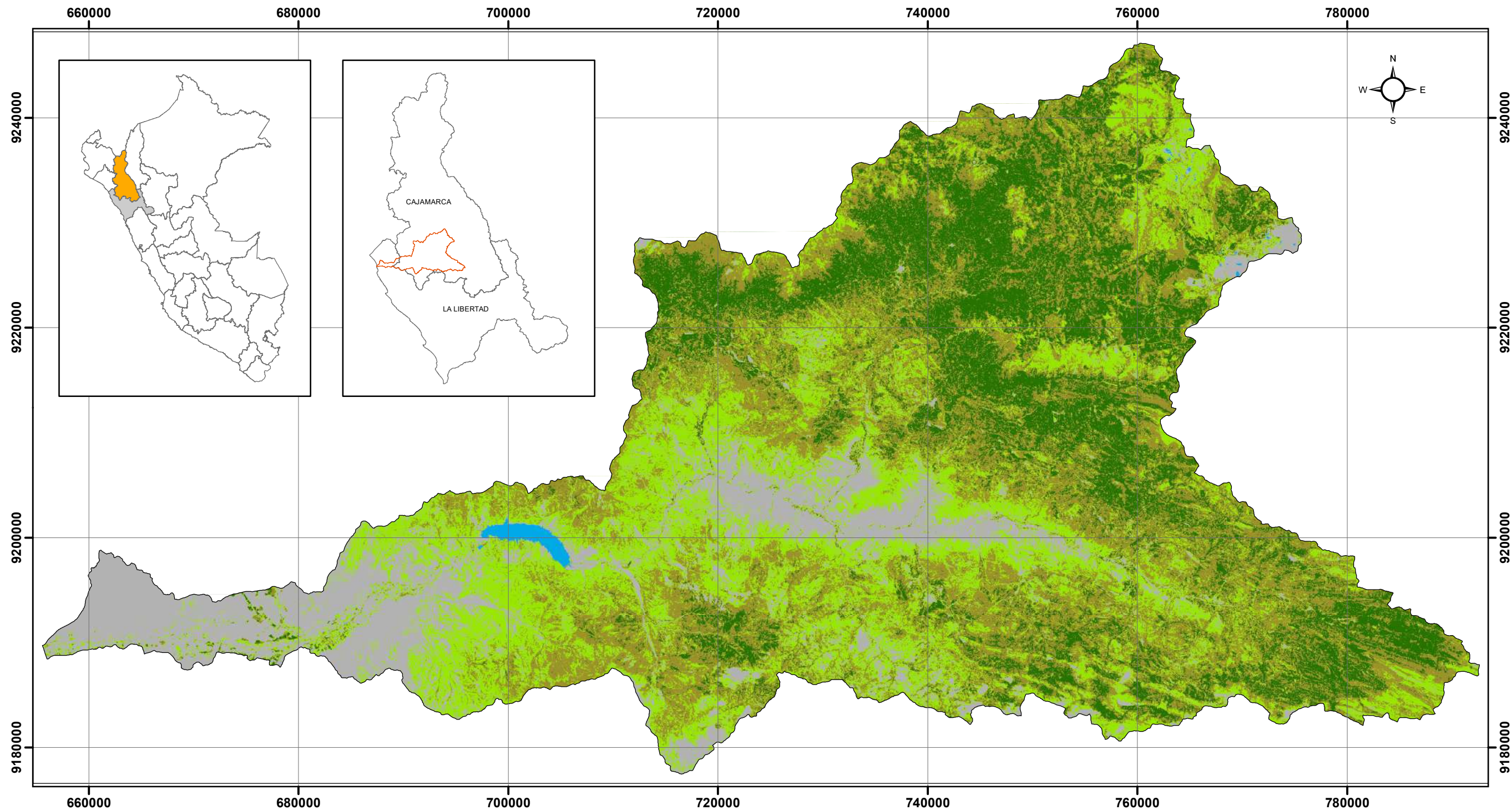
En este parámetro se realizó en primera instancia el análisis visual obtenido a partir de la combinación de bandas 4, 3, 2 de la imagen multiespectral y un análisis espectral a partir de la fórmula ya mencionada, las cuales se procesaron usando el software Envi 5.3.

Dentro del análisis resultante podemos apreciar que el Índice de Vegetación de diferencia normalizada (NDVI), oscila entre los valores de -1 a 1, llegándose a definir los siguientes tipos de vegetación, partiendo del aporte de clorofila reflejado en la banda 5 y absorbida en la banda 4.

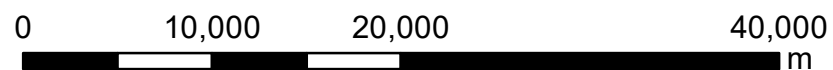
- 0.40 < NDVI < 1.00 Vegetación Vigorosa.
- 0.20 < NDVI < 0.40 Vegetación Abundante.
- 0.00 < NDVI < 0.20 Vegetación Dispersa.
- 0.40 < NDVI < 0.00 Deposito Cuaternario.
- 1.00 < NDVI < -0.40 Lagos y Lagunas (Ver mapa 4).

Tabla 6: Falso color RGB para la clasificación de materiales en NDVI.

Tipo de Cubierta	COLORES RGB		
	R	G	B
Vegetación Vigorosa	38	115	0
Vegetación Abundante	156	146	44
Vegetación Dispersa	152	230	0
Deposito Cuaternario	178	178	178
Lagos y Lagunas	0	169	230



LEYENDA		
NDVI	Tipo de cubierta	RGB
0.40 < NDVI < 1.00	Vegetación Vigorosa.	
0.20 < NDVI < 0.40	Vegetación Abundante.	
0.00 < NDVI < 0.20	Vegetación Dispersa.	
-0.40 < NDVI < 0.00	Deposito Cuaternario.	
-1.00 < NDVI < -0.40	Lagos y Lagunas.	



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
 FACULTAD DE INGENIERIA - E.A.P.I.G

TESIS: ANÁLISIS MULTIESPECTRAL MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES PARA IDENTIFICAR ZONAS DE RECARGA HIDRICA SUBTERRANEA EN LA CUENCA JEQUETEPEQUE

MAPA:

MAPA: INDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI)

04

TESISTA: BACH. DÍAZ CRUZ, SILVIA ROSMERI

ASESOR: MCs.ING. CRISPÍN ZENÓN QUISPE MAMANI

DATUM: WGS 84 - ZONA 17S

ESC: 1/ 400 000

FECHA: Cajamarca 2018

3.3.2 Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI).

3.3.2.1 Análisis y resultados

Gracias a este índice se podrá identificar las potenciales zonas húmedas y así definir diferentes tipos de materiales, pues no sólo se pudo delimitar las evidentes masas de agua y zonas húmedas sino también diferentes tipos de cubiertas.

Para poder identificar estas potenciales zonas húmedas se contó con las pertinentes bandas multiespectrales y la sistemática de trabajo se basa en primera instancia en un análisis visual obtenido a partir de la combinación de bandas 4, 3, 2 de la imagen multiespectral, y el uso de las habituales funciones de álgebra de mapas (fórmula ya detallada), que a partir de un análisis específico permite delimitar cada una de las cubiertas en torno a sus valores espectrales con el fin de disponer de todos los potenciales valores decimales que definan un material. Ver mapa 6, en el cual se aprecia como es definido los rangos espectrales característicos de cada material.

0.60 <NDWI< 1.00 Lagos y Lagunas.

0.20 <NDWI< 0.60 Deposito Aluvial.

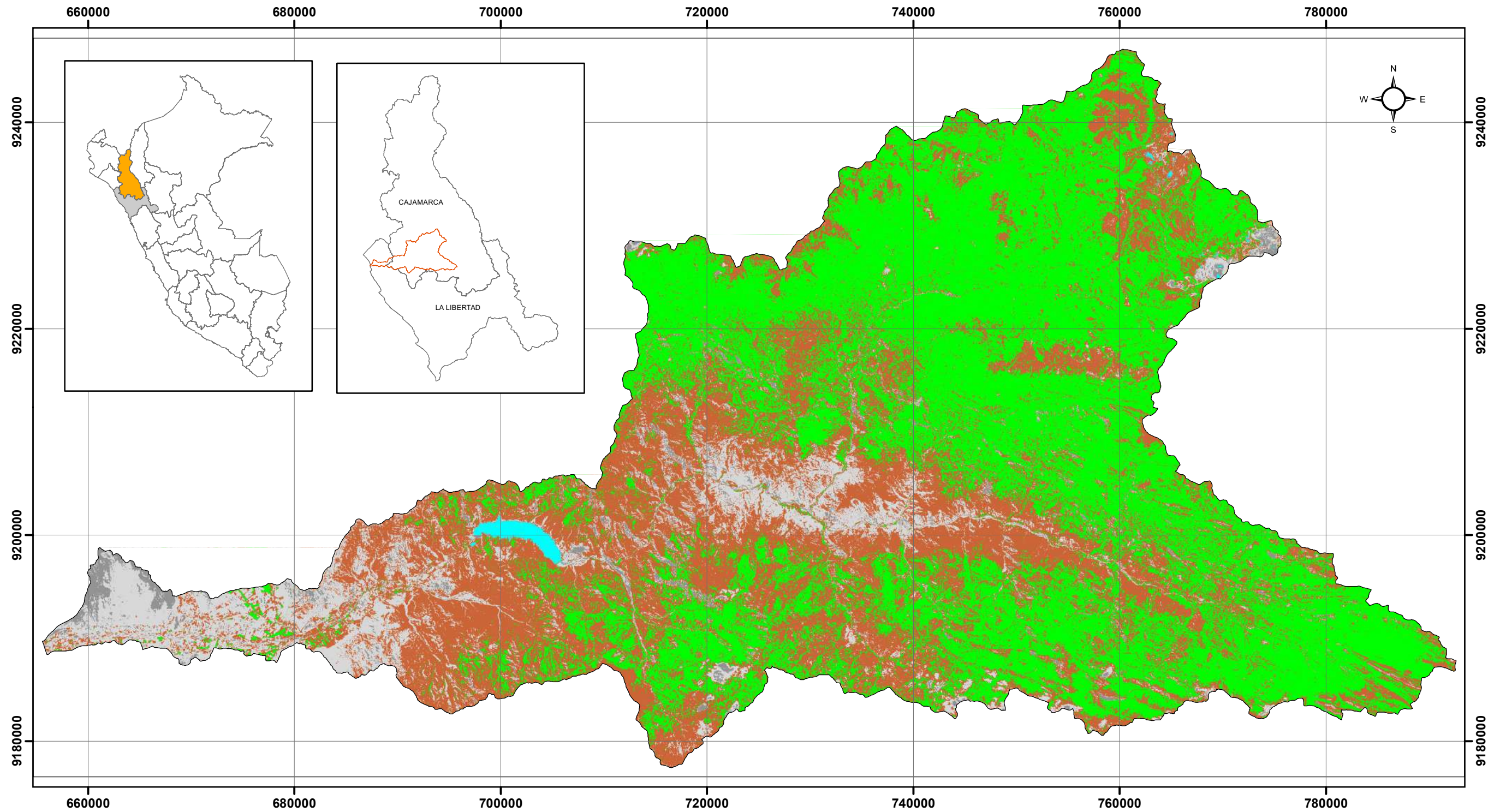
0.00 <NDWI< 0.20 Deposito Fluvial.

- 0.20 <NDWI< 0.00 Afloramiento Rocoso.

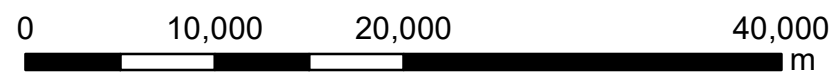
-1.00 <NDWI< - 0.20 Vegetación (Ver mapa 5).

Tabla 7: Falso color RGB para la clasificación de materiales en NDWI.

Tipo de Cubierta	COLORES RGB		
	R	G	B
Lagos y Lagunas	0	205	205
Deposito Aluvial	150	150	150
Deposito Fluvial	217	217	217
Afloramiento Rocoso	205	104	57
Vegetación	0	255	0



LEYENDA		
NDWI	Tipo de cubierta	RGB
0.60 <NDWI< 1.00	Lagos y Lagunas.	
0.20 <NDWI< 0.60	Deposito Aluvial.	
0.00 <NDWI< 0.20	Deposito Fluvial.	
- 0.20 <NDWI< 0.00	Afloramiento Rocoso.	
-1.00 <NDWI< - 0.20	Vegetación	



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
 FACULTAD DE INGENIERIA - E.A.P.I.G

TESIS: ANÁLISIS MULTIESPECTRAL MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES PARA IDENTIFICAR ZONAS DE RECARGA HIDRICA SUBTERRANEA EN LA CUENCA JEQUETEPEQUE

MAPA: ÍNDICE DE AGUA DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDWI)

TESISTA: BACH. DÍAZ CRUZ, SILVIA ROSMERI

ASESOR: MCs.ING. CRISPÍN ZENÓN QUISPE MAMANI

DATUM: WGS 84 - ZONA 17S

ESC: 1/ 400 000

FECHA: Cajamarca 2018

MAPA:

05

3.3.3 Temperatura

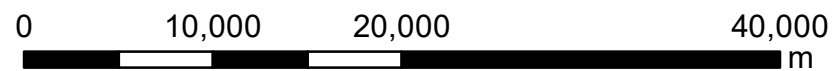
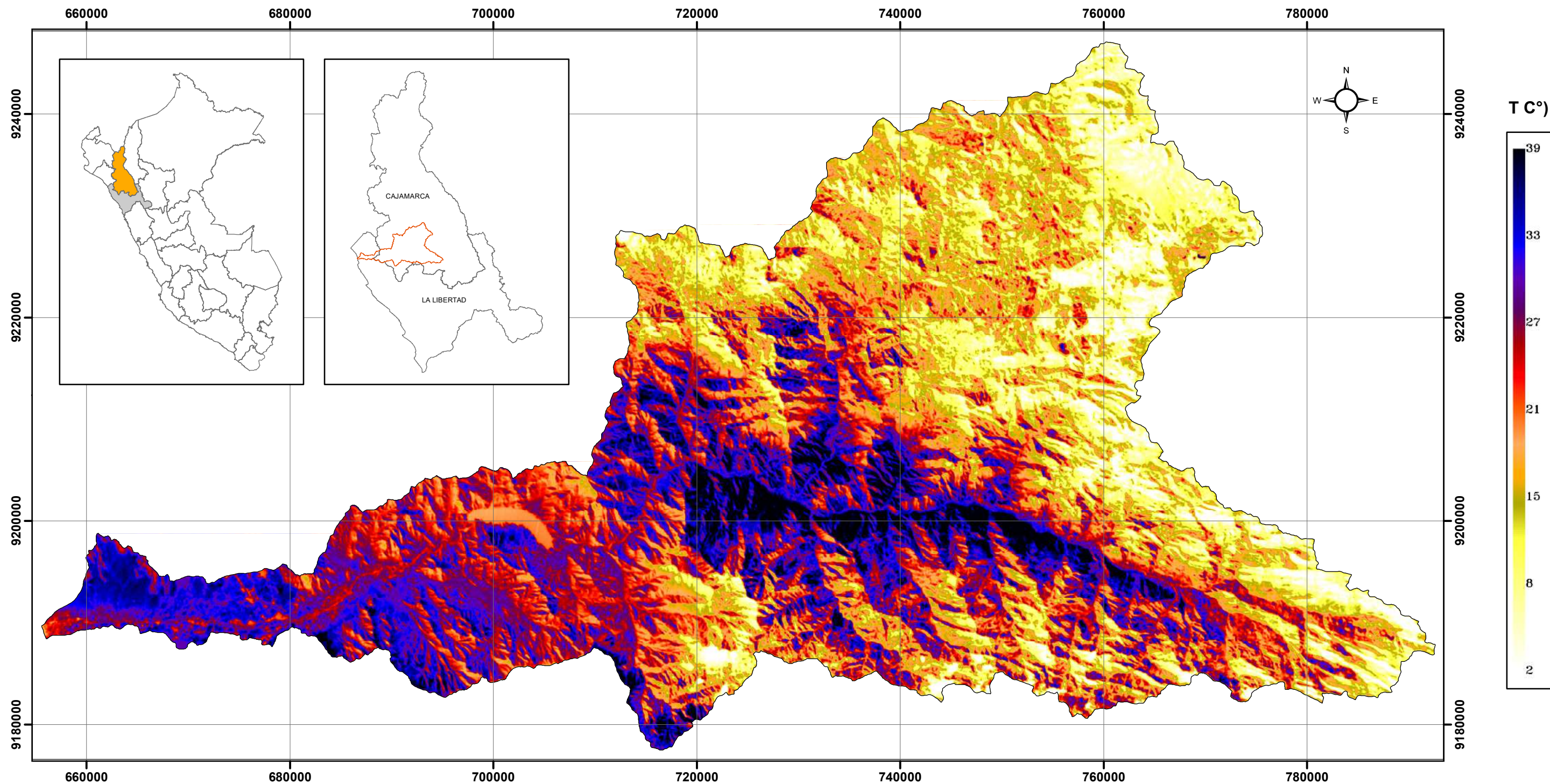
3.3.3.1 Análisis y resultados

Para realizar el análisis de los índices de temperatura se debe tener en cuenta que la radiancia emitida por un objeto en el suelo es atenuada y aumentada por la atmósfera por lo que este efecto debe considerarse en la estimación de la transmitancia y de la radiancia atmosférica ascendente y descendente, es por ello que se realizó una corrección atmosférica para posteriormente convertir toda información de radiancia a información térmica, información que se obtiene a partir del brillo de las cubiertas, el resultado es presentado en grados kelvin (K°) y posteriormente transformado a grados Centígrados (C°), dando como resultado las diferentes cubiertas que de acuerdo a los resultados obtenidos podemos definir de la siguiente manera. Ver mapa 6

Tabla 8: análisis de rango de temperatura en cubiertas.

Rango de temperatura (C°)	Tipo de cubierta
29 - 39	Zonas detríticas y afloramientos rocosos
24 - 28	Depósitos cuaternarios
5 - 23	Vegetación

Además, podemos resaltar que la zona de estudio presenta una temperatura media de 21C°, dato obtenido del análisis térmico final, el cual será utilizado dentro del clasificador en árbol para definir las zonas potenciales de recarga hídrica.



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984

LEYENDA	
Rango de temperatura (C°)	Tipo de cubierta
29 - 39	Zonas detríticas y afloramientos rocosos
24 - 28	Depósitos cuaternarios
5 - 23	Vegetación



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
 FACULTAD DE INGENIERIA - E.A.P.I.G

TESIS: ANÁLISIS MULTIESPECTRAL MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES PARA IDENTIFICAR ZONAS DE RECARGA HIDRICA SUBTERRANEA EN LA CUENCA JEQUETEPEQUE

MAPA: DE TEMPERATURA

TESISTA: BACH. DÍAZ CRUZ, SILVIA ROSMERI

ASESOR: MCs.ING. CRISPIN ZENÓN QUISPE MAMANI

DATUM: WGS 84 - ZONA 17S

ESC: 1/ 400 000

FECHA: Cajamarca 2018

MAPA:
06

3.3.4 Pendiente

3.3.4.1 Análisis y resultados

Los factores que más influyen en la recarga hídrica subterránea son el coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo, la pendiente del terreno y la vegetación. Estos factores, vienen a conformar el coeficiente de infiltración del suelo (Ci).

En una zona dada, entre menor sea la pendiente del terreno y mayor sea su cobertura vegetal, la velocidad de escurrimiento se retrasa, generando una mayor infiltración de agua superficial.

Es por ello que mediante el análisis de la imagen Aster GDEM se generó un modelo de pendientes que servirá para ubicar las zonas con mayor potencial de infiltración, por lo cual se trabajará con pendientes que posean un grado de infiltración moderado a favorable, es decir pendientes comprendidas entre 0° a 27°, dato que será ingresado al clasificador en árbol para la ubicación de las zonas de recarga hídrica subterránea. Ver mapa 7

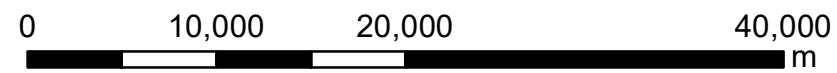
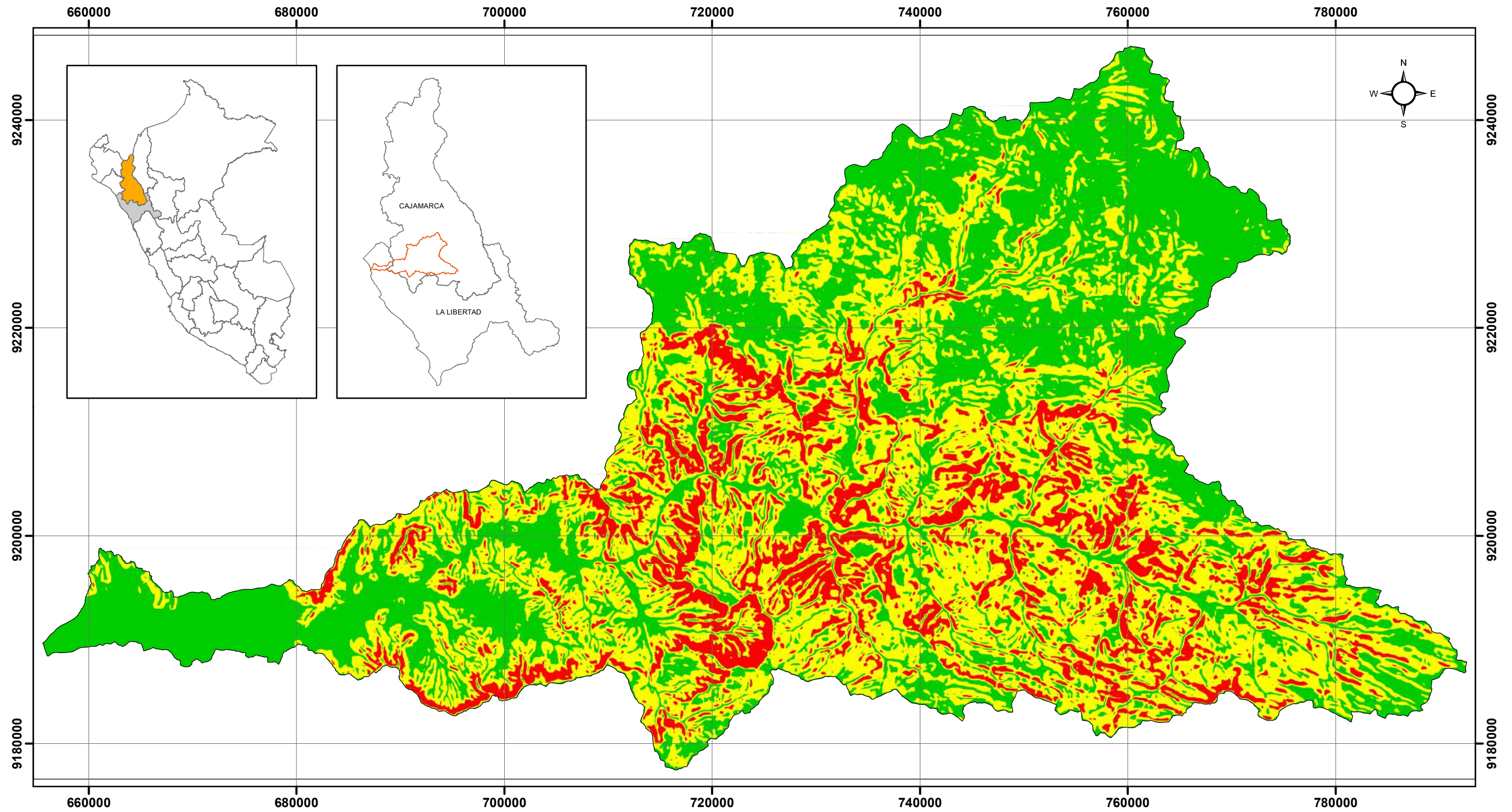
Tabla 9: Grado de infiltración en función de la pendiente.

PENDIENTES		
Porcentaje (%)	Grados (°)	Grado de infiltración
0 - 15%	0° - 13.5°	Favorable
15 % - 30%	13.5° - 27°	Moderadamente
Mayores a 30%	Mayores a 27°	Desfavorable

Fuente: Schosinsky (2001)

Tabla 10: Falso color RGB para la clasificación de pendientes.

Tipo de pendiente (°)	COLORES RGB		
	R	G	B
0° - 13.5°	0	205	0
13.5° - 27°	255	255	0
Mayores a 27°	255	0	0



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984

LEYENDA		
Pendientes (°)	Grado de infiltración	RGB
0° - 13.5°	Favorable	
13.5° - 27°	Moderadamente	
> 27°	Desfavorable	



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
 FACULTAD DE INGENIERIA - E.A.P.I.G

TESIS: ANÁLISIS MULTIESPECTRAL MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES PARA IDENTIFICAR ZONAS DE RECARGA HIDRICA SUBTERRANEA EN LA CUENCA JEQUETEPEQUE

MAPA: DE PENDIENTES

TESISTA: BACH. DÍAZ CRUZ, SILVIA ROSMERI

ASESOR: M.Cs. ING. CRISPÍN ZENÓN QUISPE MAMANI

DATUM: WGS 84 - ZONA 17S

ESC: 1/ 400 000

FECHA: Cajamarca 2018

07

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 CLASIFICADOR EN ÁRBOL.

Una vez obtenidos los parámetros detallados en capítulos anteriores se procede a hacer un sistema experto de codificación, es decir la formulación de un clasificador en árbol, este sistema está compuesto por un conjunto de reglas que permiten al algoritmo tomar una serie de decisiones en función de los parámetros ingresados como son: NDVI, NDWI, Temperatura Superficial, Pendientes, los cuales fueron analizados y en función de sus rangos espectrales serán ingresados en valores codificados en forma de operadores lógicos condicionales que deben simular la decisión dicotómica que realiza un intérprete en la búsqueda de zonas de recarga hídrica, teniendo como principales reglas de búsqueda lo siguiente:

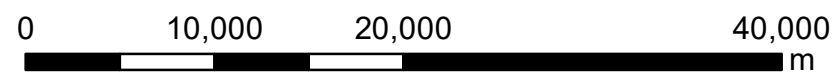
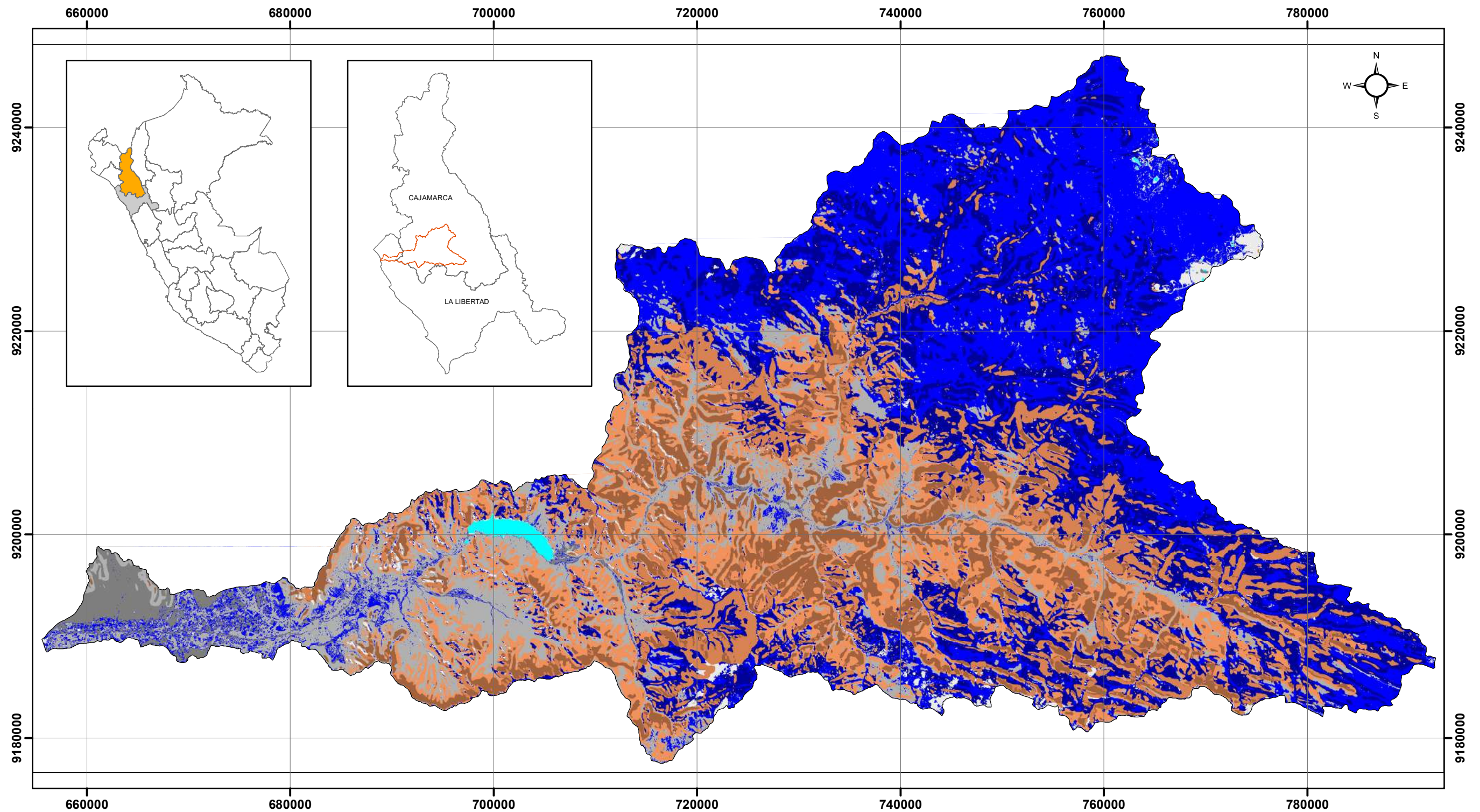
Dentro del análisis del clasificador en árbol en primer nivel se ubica la pendiente en la cual la dicotomía se realiza en función de una pendiente mayor o menor a 27° , en segundo nivel se considera una pendiente mayor o menor de 13.5° y temperaturas mayores o menores de 21 C° , en tercer nivel se consideró temperaturas mayores o menores de 21 C° , en cuarto nivel se considera el parámetro NDWI con valores absolutos mayores o menores que 0, en quinto nivel se considera el parámetro NDVI con valores mayores o menor que 0 dependiente del tipo de cubierta a identificar, finalmente en ultimo nivel se consideró el parámetro NDVI con valores espectrales mayores a 0 para resaltar características de vegetación vigorosa.

Tabla 11: Parámetros clave para identificación de zonas de recarga hídrica.

Unidad De Análisis	Cod.	PARAMETRO			
		NDVI	NDWI	T (C°)	Pendiente
Zona Favorable a la recarga hídrica	Z-1	NDVI > 0	NDWI < 0	T < 21°	Pen < 13.5°
Cuaternario	Q	NDVI < 0	NDWI < 0	T < 21°	Pen < 13.5°
Lagos Y Lagunas	L	NDVI > 0.6	-	T < 21°	Pen < 13.5°
Cuaternario	Q	-	0 < NDWI < 0.6	T < 21°	Pen < 13.5°
Cuaternario Fluvial	Q-FI	-	NDWI > 0	T > 21°	Pen < 13.5°
Zona Favorable a la recarga hídrica	Z-1	NDVI > 0	NDWI < 0	T > 21°	Pen < 13.5°
Cuaternario Fluvial	Q-FL	-0.4 < NDVI < 0	NDWI < 0	T > 21°	Pen < 13.5°
Cuaternario Aluvial	Q-AI	NDVI < -0.4	NDWI < 0	T < 21°	Pen < 13.5°
Zona Moderada a la recarga hídrica	Z-2	NDVI > 0	NDWI < 0	T < 21°	13.5° < Pen < 27°
Cuaternario	Q	NDVI < 0	NDWI < 0	T < 21°	13.5° < Pen < 27°
Lagos Y Lagunas	L	-	NDWI > 0.6	T < 21°	13.5° < Pen < 27°
Cuaternario	Q	-	0 < NDWI < 0.6	T < 21°	13.5° < Pen < 27°
Cuaternario Fluvial	Q-FI	-	NDWI > 0	T > 21°	13.5° < Pen < 27°
Afloramiento Rocoso 1	AR1	-	NDWI < 0	T > 21°	13.5° < Pen < 27°
Afloramiento Rocoso 2	AR2	-	-	T < 21°	Pen > 27°
Afloramiento Rocoso 3	AR3	-	-	T > 21°	Pen > 27°

4.2 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS.

Una vez obtenido el resultado del clasificador en árbol podemos verificar que mediante el análisis multispectral y teniendo en cuenta los parámetros analizados, se ha identificado las zonas de recarga hídrica subterránea con una certeza de 90 % en función de los pozos subterráneos inventariados por el ANA (ver mapa 9), en la cual de 20 pozos, 18 corresponden a las zonas de recarga hídrica identificadas y una certeza de 93.6% en función a los pozos inventariados en la tesis denominada “Caracterización hidrogeológica de las cuencas de los ríos Jequetepeque-chaman, regiones Cajamarca, La Libertad y Lambayeque”, (Vargas, 2010). en la cual de 310 pozos, 290 corresponden a las zonas de recarga hídrica identificadas. ver mapa 10.



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984

LEYENDA CLASIFICADOR EN ARBOL			
	Zonas favorable a la recarga hídrica		Deposito aluvial
	Zonas moderada a la recarga hídrica		Afloramiento rocoso 1
	Lagos y lagunas		Afloramiento rocoso 2
	Deposito cuaternario		Afloramiento rocoso 3
	Deposito fluvial		



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
 FACULTAD DE INGENIERIA - E.A.P.I.G

TESIS: ANÁLISIS MULTIESPECTRAL MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES PARA IDENTIFICAR ZONAS DE RECARGA HIDRICA SUBTERRANEA EN LA CUENCA JEQUETEPEQUE

MAPA: CLASIFICADOR EN ARBOL

TESISTA: BACH. DÍAZ CRUZ, SILVIA ROSMERI

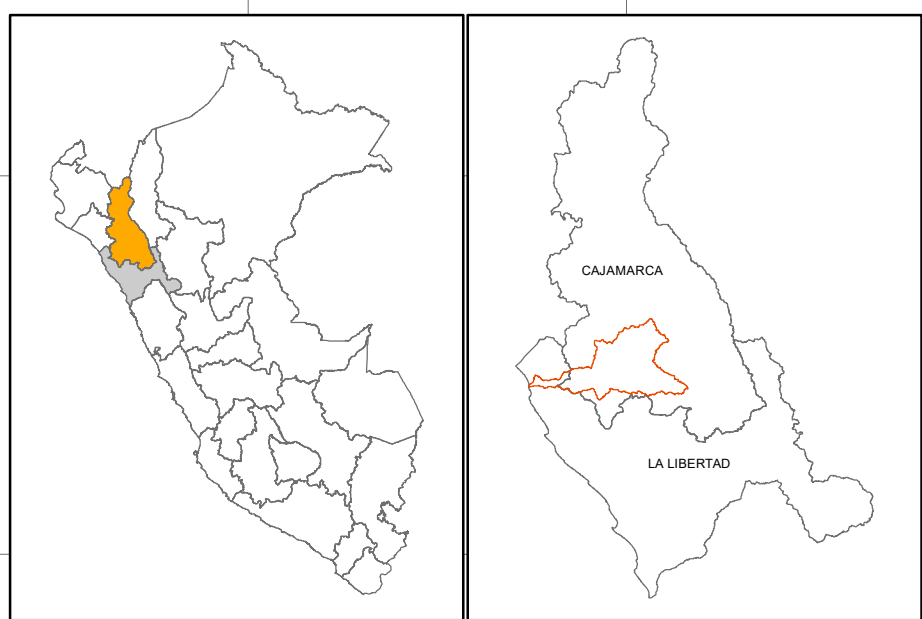
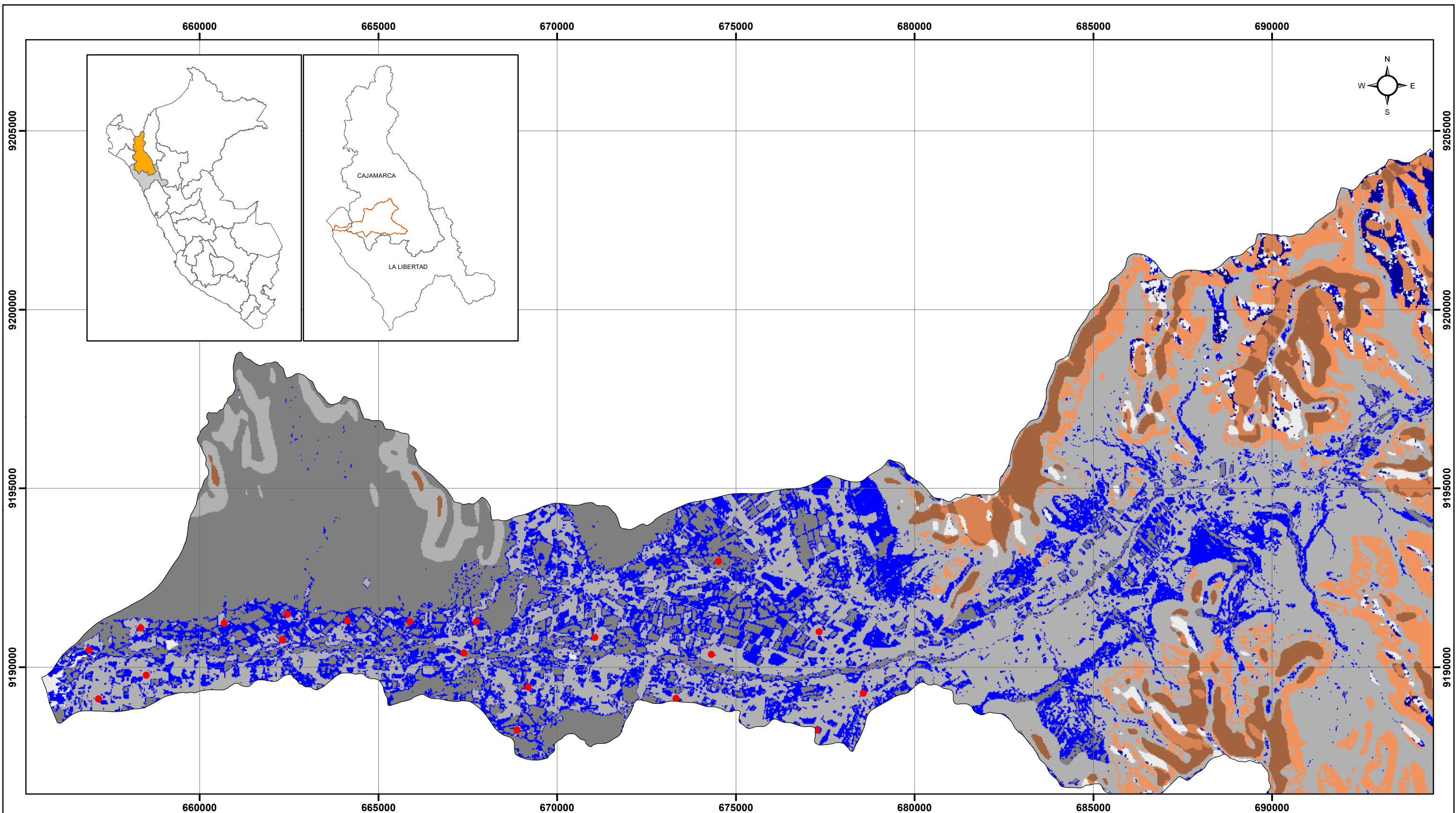
ASESOR: MCs.ING. CRISPÍN ZENÓN QUISPE MAMANI

DATUM: WGS 84 - ZONA 17S

ESC: 1/ 400 000

FECHA: Cajamarca 2018

PLANO:
08



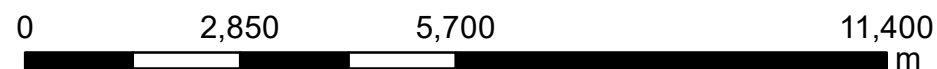
LEYENDA

- Zonas favorable a la recarga hídrica
- Zonas moderada a la recarga hídrica
- Deposito fluvial
- Deposito aluvial
- Deposito cuaternario
- Afloramiento rocoso 1
- Afloramiento rocoso 3

LEYENDA

- POZOS ANA

Fuente: ANA

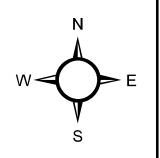
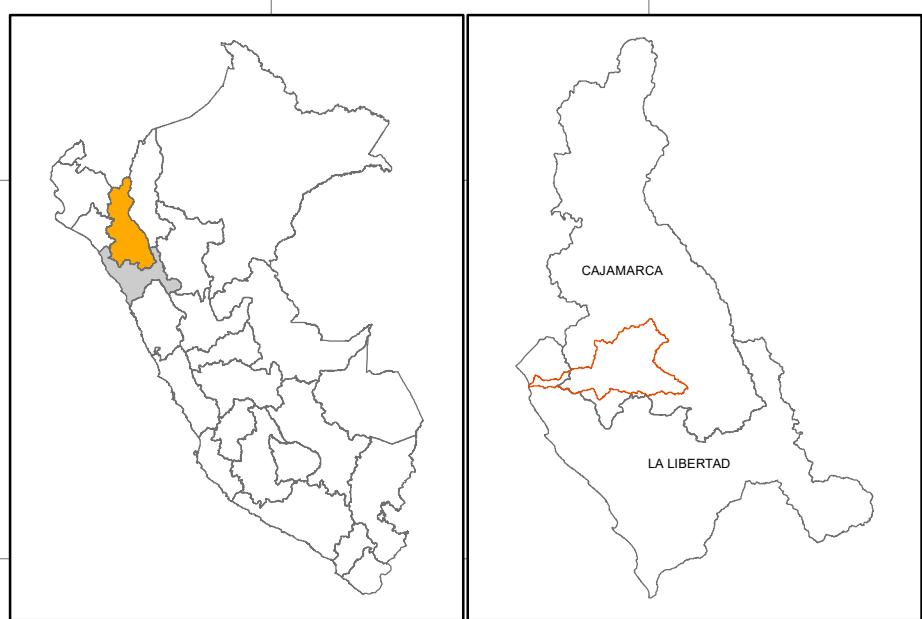
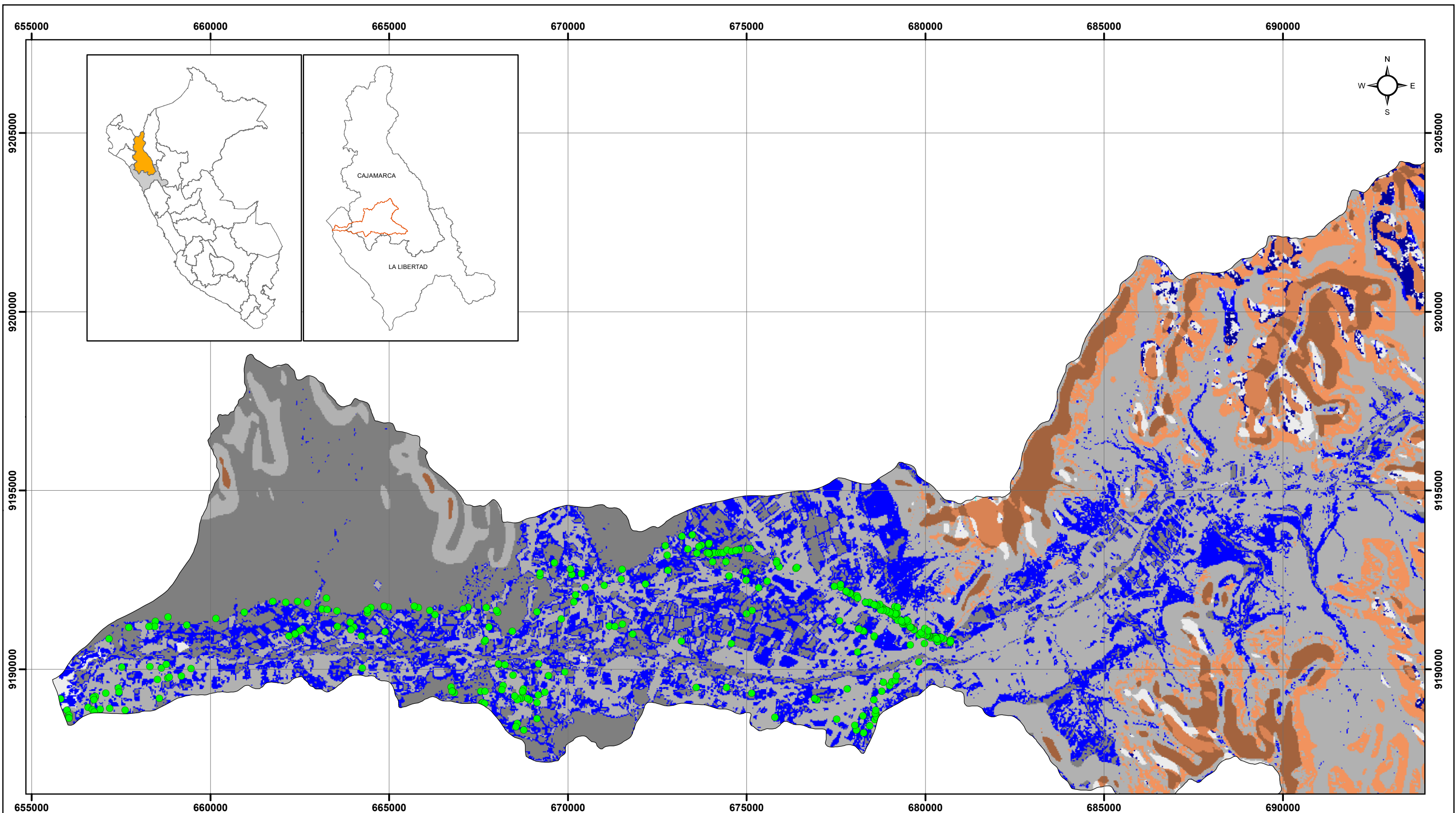


Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
 FACULTAD DE INGENIERIA - E.A.P.I.G

TESIS:	ANÁLISIS MULTIESPECTRAL MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES PARA IDENTIFICAR ZONAS DE RECARGA HIDRICA SUBTERRANEA EN LA CUENCA JEQUETEPEQUE	MAPA:	09		
MAPA:	CLASIFICADOR EN ÁRBOL VS POZOS INVENTARIADOS POR ANA				
TESISTA:	BACH. DÍAZ CRUZ, SILVIA ROSMERI				
ASESOR:	MCs.ING. CRISPÍN ZENÓN QUISPE MAMANI				
DATUM:	WGS 84 - ZONA 17S	ESC:	1/ 100 000	FECHA:	Cajamarca 2018



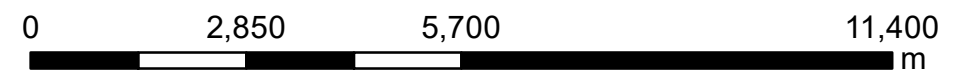
LEYENDA

- Zonas favorable a la recarga hídrica
- Zonas moderada a la recarga hídrica
- Deposito fluvial
- Deposito aluvial
- Deposito cuaternario
- Afloramiento rocoso 1
- Afloramiento rocoso 3

LEYENDA

- POZOS

Fuente: Vargas Rodrigues, V.



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERIA - E.A.P.I.G					
TESIS:	ANÁLISIS MULTIESPECTRAL MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES PARA IDENTIFICAR ZONAS DE RECARGA HIDRICA SUBTERRANEA EN LA CUENCA JEQUETEPEQUE	MAPA:			
MAPA:	CLASIFICADOR EN ÁRBOL VS POZOS INVENTARIADOS POR VARGAS RODRIGUEZ, V.	10			
TESISTA:	BACH. DÍAZ CRUZ, SILVIA ROSMERI				
ASESOR:	MCs.ING. CRISPÍN ZENÓN QUISPE MAMANI				
DATUM:	WGS 84 - ZONA 17S	ESC:	1/ 100 000	FECHA:	Cajamarca 2018

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Se identificó zonas de recarga hídrica subterránea usando imágenes Landsat 8 en la cuenca Jequetepeque con una certeza promedio de 94 % en función de los pozos existentes en la zona de estudio.

El NDVI es un parámetro de clasificación importante para la identificación de las zonas de recarga hídrica, pues se determinó que los rangos de vegetación vigorosa y abundante son los más favorables a la recarga de agua subterránea, rangos que oscilan entre 0.4 a 1 para la vegetación vigorosa y vegetación dispersa entre 0.2 a 0.4.

Se concluye que el NDWI en rangos mayores a 0 funciona como abastecedor hídrico superficial y en el caso de ausencia en rangos menores a 0 es un indicador hídrico subterráneo verificado por la presencia de vegetación.

Se concluye que la temperatura guarda relación con las cubiertas identificadas tal es el caso de zonas detríticas y afloramientos con temperaturas que oscilan entre 29 a 39 C°; depósitos cuaternarios en rangos entre 24 a 28 C° y vegetación en rangos de 5 a 23 C°.

Se concluye que, dentro del análisis espectral en el clasificador en árbol, las zonas favorables y moderadamente favorable a la recarga hídrica presentan índices de vegetación mayor a 0, índice de agua menor a 0, temperatura menor a 21 C° y pendientes menores a 13.5° para recarga favorable y entre 13.5° a 27° para la recarga moderada.

5.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda a estudios posteriores de análisis espectral realizar las correcciones de las imágenes satelitales ya que de no realizarse se pierde mucha información espacial y espectral, lo cual nos conlleva a un margen de error.

Se recomienda a estudios posteriores de análisis espectral realizar un análisis espectral minucioso de los parámetros que ingresarán al clasificador en árbol pues su correcta identificación y valoración de los parámetros usados en el clasificador en árbol pues si uno de los parámetros falla en el análisis, generará un error de cálculo en el clasificador.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chuvienco, E. (2010). Teledetección Ambiental (4ta Edición).
- Chuvienco, E. (1996). Fundamentos de teledetección espacial: Principios físicos de la teledetección. Madrid, España.
- Cossío, A. (1964) - Geología de los cuadrángulos de Santiago de Chuco y Santa Rosa. Comisión Carta Geológica Nacional, Boletín 8.
- Farrar, E; Noble, D. (1976) - Momento de la última deformación terciaria en los Andes del Perú. Boletín de la Sociedad Geológica de América.
- McFeeters, S. (1996). El Uso del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) en la Delineación de Características de Aguas Abiertas. Revista Internacional de Teledetección (17).
- Meijerink, M; Bannert, D; Batelaan, O; Lubczynski, M. (2007). Aplicación de la teledetección a las aguas subterráneas: Serie IHP sobre aguas subterráneas. Proyecto Tiger. Paris, Francia: UNESCO.
- Mendoza Nolorbe, J; Rojas Acuña, J. (2013). Clasificación de imágenes ETM+ Y ASTER GDEM por el método árbol de decisiones para la detección de agua subterránea en Perú. Caso estudio: Lambayeque.
- Ospina Montes, D. (2016). Análisis de la información proveniente del satélite Grace para el monitoreo de la acumulación de agua subterránea: caso ejemplo provincia hidrogeológica de los llanos orientales-Colombia.
- Peña Laureano, F; Carpio Fernández, J; Vargas Rodríguez, V. (2015). INGEMMET, Boletín Serie H: Hidrogeología N°4: Hidrogeología de la cuenca de los ríos Jequetepeque y Chaman, Regiones Cajamarca, La Libertad y Lambayeque.

Rivera, M.; Monge, R.; Navarro P. (2005) - Caracterización del volcanismo cenozoico en el norte del Perú ($7^{\circ} 45' - 9^{\circ} 00' S$, $78^{\circ} 00' - 78^{\circ} 45' O$). En: Simposio Internacional de Geodinámica Andina, 6, Barcelona, 2005. Resúmenes extendidos. París: IRD Éditions.

Rivera Mantilla, H; Palacio Moncayo, O; Paz Maidana, M; Herrera Romero, F; Kawukami, T; Kitagawa, Y; Miyazaki, H. (1998). INGEMMET, PERUPETRO S.A, BOLETIN N°20: Estudio geológico regional aplicando imágenes satelitales para la evaluación del potencial minero en un área en el norte de la republica de Perú.

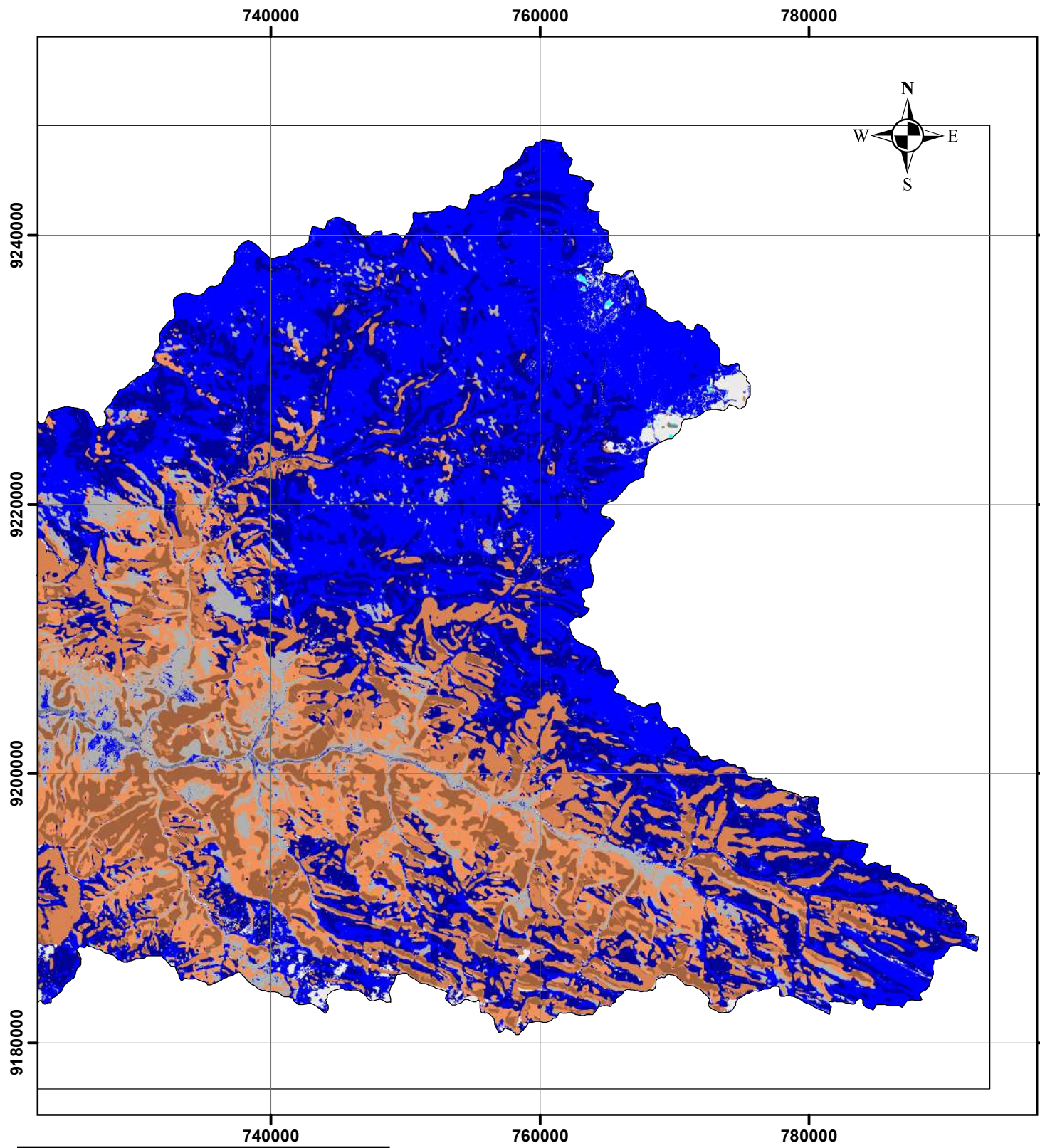
Supo, J. (2016). Seminarios de Investigación Científica.










Sevilla Gildemeister, J; Velásquez Arroyo, J; Echevarría Suarez, W; Risco Olivera, E; Castillo Mimbela, M; Pineda Sampén, V. (2015). ANA. Evaluación de recursos hídricos en la cuenca Rio Jequetepeque.

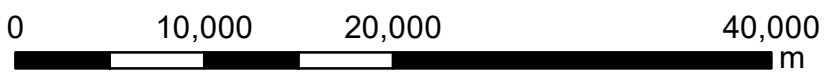
Peguero, C. (2012) Sensores remotos y aplicaciones en teledetección.

Vargas Rodríguez, V. (20109). Caracterización Hidrogeológica de las cuencas de los ríos Jequetepeque-Chamán.

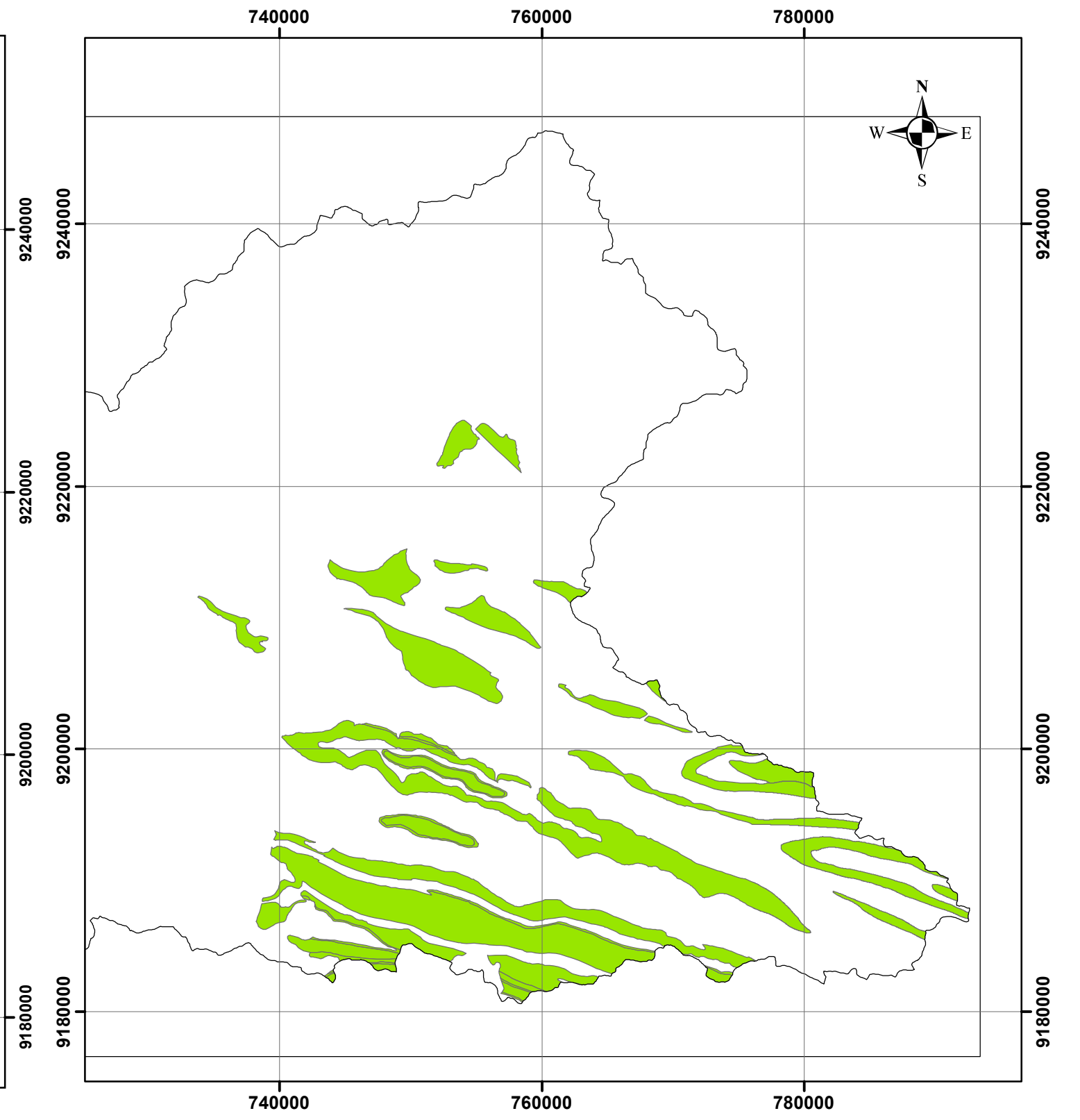
ANEXOS



- LEYENDA**
-  Zonas favorables a la recarga hidrica.
 -  Zonas moderada ala recarga hidrica
 -  Deposito fluvial
 -  Deposito aluvial
 -  Deposito cuaternario
 -  Lagos y lagunas
 -  Afloramiento rocoso 1
 -  Afloramiento rocoso 2
 -  Afloramiento rocoso 3



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984



- LEYENDA**
-  Zanjas de infiltración

Fuente: INGEMMET, 2015



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
 FACULTAD DE INGENIERIA - E.A.P.I.G

TESIS: ANÁLISIS MULTIESPECTRAL MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES PARA IDENTIFICAR ZONAS DE RECARGA HIDRICA SUBTERRANEA EN LA CUENCA JEQUETEPEQUE

MAPA: CLASIFICADOR EN ARBOL VS ZONAS DE INFILTRACIÓN PROPUESTOS POR INGEMMET

TESISTA: BACH. DÍAZ CRUZ, SILVIA ROSMERI

ASESOR: MCs.ING. CRISPÍN ZENÓN QUISPE MAMANI

DATUM: WGS 84 - ZONA 17S ESC: 1/ 400 000 FECHA: Cajamarca 2018

MAPA:
11