

CrossRef DOI of original article:

## Scan to know paper details and author's profile 465U

Received: 1 January 1970 Accepted: 1 January 1970 Published: 1 January 1970

### Abstract

#### *Index terms—*

## 1 I. INTRODUCCIÃ?"N

La hidrología y los SIG (Sistemas de información geográfica) se han constituidos como dos áreas que comparten una gran variedad de información (Morad, 2001). Por tal motivo, ha sido de gran interés el estudio de las relaciones y vínculos que existen entre los SIG y el modelamiento hidrológico (Castro López, 2011). El método del número de curva (CN) es uno de los vínculos que presentan estos dos campos de investigación. Esta metodología fue desarrollada por SCS (Soil Conservation Service) de los Estados Unidos con la finalidad de determinar la precipitación efectiva de una cuenca a partir del tipo de cobertura y uso de suelo, la lluvia acumulada y las condiciones de humedad de la zona (Ven Te, 1984); es decir, a partir de estas características físicas del territorio, este parámetro hidrológico permite establecer el potencial de escorrentía de la cuenca (Díaz Carvajal, 2017).

De acuerdo con (Romano Castillo, 2007) el CN es el método más adecuado para transformar la precipitación total en precipitación efectiva debido a que tiene en cuenta una de las principales etapas del ciclo del agua, como lo es la infiltración, la cual influye notablemente en la dinámica hidrológica. Este proceso se presenta cuando el agua precipitada se mueve de manera vertical a través de la superficie del suelo generando el incremento en la humedad en esta matriz (Calvache, 2010).

A pesar de que la metodología del SCS se ha convertido en una de las principales herramientas para la modelación hidrológica y ambiental (Sánchez Palomino, 2015), el número de curva ha generado gran interés en las diferentes investigaciones debido a que permite establecer y describir las condiciones geográficas generales de una zona de estudio (Sedano Cruz, 2013) al tiempo que indica el potencial de escorrentía de una superficie determinada.

Para la estimación del número de curva en una cuenca hidrográfica, se han aplicado los SIG y la teledetección como herramientas de gran utilidad para determinar las condiciones generales de la cobertura vegetal y del uso del suelo (Lao Ramos, 2018). ??Deshmukh et.al., 2013) emplearon y procesaron imágenes satelitales por medio de un software SIG con el fin de identificar la transformación del CN que se ha presentado en tres cuencas hidrográficas ubicadas en India. Por medio de los resultados obtenidos se pudo concluir que este parámetro hidrológico se ha incrementado en la zona a raíz del crecimiento desmesurado de la frontera agrícola.

Por su parte, ??Rodríguez et.al., 2012) establecieron mediante la zonificación del CN, el impacto ambiental que se presenta en un escenario determinado, en cuanto a la ocupación del territorio, por medio de uso de las herramientas SIG. En Colombia, se llevó a cabo un estudio en la subcuenca de Betancí, ubicada en el departamento de Córdoba. Debido a los diferentes servicios ecosistémicos que ofrece esta ciénaga en el territorio y a la diversidad que se encuentra en ella, es considerada como uno de los ecosistemas estratégicos del departamento. Sin embargo, a causa de las diferentes actividades antrópicas que se han presentado alrededor de la ciénaga de Betancí se ha presentado una transformación del uso del suelo en la zona como consecuencia de la expansión de la frontera agrícola y ganadera, lo cual ha generado la pérdida casi total del bosque secundario (Díaz Carvajal, 2017).

Por otra parte, Colombia es uno de los principales países latinoamericanos que se caracterizan por sus abundantes recursos naturales presentes en los diferentes ecosistemas del territorio. Los servicios ambientales proveídos por estos ecosistemas han contribuido al desarrollo humano y social de la población colombiana. Sin embargo, las diferentes actividades antrópicas que se ha desarrollado dentro de estos ecosistemas estratégicos han generado una transformación en la cobertura vegetal y el uso del suelo en diferentes zonas, debido a un aprovechamiento inadecuado de los recursos. Este esquema de desarrollo insostenible ha producido grandes impactos ambientales que ponen en riesgo la estabilidad y el bienestar de las presentes y futuras generaciones

## 5 CLASIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DEL CAMBIO DE COBERTURAS Y USO DEL SUELO

(Sánchez Pérez, 2018). London Journal of Research in Science: Natural and Formal Los páramos son uno de los ecosistemas estratégicos que presentan un bajo nivel de freático por lo que son considerados muy quebradizos, esto debido a que aproximadamente un 75% del terreno corresponde a agua (Cuervo Barahona, Cely Reyes, & Moreno Pérez, 2016). En este contexto, las actividades productivas como la ganadería presentan efectos negativos en la estructura del páramo debido a la pérdida de las propiedades retenedoras de agua y carbono en la matriz del suelo y la compactación de este como producto del pisoteo del ganado (Rivera Ospina, 2013). Los suelos del páramo se caracterizan por contener tres veces más reservas de CO en comparación con la biomasa presente sobre la tierra, además, contienen el doble de carbono que el que se registra en la atmósfera; por tal motivo, la materia orgánica del suelo en este tipo de ecosistemas es una fuente peligrosa para la generación de dióxido de carbono lo cual contribuye a una de las principales problemáticas ambientales como el calentamiento global (García Portilla, 2003).

A partir de la fragilidad de los ecosistemas de páramo dentro de territorio colombiano se han generado diferentes normativas para su protección y preservación, como lo es el artículo 173 de la Ley 1753 del 2015, en el cual se estipuló que en estas zonas no se pueden desarrollar actividades productivas que involucren el uso de recursos naturales no renovables. Con base en lo anterior, la población que se encuentra asentada en este tipo de ecosistemas no puede continuar con sus actividades económicas tradicionales. Por lo anterior, es indispensable formular alternativas laborales para las comunidades campesinas residentes en estos ecosistemas (Rubiano Galvis, 2015).

El páramo del Siscunsi, ubicado al sur oriente del municipio de Sogamoso, es uno de los principales ecosistemas estratégico del departamento de Boyacá ya que presenta una extensión de 5.942 ha (Sánchez Pérez, 2018). El principal afluente del páramo es la quebrada La Iglesia, también conocida como quebrada Las Cañas, la cual es uno de los principales drenajes que alimentan al Río Cusiana dentro del departamento.

Considerando lo anteriormente expuesto, es claro que existe la necesidad de conocer el potencial actual de generación de escorrentía en este ecosistema estratégico, y de este modo que las autoridades competentes cuenten con acceso a herramientas e información científica para tener la capacidad de formular acciones de remediación al impacto ambiental provocado sobre este ecosistema de páramo. De esta manera, los objetivos del presente estudio fueron determinar el CN en la microcuenca de la quebrada Las Cañas del páramo de Siscunsi y así reconocer la dinámica hidrológica de este ecosistema en cuanto al potencial de generación de escorrentía, así como identificar las coberturas del suelo a partir de un mosaico multitemporal de imágenes LANDSAT, asignar los grupos hidrológicos del suelo y comparar los resultados de los caudales obtenidos para los diferentes años de estudio a partir del método racional empleando los modelos de Frederick Bell y Dick Peschke para el cálculo de las intensidades, con los resultados entregados por las medias aritméticas analizados a partir del software QGIS de las imágenes ráster de la escorrentía superficial.

## 2 II. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3 Identificación del cambio de coberturas vegetales y uso del suelo

#### 4 Delimitación de la cuenca de estudio

Para obtener las imágenes satelitales se realizó la descarga del Modelo de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés), obtenido del Servicio de Satélites de Alaska (Alaska Satellite Facility), la cual tiene una resolución espacial por píxel de 12.5 metros. Por medio de la red de drenajes obtenida a partir del procesamiento del DEM y de la información suministrada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), se realizó la delimitación la microcuenca de la quebrada Las Cañas. Estos datos fueron procesados por medio del software QGIS 2.18, donde se realizó la corrección de píxeles, así como la London Journal of Research in Science: Natural and Formal determinación de la dirección y acumulación de flujo y el respectivo análisis de cuenca. En la figura 1, se observa el mapa de localización y delimitación del área de estudio.

Figura 1: Localización y delimitación área de estudio

### 5 Clasificación e identificación del cambio de coberturas y uso del suelo

Posteriormente, a partir del software QGIS se realizó la identificación del uso del suelo teniendo en cuenta las coberturas vegetales, empleando modelos de predicción. Para la caracterización de uso del suelo se aplicó la metodología Corine Land Cover escala 1:25000 y la información suministrada por el documento Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra Metodología Corine Land Cover escala 1:100000, adaptadas cada una a Colombia. Los datos fueron validados y rectificados con las visitas realizadas a campo.

En la figura 2, se presenta el diagrama metodológico para la clasificación e identificación del cambio de coberturas vegetales y uso del suelo.

---

## 6 London

## 7 Fuente: Autores

Es importante resaltar que se realizó una corrección y normalización de las imágenes satelitales debido a que estas presentaban contrastes diferentes, los cuales pudieron ser producidos por la posición en que se encontraba el sol al momento de su captura y por el relieve de la zona. La corrección topográfica se llevó a cabo por medio de la herramienta "Topographic correction" del software QGIS aplicando los métodos Coseno corrector (Civco, 1989). Posteriormente, se ajustó la clasificación de coberturas terrestres de manera supervisada. Esta clasificación es pertinente por la relación de las clases de cobertura existentes en el área de estudio. La reclasificación de las imágenes satelitales se realizó con la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia mencionada anteriormente (Menéndez & Núñez, 2009). En este proceso se tuvieron en cuenta, cuatro tipos de cobertura vegetal que fueron identificados en la microcuenca, presentados en la Tabla 1. Estas coberturas se relacionan con los usos de suelo presentes en la región, por medio del POT del municipio de Sogamoso, el EOT del municipio de Aquitania y el POMCA de la cuenca del río Cusiana.

Para verificar y corregir la información obtenida se hizo uso en el procesamiento geográfica en QGIS y de la información teórica descrita anteriormente, se realizó una visita al páramo Fuente: Autores identificó cada una de las clases de cobertura y uso del suelo, permitiendo ajustar los datos a las 4 clases de presentadas en la Tabla 1.

Tabla 1: Clasificación de cobertura vegetal y uso de suelo

## 8 Fuente: Autores

Con la información obtenida se elaboraron los mapas de uso de suelo de los años 1989, 1997, 2002, 2008, 2014 y 2017, por medio de los cuales se llevó a cabo el análisis multitemporal. Se empleó el plugin Molusce del software QGIS para realizar las predicciones de los escenarios de uso del suelo, el cual permite analizar, modelar y simular las transformaciones de la cobertura vegetal y uso del suelo en una zona específica (Villalobos Chacón, 2019).

Para la aplicación de esta herramienta es necesario contar con las capas reclasificadas de dos años, así como una combinación de variables que están relacionadas a la humedad, erosión y deslizamientos. Estas variables son la distancia a las vías empleando los datos de la red vial (figura 5), drenajes obtenidos del IGAC (figura 6), y también las pendientes dadas en porcentaje que presenta el terreno (figura 7). En la figura 7, se observa el mapa de pendientes en grados obtenido en QGIS, con la herramienta Slope.

## 9 Fuente: Autores

Figura 7: Mapa pendiente de la cuenca expresada en grados. A partir de modelos matemáticos preestablecidos, la herramienta Molusce genera mapas de predicción de los años presentados en la tabla 2. Los periodos obtenidos por medio de los pares dan como resultado una diferencia temporal, la cual, al ser añadida al último año de los pares indica el año a proyectar.

Tabla 2: Predicciones realizadas de uso de suelos

## 10 Fuente: Autores

La precisión del modelo se indica en el porcentaje del índice de Kappa. Este es un índice el cual mide la relación entre la clasificación y los píxeles de realidad en el terreno. Los valores de esta constante  $k$  indican la concordancia exacta, mientras que un valor de cero no representa ningún tipo de relación (Villalobos Chacón, 2019).

## 11 Análisis del cálculo del número de curva (CN)

La estimación de la precipitación efectiva se realizó por medio del método propuesto por el Soil Conservation Service (SCS), el cual emplea variables como la cobertura y uso de suelo, las condiciones de humedad antecedente (AMC) y la lluvia acumulada en el área de estudio con el fin de fijar un número de curva (CN) que representa tal interrelación. Para la formulación del CN, se tiene en cuenta que la escorrentía directa ( $P_e$ ) siempre es menor o igual al agua que precipita en la cuenca ( $P$ ); de igual manera, después de que comienza la precipitación efectiva, la profundidad adicional del agua retenida ( $F_a$ ) es menor o igual a la retención potencial máxima ( $S$ ) (Ven Te, 1984).

Con el método de la SCS la escorrentía directa ( $Q$ ), o precipitación efectiva, es calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$(1) \quad Q = \frac{P_e}{2} \quad (P_e > 0.8) \quad (P_e < 0.8)$$

## 12 Donde

$Q$  es la escorrentía directa o precipitación efectiva, en pulgadas.  $P$  es la precipitación considerada, en pulgadas.

$S$  es la diferencia potencial máxima entre  $P$  y  $Q$  en el momento de inicio de la tormenta y representa proporcionalmente la pérdida de escorrentía por infiltración, interceptación y almacenamiento superficial.

Para el cálculo de la diferencia potencial máxima en pulgadas, se aplica la siguiente ecuación.

$$(2) \quad S = 100 - 10 \cdot CN \quad \text{Donde } CN \text{ es el número de curva.}$$

### 13 Parámetros del modelo (AMC y Tipo de Suelo Hidrológico)

Las condiciones de humedad antecedente (Antecedent Moisture Conditions, AMC), se agrupan en tres condiciones básicas, como se observa en la Tabla 3. Por otra parte, el tipo de suelo hidrológico se determinó de acuerdo a las condiciones de infiltración subsuperficial que influyen en la precipitación efectiva en la cuenca, teniendo en cuenta el tipo agrológico que se encuentra en la misma. Además, se considera la cobertura vegetal, ya que la vegetación tiene una fuerte incidencia en el agua que escurre dentro de una zona, no solo por establecer el coeficiente de escorrentía sino también por la capacidad que presentan las plantas en absorber el agua en escenarios de humedad.

Para la clasificación de suelos se tuvo en cuenta las unidades geológicas del área de estudio identificadas a partir de la información suministrada por la plancha 192 del Servicio Geológico Colombiano, el POT del municipio de Sogamoso y EOT de Aquitania. En la figura 8 se observan las unidades geológicas de la microcuenca de la quebrada las Cañas.

### 14 Cálculo de caudales a partir de intensidades obtenidas por los modelos de Dick Peschke y Frederick Bell

Se descargaron los datos pluviométricos de estaciones climáticas del IDEAM, de las cuales 5 son de clase meteorológica (MET) y 6 de clase hidrológica (HID), tal como se observa en la tabla 5. En la figura 10, se representan los polígonos de Thiessen obtenidos en el programa QGIS, donde se observa que la estación que presenta mayor aferencia sobre la microcuenca de estudio es la estación Puente Las Cañas. Las curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF) se construyeron a partir de los valores de precipitación máxima en 24 horas de las estaciones Toquilla y Puente Las Cañas, durante el periodo de 1971 a 2018. Se llevó a cabo un muestreo estadístico de los datos en intervalos de tiempo de manera discreta y estable, con el objetivo de seleccionar para cada año los datos extremos de precipitación para diferentes valores de tiempo. Posteriormente se llevó a cabo un análisis de frecuencia a través de diferentes tipos de distribuciones tales como Gumbel y log-Gumbel, log-normal de 2 y 3 parámetros, probabilidad normal, gamma de 2 y 3 parámetros, log-Pearson tipo III, y finalmente para calcular los periodos de retorno de 5, 10, 20 y 50 años se realizó una prueba de ajuste de probabilidad Smirnov-Kolmogorov empleando los softwares Excel e Hidroesta 2.

Con los datos de Pmax en 24 horas para los distintos periodos de retorno, se procedió a distribuir las precipitaciones en tiempos inferiores a 60 minutos y de 1 a 24 horas, y de este modo generar las curvas IDF, empleando los siguientes modelos:

### 15 Modelo de Dick Peschke

Este modelo es usado para el caso de duraciones de tormenta inferiores a 60 minutos, con datos pluviográficos con los que se pueda obtener las intensidades máximas o cuando no se cuente con registros pluviográficos que permitan obtener estas intensidades (Paredes Pinto, 2015). La ecuación que describe este modelo es la siguiente: London Journal of Research in Science: Natural and Formal La intensidad es calcula a partir del cociente entre la precipitación  $P_d$  y la duración.

### 16 Modelo de Frederick Bell

De acuerdo con (Paredes Pinto, 2015), el modelo de Frederick Bell es empleado para calcular la lluvia máxima teniendo en cuenta la duración de la tormenta (min), la precipitación máxima de 1 hora de duración y el periodo de retorno de 10 años. La ecuación que describe este modelo es la siguiente: cuenta los valores de precipitación máxima durante 24 h para un periodo de retorno de 10 años, como se observa en la ecuación de Dick Peschke.

Por otra parte, la intensidad fue calculada empleando el modelo 2.3.1.

### 17 Método racional

Para la determinación de los caudales aplicando el método racional se empleó el  $T_c$  de la cuenca (Tiempo de concentración) y la intensidad respectiva a los periodos de retorno (TR) establecidos por medio del método de Dick Peschke y Frederick Bell para estación Puente las Cañas debido a que es la estación que presenta mayor aferencia en el área de estudio (Figura 10). A partir del tiempo de concentración de la microcuenca se realizó la interpolación de la intensidad para los TR correspondientes a 5, 10, 20 y 50 años.

La Intensidad de la Lluvia de Diseño se calculó por medio de la Ecuación 6. Es importante resaltar que se consideró la frecuencia como el periodo tiempo de retorno seleccionado y la duración igual al tiempo de concentración de la cuenca  $? =$  Posteriormente, se estableció el coeficiente promedio de escorrentía para el año 2017 por medio del procesamiento del tipo de suelo (Figuras 8 y 9), las pendientes del terreno, la cobertura vegetal obtenida de (Lemus & Navarro, 2003), los valores geográficos y el área de cada cobertura en el software QGIS. Teniendo en cuenta estas variables se determinó el caudal máximo, como se observa en la siguiente ecuación.

### 18 ? =

??? 360 (7) Donde Q Es el caudal máximo, en  $m^3/s$ . C Es el coeficiente de escorrentía. I Es la intensidad de lluvia con duración igual al periodo de retorno (mm/h) A Es el área de la cuenca en hectáreas.

---

## 19 Comparación de caudales

Se llevó a cabo la comparación de los valores de los caudales obtenidos por el método racional con los datos hallados a partir del cálculo de la escorrentía superficial en el software QGIS.

Se utilizó el método de estimación inicial del umbral de escorrentía  $P_0$  (mm) puesto que no se cuenta con la información suficiente para establecer la lluvia neta; por esta razón, el coeficiente se calculó a partir de las características de la zona de estudio. Por medio del valor inicial de  $P_0$  (Tabla 6) se determinó el umbral de escorrentía de acuerdo con el tipo de cobertura vegetal, uso de suelo y los valores de pendientes de la cuenca (Figura 11).

El mapa resultante del procesamiento de estas variables mediante el software SIG se reclasificó de acuerdo con los valores de CN para condiciones normales. Luego, se obtuvieron los mapas de la diferencia potencial máxima por medio del uso de la herramienta "Álgebra de mapas". No obstante, a pesar de que en esta metodología emplea el valor de precipitaciones de corta duración para poder evaluar escenarios máximos, en esta investigación se empleó la precipitación total mensual promedio de cada año obtenido a partir de la interpolación realizada con los datos de precipitación registrados por diversas estaciones climáticas en la zona.

A partir de los rásteres de la precipitación, CN y factor S se determinó la escorrentía mensual de la cuenca para los años estudiados por medio de la aplicación de la Ecuación 1. Además, mediante los valores promedios de la precipitación efectiva se calculó el volumen de agua. Por último, se determinó el caudal de la cuenca para cada periodo analizado teniendo en cuenta los valores de escorrentía directa y el área de la microcuenca.

## 20 III. RESULTADOS

### 21 Cambio de cobertura y uso del suelo

Con base a la visita realizada al páramo de Siscunsi, se pudo verificar y correlacionar las 4 categorías de acuerdo con la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia, esto se llevó a cabo con la London Journal of Research in Science: Natural and Formal reclasificación de 15 puntos de observación distribuidos espacialmente a lo largo de la microcuenca Las Cañas. En la Figura 12 se puede evidenciar los puntos de control en la imagen satelital junto con la imagen ajustada y reclasificada en las 4 clases de uso de suelo para el año 2017.

Figura 12: Puntos de control en campo junto con imagen en falso color y uso del suelo reclasificado, año 201

Por otra parte, a partir del procesamiento de las imágenes satelitales en el software QGIS se pudo establecer los cambios de cobertura de los 4 tipos de uso de suelo que se presentan en el área de estudio durante el periodo 1989-2017. Como se observa en la Tabla 7, las actividades agropecuarias y las áreas para la conservación fueron las categorías que tuvieron un aumento en su extensión dentro de la microcuenca de 49,5 ha y 260,01 ha respectivamente. El incremento de cobertura de las actividades agropecuarias es la consecuencia de la expansión de la frontera agrícola y ganadera durante los 28 años analizados, dando como consecuencia la transformación de otros tipos de usos como los sistemas forestales, los cuales registraron una pérdida de 306,45 ha, en este tipo de uso de suelo. Por otra parte, la ganancia de cobertura de las áreas de conservación es el resultado de las diferentes actividades que se han planteado y desarrollado en la zona a lo largo de tiempo con miras a la conservación del páramo de Siscunsi.

En la Figura 13 se ilustran los cambios que presentó la microcuenca Las Cañas en los años 1989-2017 con respecto a las 4 categorías identificadas de uso de suelo. Figura 13: Cambios de uso de suelo durante los años 1989 (Derecha) y 2017 (Izquierda)

Por otro lado, empleando las imágenes reclasificadas se realizó la simulación de uso de suelo para los años 2014, 2020, 2026 y 2027 desarrollando la metodología descrita en el apartado anterior.

### 22 Predicción uso de suelo 2014 a partir de imágenes 2002 y 2008

La proyección de la cobertura de uso de suelo del año 2014 se llevó a cabo con el fin de realizar una comparación de los resultados obtenidos de la simulación (Figura de la izquierda) con la imagen Landsat procesada en el software de este año (Figura de la derecha). Como se observa en la Tabla 8, las actividades agropecuarias y los sistemas forestales son las categorías de uso de suelo que presentaron una diferencia notable teniendo la información obtenida a partir de la simulación y el procesamiento de la imagen satelital. Los valores del área de cobertura dentro de la cuenca de estos dos usos difieren 122 ha y 90 ha respectivamente.

Es importante resaltar que la predicción realizada por medio de los resultados del cambio de uso del suelo entre el 2002 y 2008 no tuvo en cuenta la tasa de reforestación que se ha registrado en el páramo, es por esto por lo que los sistemas forestales y las áreas para la conservación son los usos de suelo que presentaron una mayor cobertura en la imagen simulada que en la imagen procesada de la zona de estudio. El índice de exactitud y el índice Kappa entre estas dos imágenes fue del 73.5% y 0.624 indicando un valor de concordancia bueno, lo cual significa que el comportamiento calculado y procesado del uso de suelo dentro de la cuenca presenta semejanza por esta razón los modelos de predicción de otros periodos presentaran resultados con una certeza aceptable. presentan crecimiento de sus áreas. Los porcentajes de cambios ilustrados en la Tabla 9 permiten observar que las diferencias de las coberturas totales entre estos dos modelos no son mayores a 3.2%.

## 26 COMPARACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA EMPLEANDO LA PRECIPITACIÓN EFECTIVA Y EL MÉTODO RACIONAL PARA EL AÑO 2027

Además, al validar estas dos predicciones realizadas para el año 2020 se obtuvo un porcentaje de exactitud de 75.9% y un índice Kappa del 0.612 reflejando una correlación apropiada entre los datos. Estos valores ratifican que las simulaciones realizadas para los años posteriores aplicando el modelo de esta investigación generaran resultados confiables respecto al uso de suelo en la cuenca. Los modelos de predicción del uso del suelo para los años 2026 y 2027 difieren significativamente en algunas categorías debido a los distintos periodos empleados para la predicción de estos dos años. Como se observa en la Figura 26, las áreas de conservación en el año 2026 presentaron una mayor área London Journal of Research in Science: Natural and Formal (484,11 ha) en relación con el año 2027 (382,88 ha) debido a que durante los años 2002 y 2014 (Años empleados para la predicción del modelo del 2026) se presentó una mayor expansión en este tipo de suelo dentro de la cuenca que entre los años 1989 y 2008 (Años empleados para la predicción del modelo del 2027). Por otra parte, los sistemas forestales mostraron una tendencia contraria al registrarse una mayor cobertura en el año 2027 (536,03 ha) en comparación con el año 2026 (426,52). En cuanto a los cuerpos de agua y las actividades agropecuarias las diferencias de coberturas de estos usos de suelo dentro de la cuenca en los dos años simulados tan solo difirieron en 0,63 ha y 8,91 ha respectivamente como se observa en la Tabla 10. Para la verificación, correlación y validación de estos modelos procesados se obtuvo un índice Kappa de 0.46 que representa una concordancia moderada en su desarrollo y una exactitud de 62.8 % de validación lo que indica que existe similitud en los mapas obtenidos, esto quiere decir, que si el proceso natural se mantiene se tendrán sistemas forestales y áreas de conservación como lo muestra cada mapa London Journal of Research in Science: Natural and Formal de predicción para los años (2026-2027). Asimismo, los índices obtenidos de los modelos 2014 y 2020 arrojaron una concordancia buena, lo cual se debe a que la validación de estos datos se realizó con la imagen satelital del año 2002, lo que genera que el modelo de predicción del año 2026 se asemeje a la realidad.

## 23 Oferta hídrica de la cuenca empleando la precipitación efectiva

De acuerdo con el procesamiento de los datos en el software QGIS, en la Figura 17 se observan los mapas del número de curva obtenidos durante el periodo de estudio (1989-2017) y las predicciones (2020,2026 y 2027). Teniendo en cuenta los valores promedio de cada una de las imágenes ráster de la precipitación efectiva determinados para el periodo analizado, en la Tabla 11 se presenta el volumen de la microcuenca Las Cañas.

## 24 London

Tabla 11: Volumen de agua calculado a partir de los valores promedio de la Precipitación Efectiva

## 25 Fuente: Autores

La oferta hídrica de la microcuenca se calculó por medio de la conversión de los milímetros de escorrentía superficial a las unidades correspondientes de caudal, esto se obtuvo empleando el área total (1799 ha) y los valores máximos de precipitación efectiva para los distintos años estudiados, los resultados se ilustran en la Tabla 12. Mediante el programa Hidroesta2 se estimaron los valores de caudal; al mismo tiempo, por medio del software QGIS se determinó el tipo de uso de suelo, que, junto con los valores de área y precipitaciones de la microcuenca, se estimó el volumen de agua de esta.

## 26 Comparación de la oferta hídrica empleando la precipitación efectiva y el método racional para el año 2027

Por medio de la Tabla 12 se puede evidenciar que teniendo en cuenta los cambios de uso del suelo y el cálculo de la precipitación efectiva, los caudales obtenidos para los años estudiados no presentan una tendencia uniforme debido a que se registran periodos en los cuales estos valores aumentan mientras que en otros la oferta hídrica de la cuenca disminuye.

Por otro lado, los caudales obtenidos por medio del método racional muestran que los resultados obtenidos aplicando el modelo de Frederich Bell aumentan a medida del transcurso de los periodos de retorno analizados, mientras que los valores obtenidos por medio del modelo de Dick Peschke descenden a medida del tiempo (Tabla 16).

En cuanto a la comparación de la oferta hídrica para el año 2027, en la Tabla 17 se presentan los resultados obtenidos tanto en la simulación teniendo en cuenta la precipitación efectiva de la microcuenca y los caudales calculados a partir del método racional en el tiempo de retorno de 10 años.

Es necesario subrayar que la relación de caudal para el periodo de retorno de 10 años, que para el estudio es el año 2027, con el caudal obtenido por la simulación es de 1:2 por medio del modelo de Frederich Bell y aproximadamente de 1:2.5 empleando el método de Dick Peschke. Para finalizar, teniendo los valores registrados en la Tabla 12, los cuales representan los caudales calculados por medio de la precipitación efectiva, presentan un promedio de 0.46 m<sup>3</sup> /s. No obstante, el promedio de los caudales teniendo en cuenta los datos obtenidos con el método racional empleando el modelo Frederich Bell y Dick Peschke son de 0.247m<sup>3</sup> /s y de 0.

## 27 IV. CONCLUSIONES

El incremento de áreas en las coberturas vegetales se ha dado significativamente en la microcuenca según los modelos analizados esto en áreas nativas y especies endémicas como lo son los frailejones (*Espeletia grandiflora*) representando un valor positivo agregado a la investigación y a la zona de estudio donde se puede reconocer el esfuerzo por la protección de estos parques naturales.

A partir del análisis multitemporal realizado por medio de software SIG, se logran identificar las transformaciones del uso del suelo durante un periodo de tiempo determinado, además de proveer información actualizada de las zonas en riesgo o con cierto grado de vulnerabilidad, lo cual permite contar con insumos útiles para la toma de decisiones por parte de las autoridades competentes.

La variación de los usos de suelos entre los años de 1989 y 2017 indican que los cuerpos de agua han disminuido en un 30% de su área, así como las actividades agropecuarias que se han visto reducidas en un 11% del total del área de estudio. Los sistemas forestales han aumentado en un 33%, mientras que las áreas para la conservación incrementaron en un 30%, esto gracias a la reforestación y a la población cercana al páramo.

Para estimar la oferta hídrica sobre la cobertura y uso de suelo a través del tiempo, se llevó a cabo un análisis multitemporal de estos usos, donde se registran las ganancias y pérdidas de cada uno. El número de curva se evaluó por medio de los caudales máximos empleando los registros históricos de la estación pluviométrica Toquilla y la estación Puente Las Cañas, con un análisis de frecuencia realizado por medio de diferentes distribuciones de probabilidad. La prueba de Kolmogórov-Smirnov reportó que en la estación Puente Las Cañas, la distribución más apropiada fue log-Gumbel (0.1195), mientras que para la estación Toquilla, la distribución normal fue la mejor puesto que presentó un ajuste con un valor de 0.0871.

Los resultados de la oferta hídrica empleando la precipitación efectiva y el método racional evidencian que con el método de la SCS el promedio de los valores de caudal fue mayor (0.46 m<sup>3</sup> /s) en comparación con los resultados obtenidos a partir del método racional empleando los modelos de Frederich Bell y Dick Peschke donde se presentaron valores de caudal de 0.247m<sup>3</sup> /s y de 0.162m<sup>3</sup> /s respectivamente. Además, teniendo en cuenta el caudal simulado para un periodo de retorno de 10 años (2027) se identificó que la relación de la oferta hídrica por el método de escorrentía superficial con el método de Frederich Bell es de 1:2 mientras que con el método de Dick Peschke es de 1:2.5.



Figure 1:



Figure 2:

<sup>1</sup> Volume 23 | Issue 2 | Compilation 1.0 © 2023 Great Britain Journal Press

<sup>2</sup> Volume 23 | Issue | Compilation 1.0 © 2023 Great Britain Journal Press







3

Figure 4: Figura 3 :

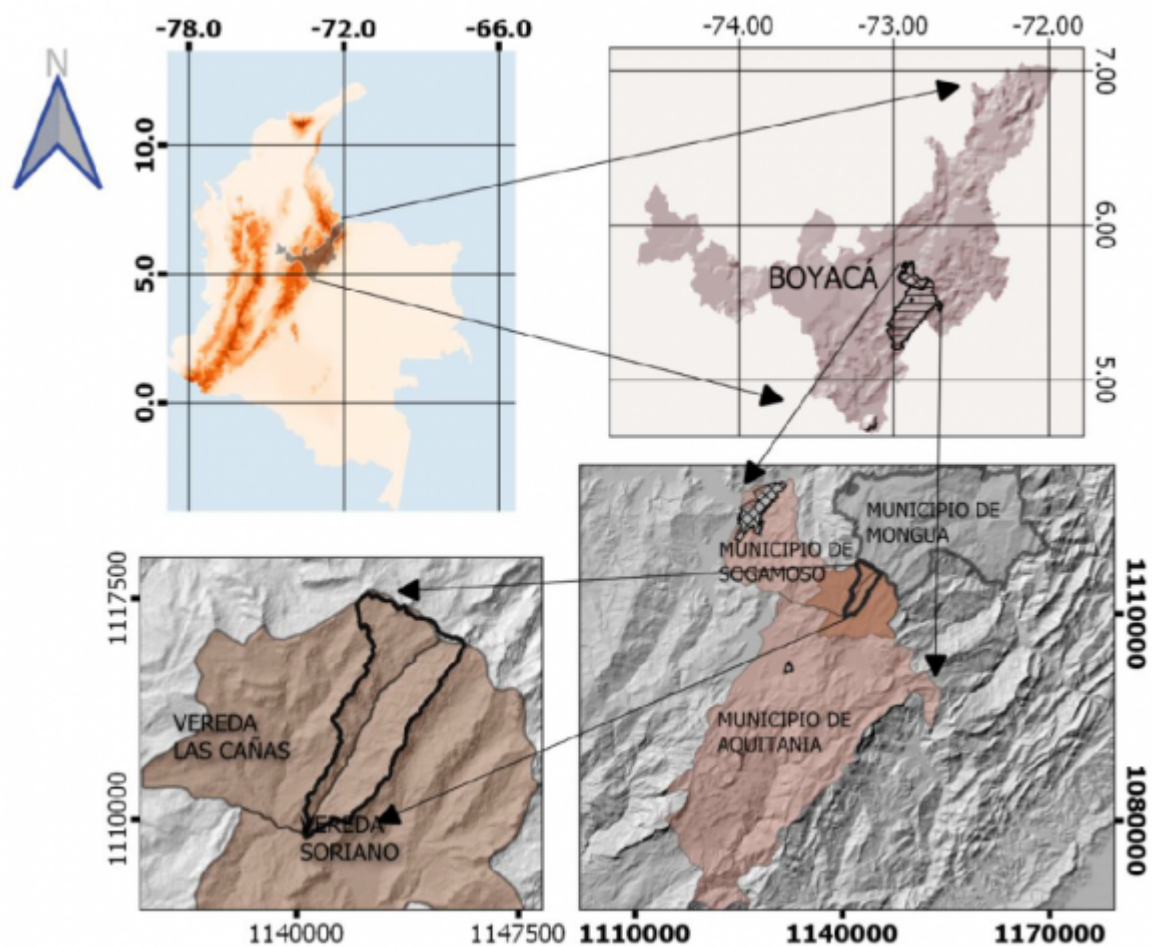


Figure 5:

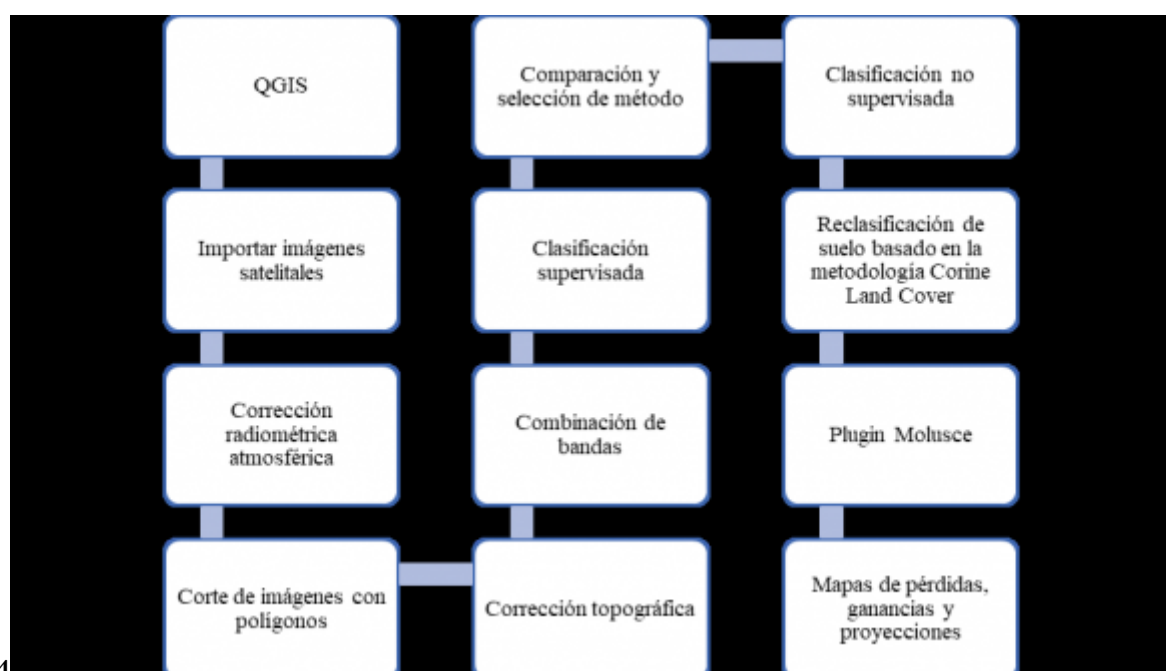


Figure 6: Figura 4 :

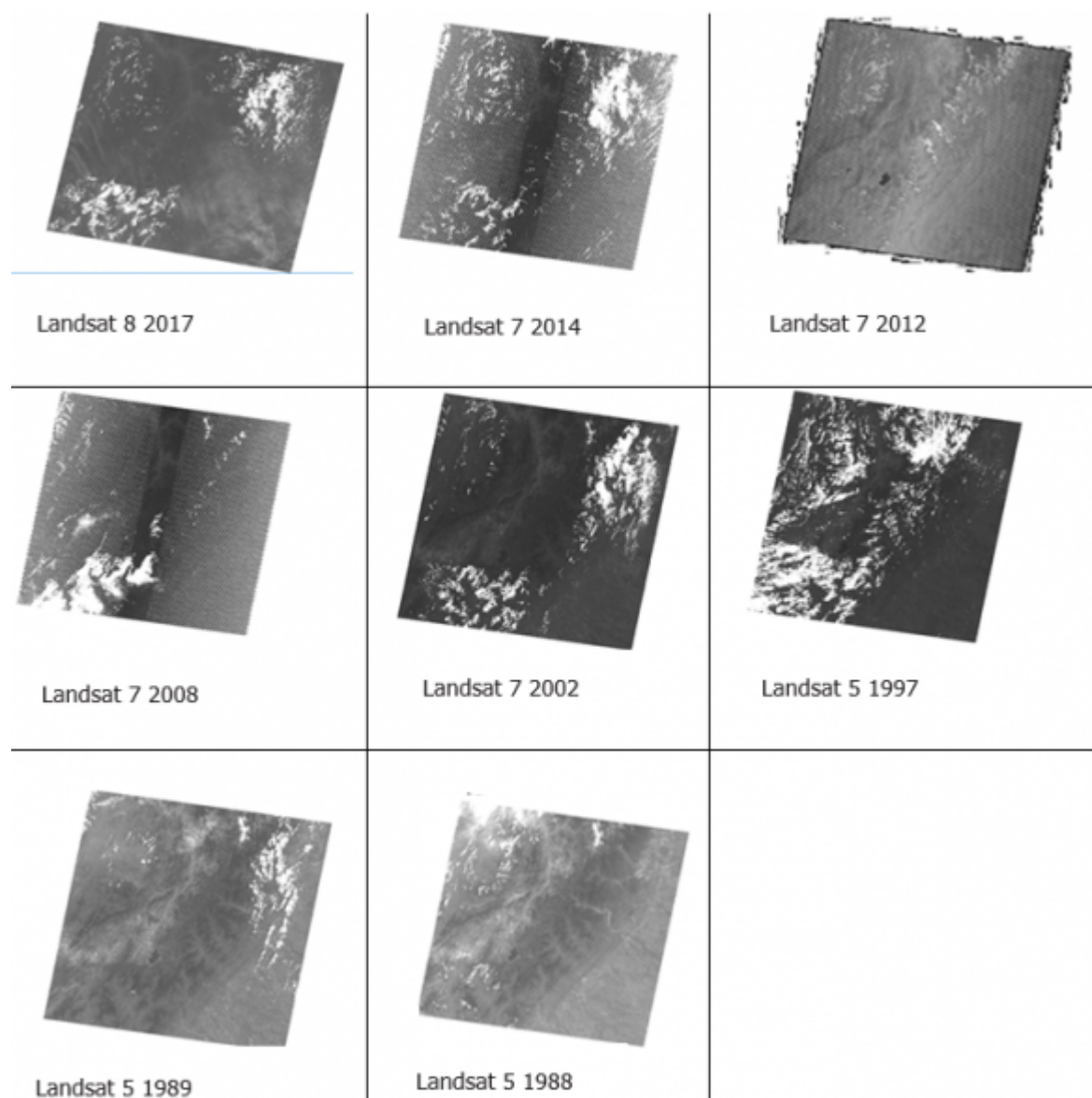


Figure 7:

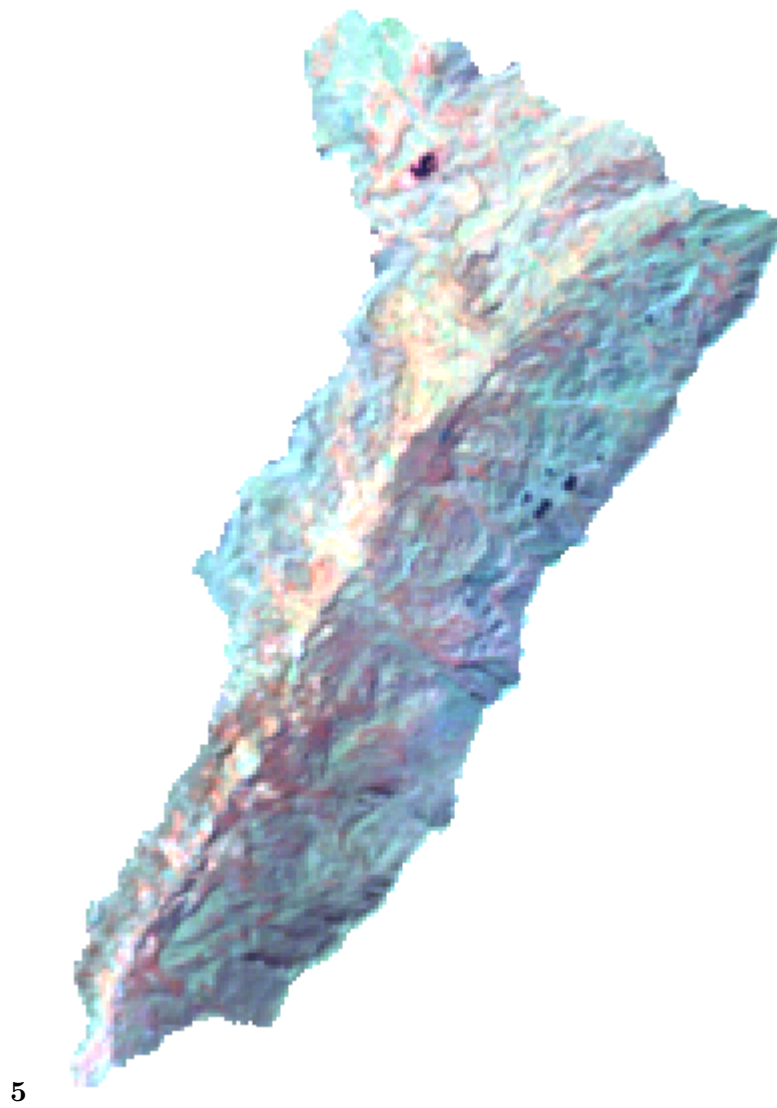
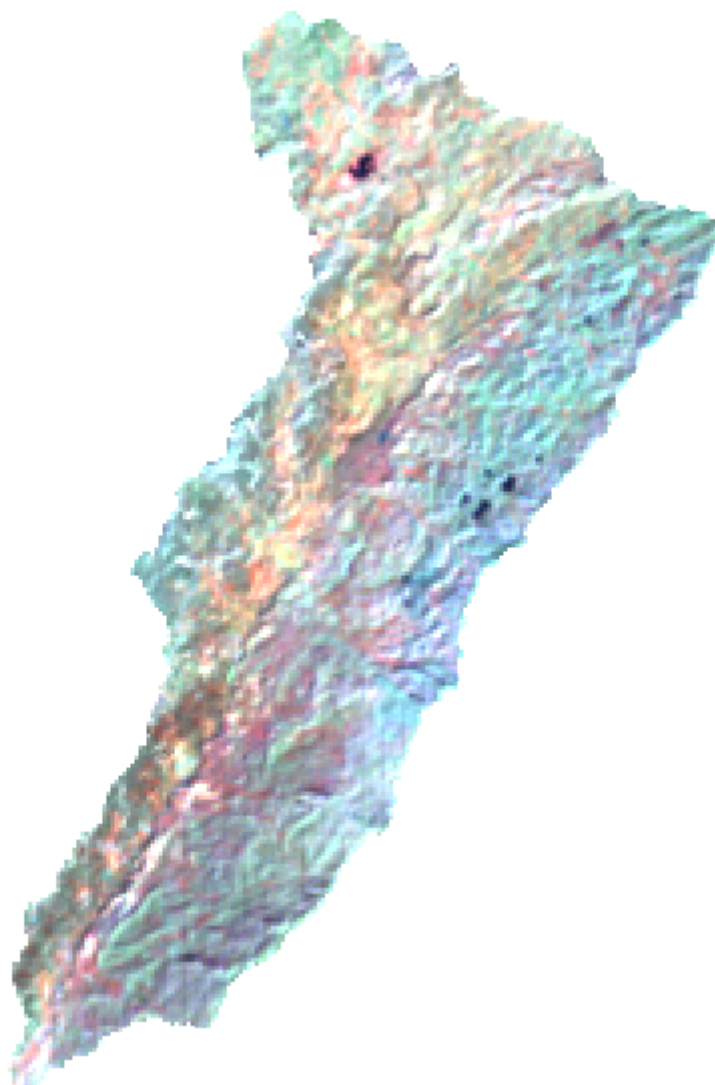


Figure 8: Figura 5 :



6

Figure 9: Figura 6 :

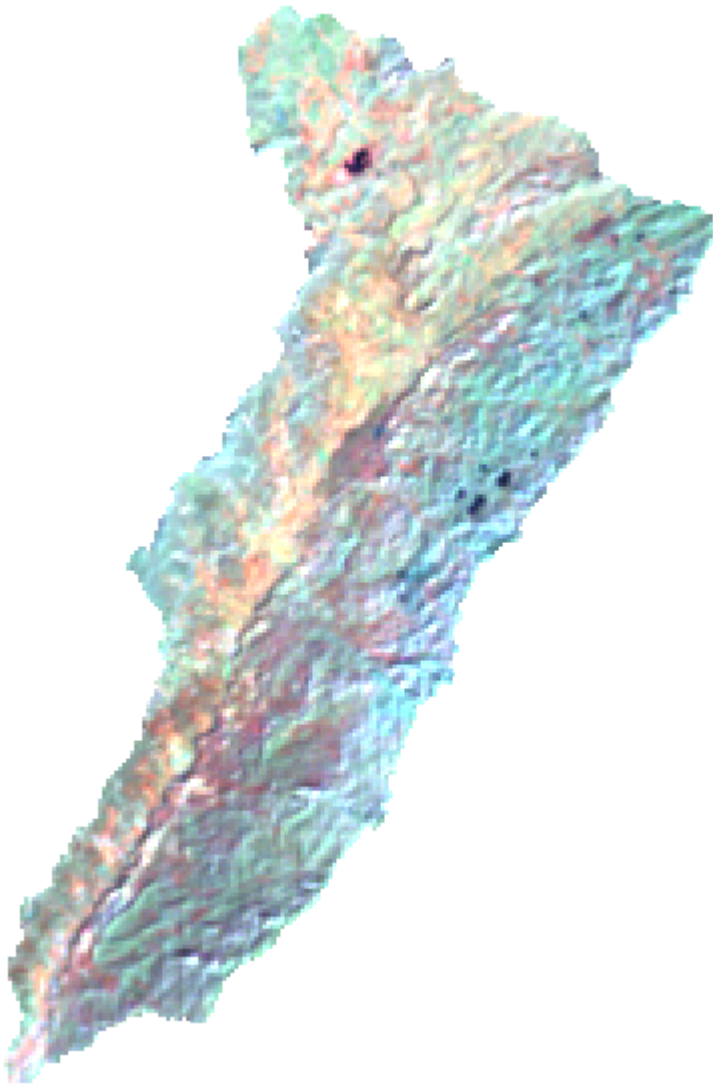


Figure 10:

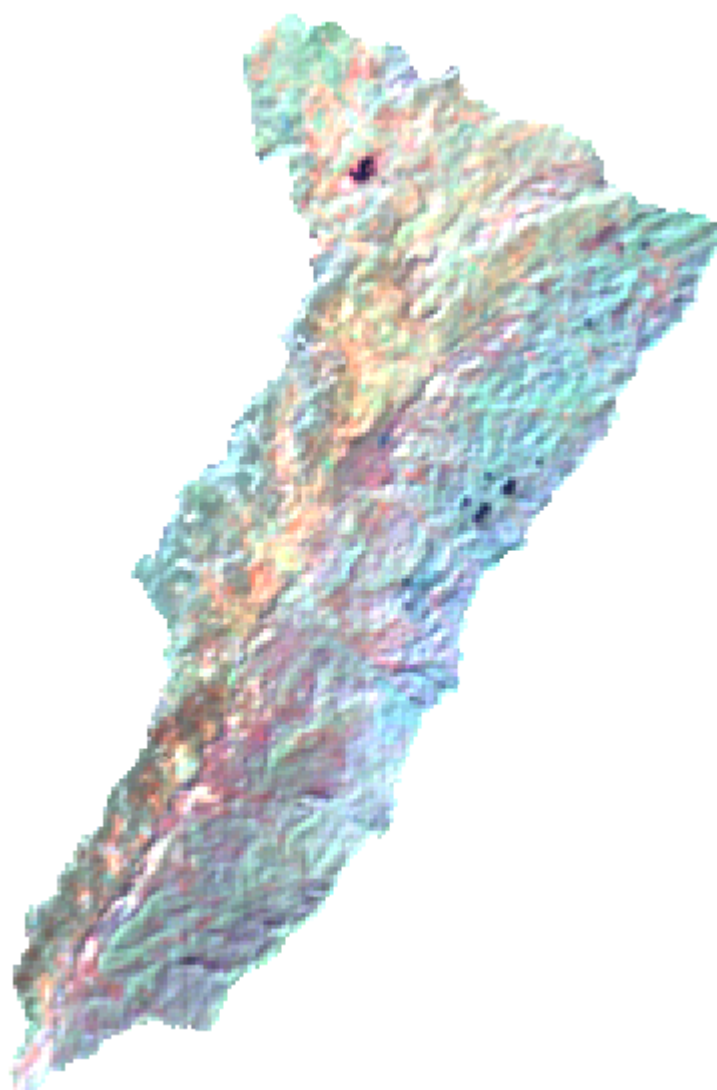


Figure 11: Figura 8 :Tabla 4 :

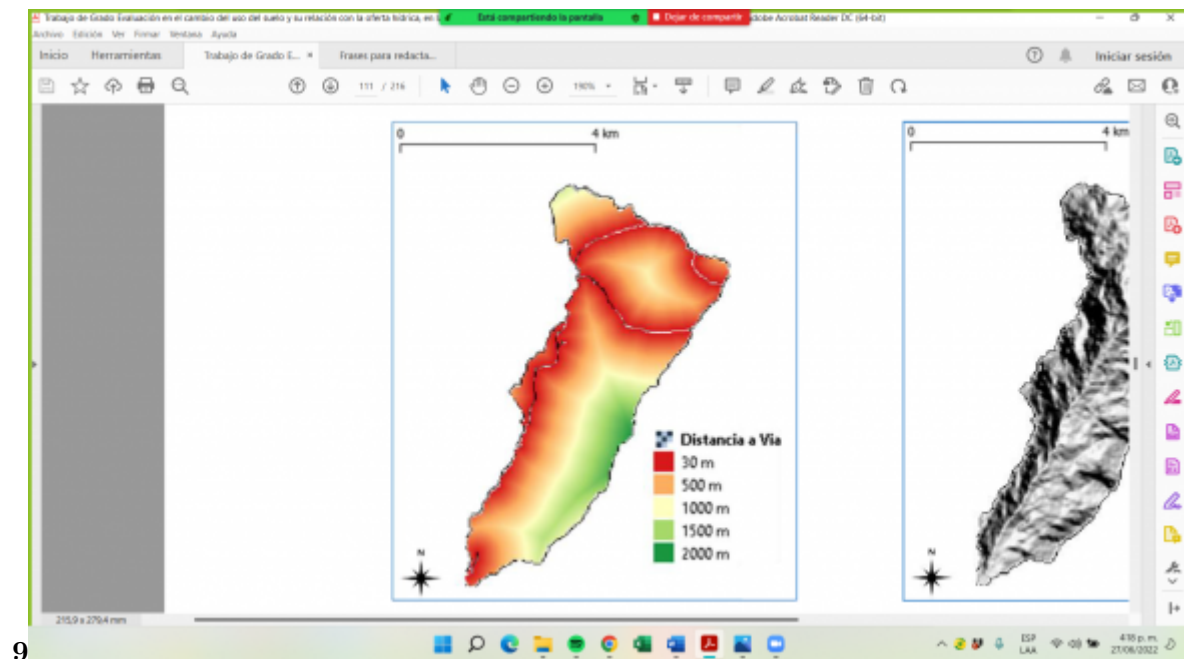


Figure 12: Figura 9 :

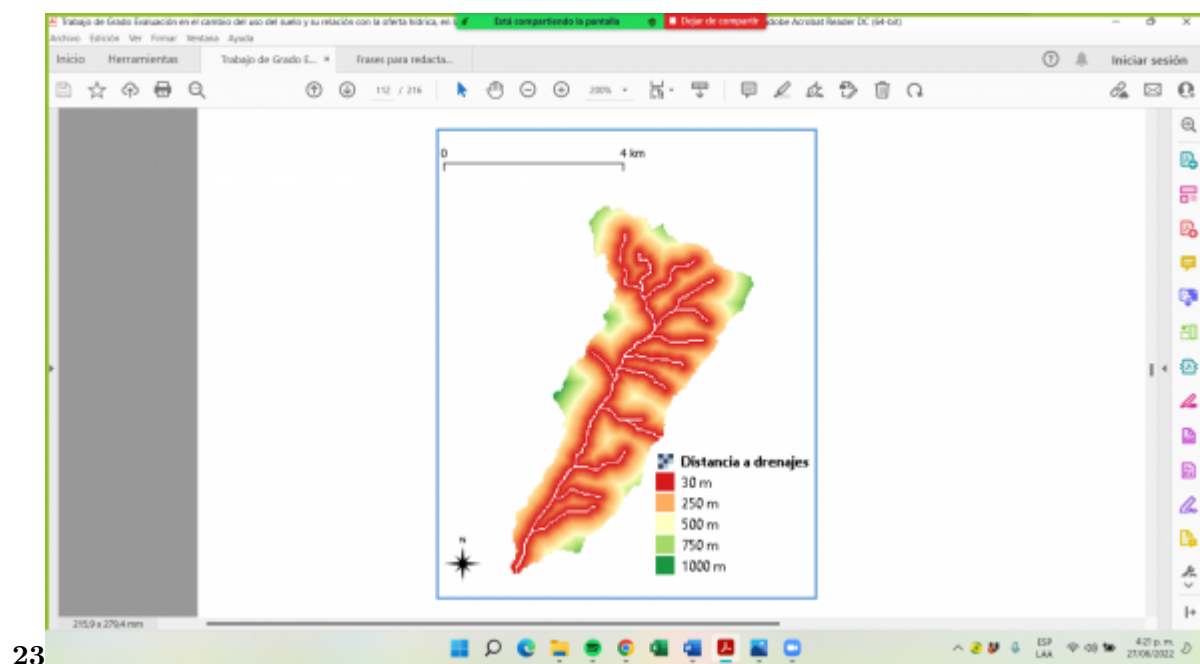


Figure 13: Fuente: Autores © Volume 23 |



10

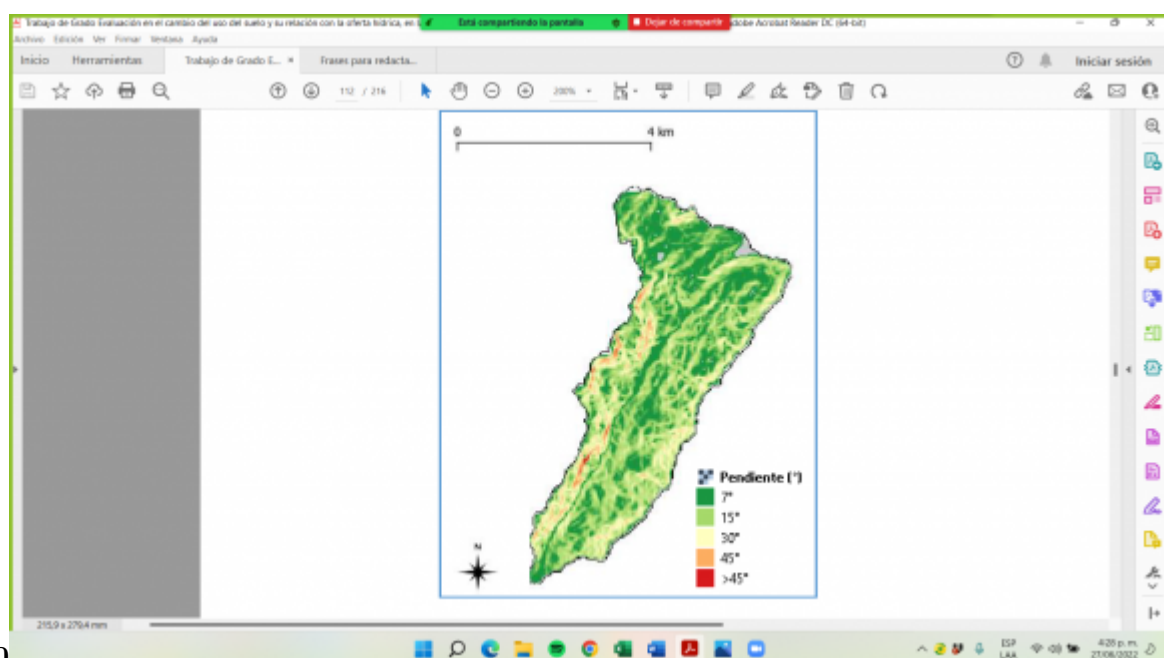


Figure 14: Figura 10 :

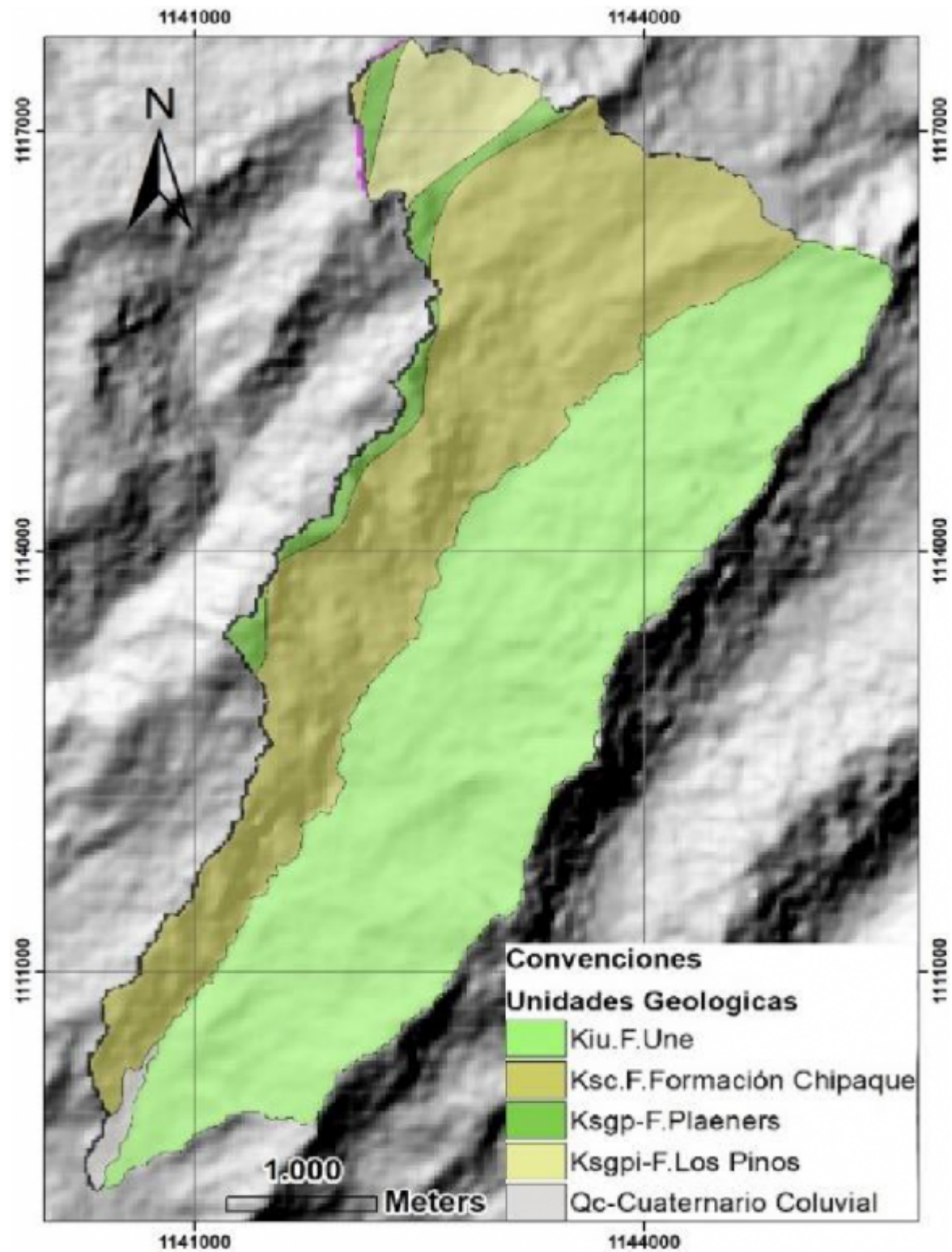


Figure 15:

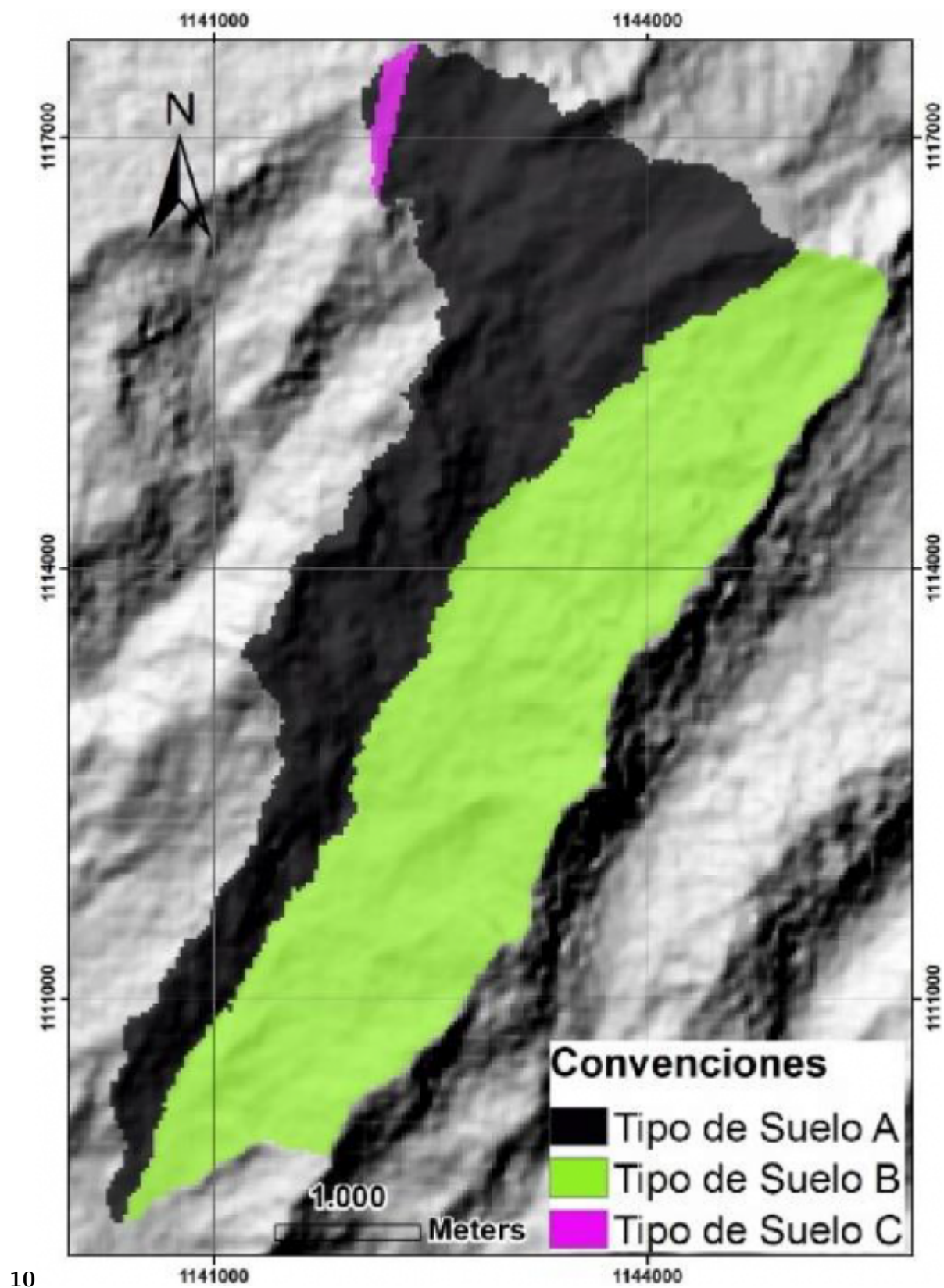


Figure 16: 10 60

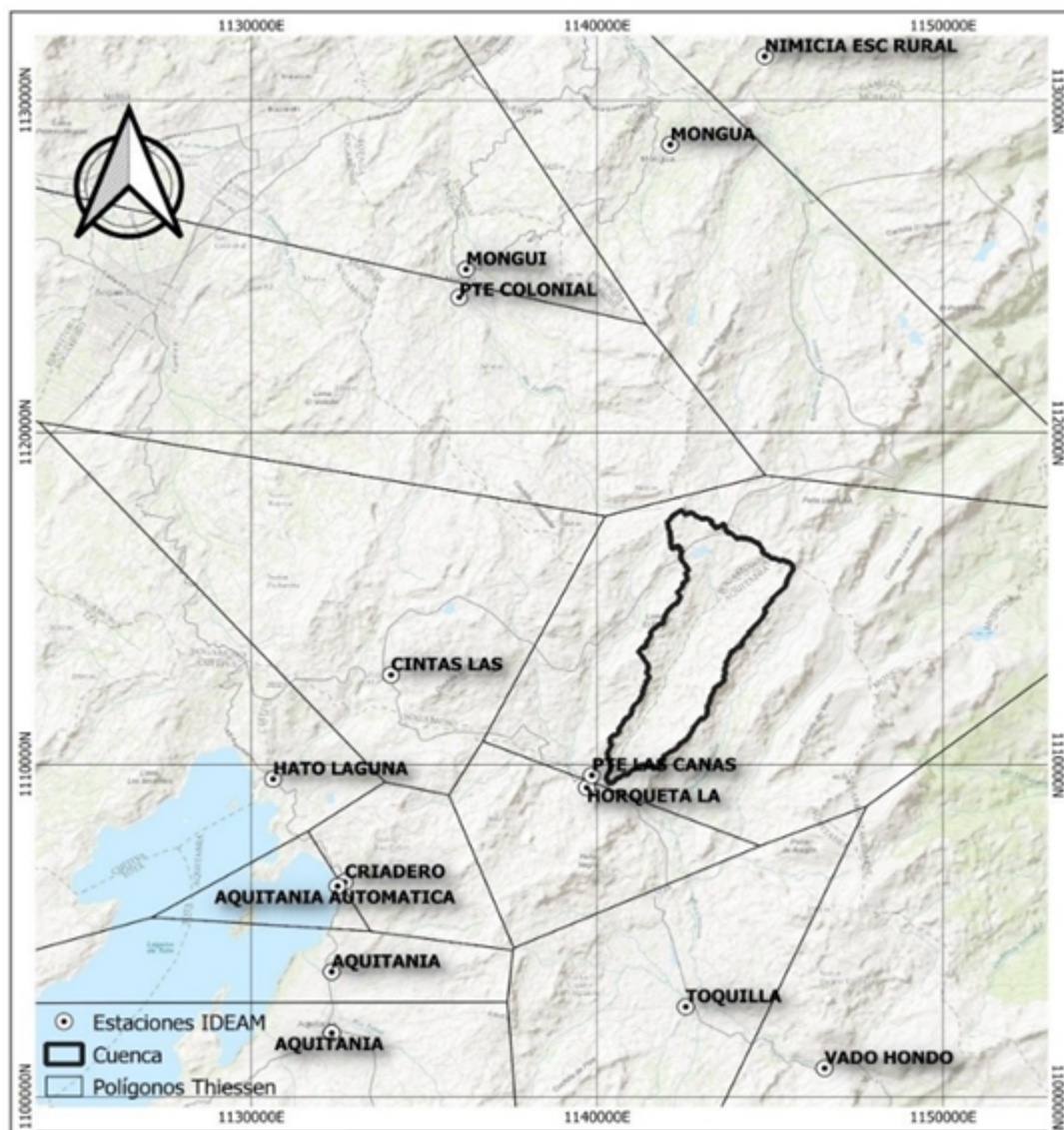


Figure 17: I



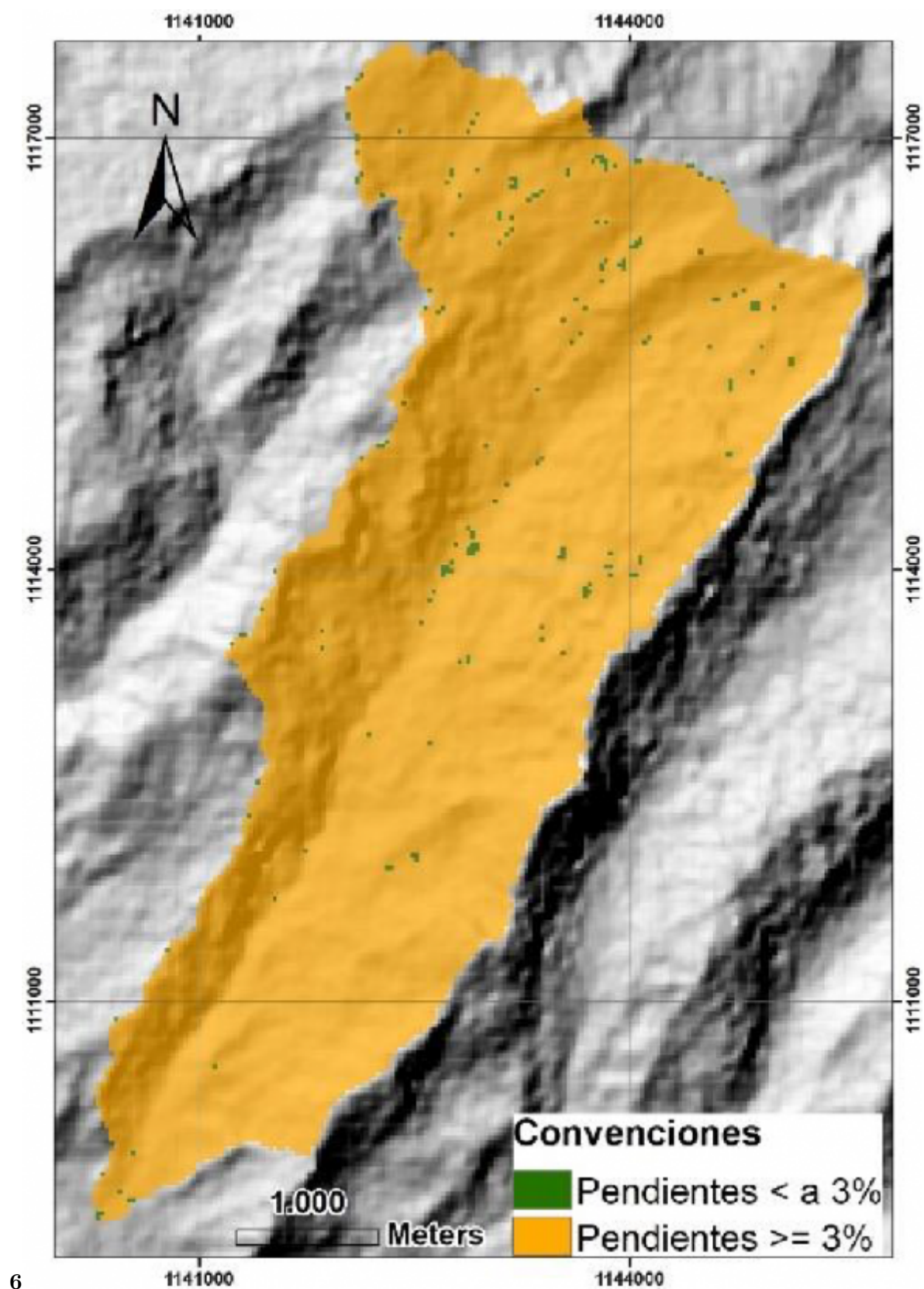


Figure 18: Tabla 6 :

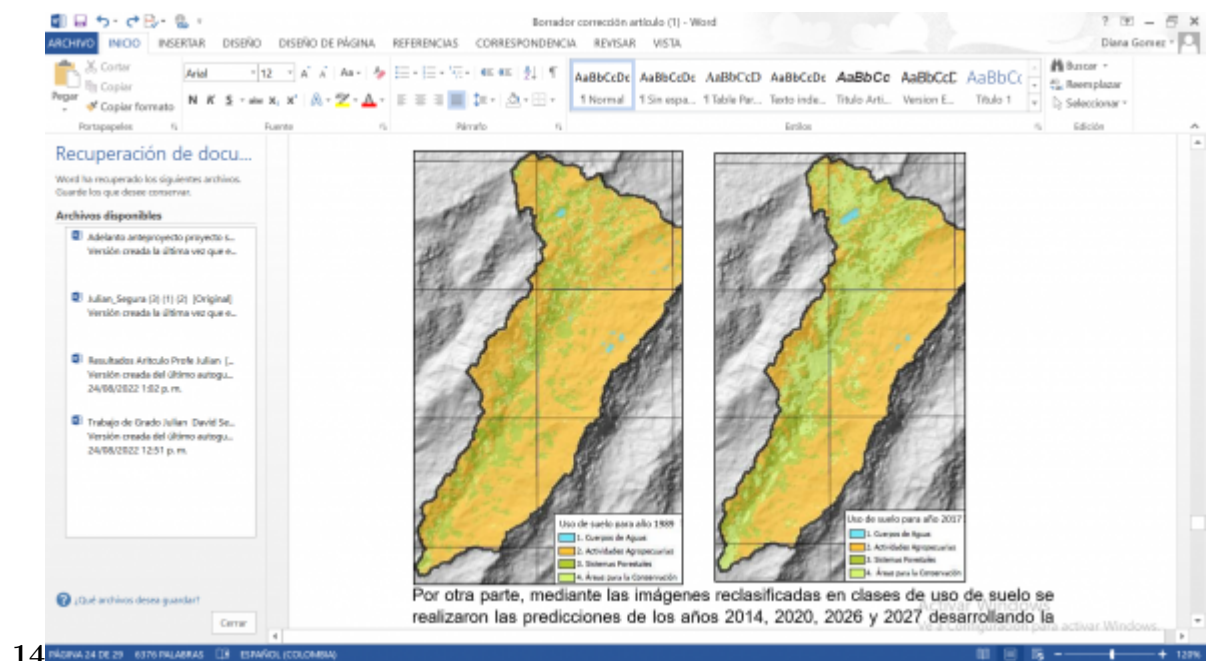
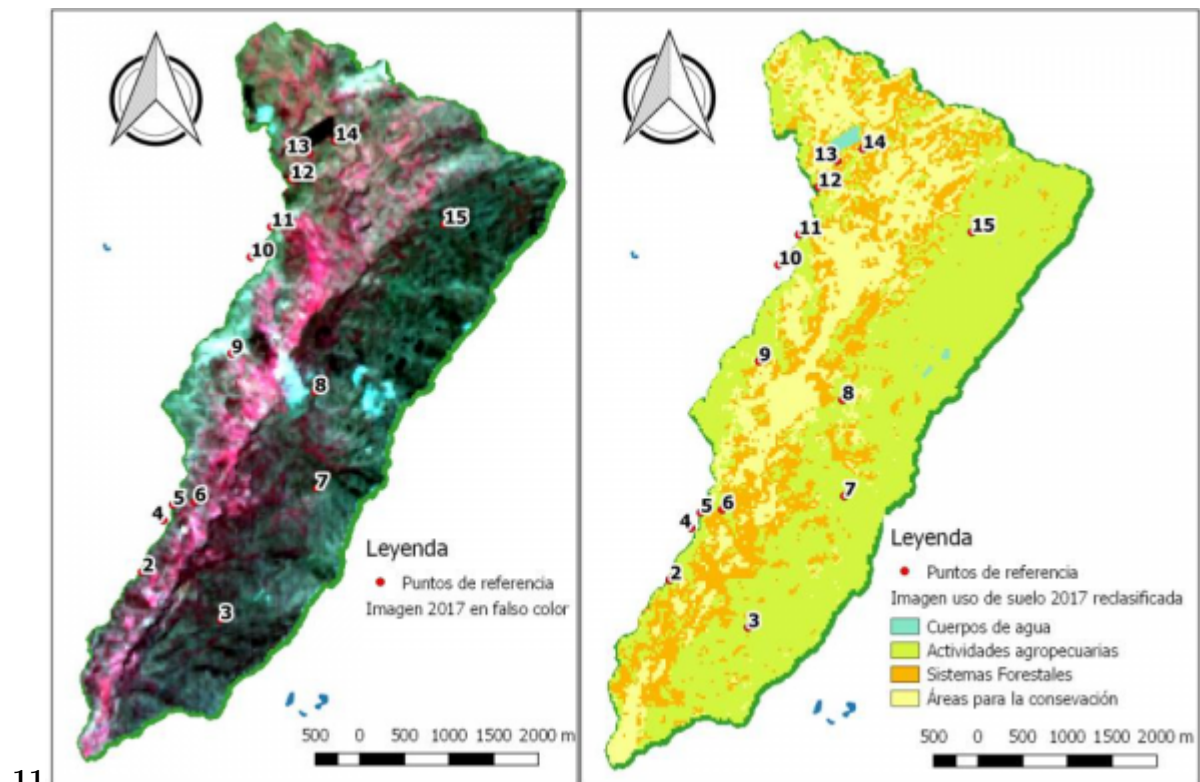


Figure 20: Figura 14 :

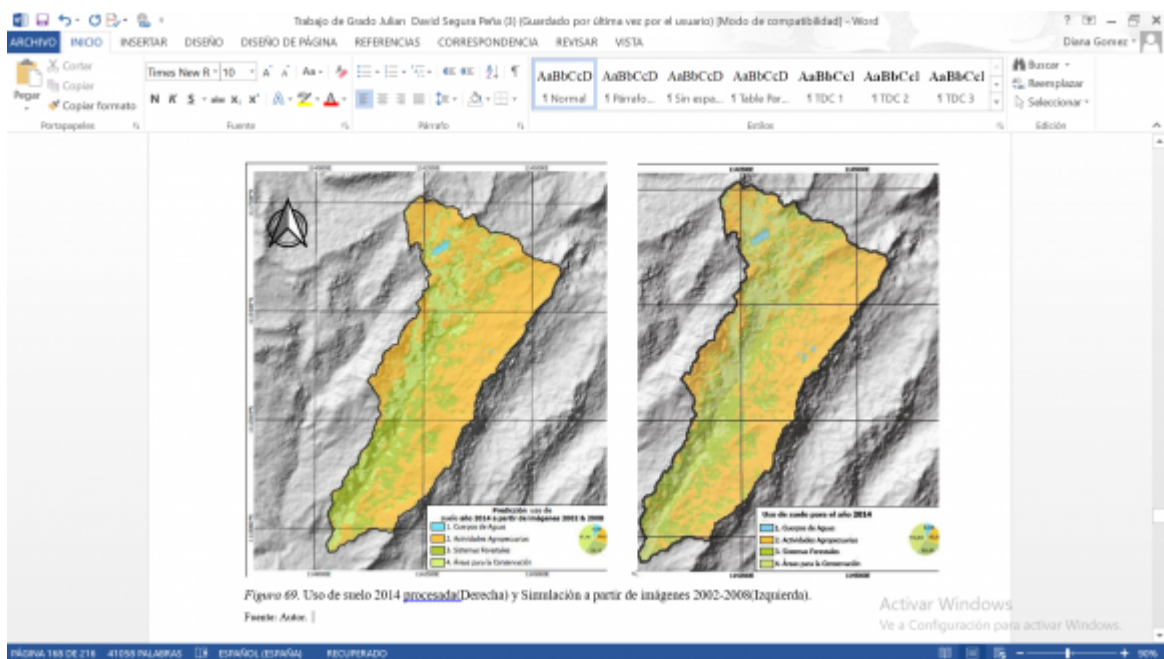


Figure 21:

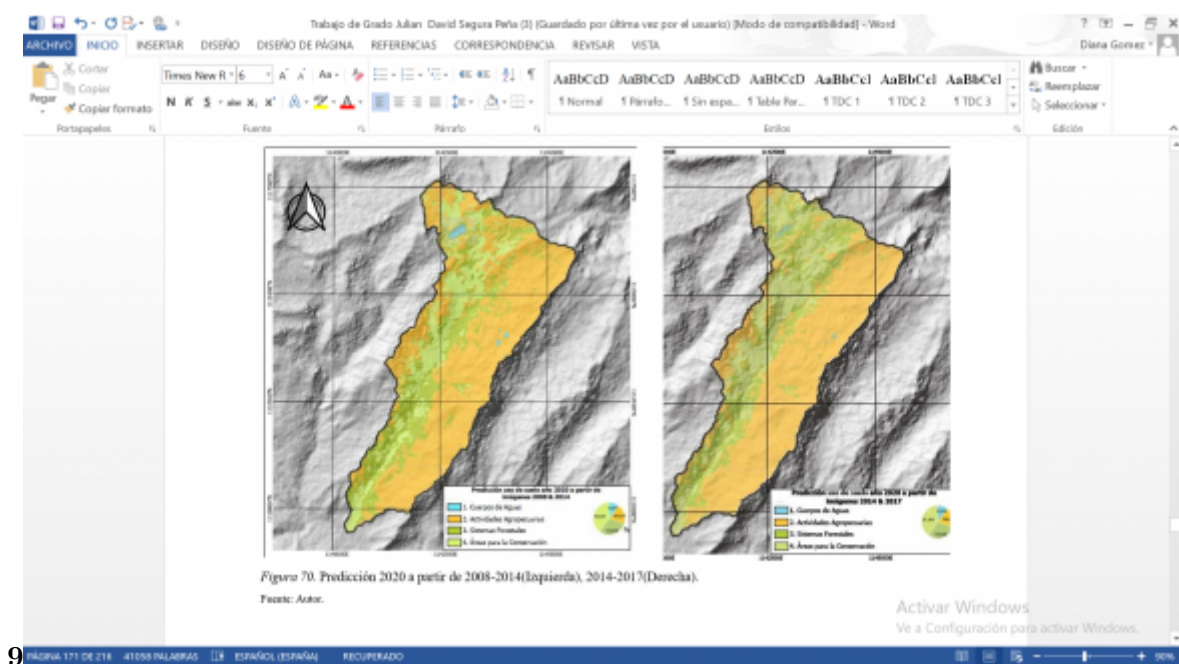


Figure 22: Tabla 9 :

15

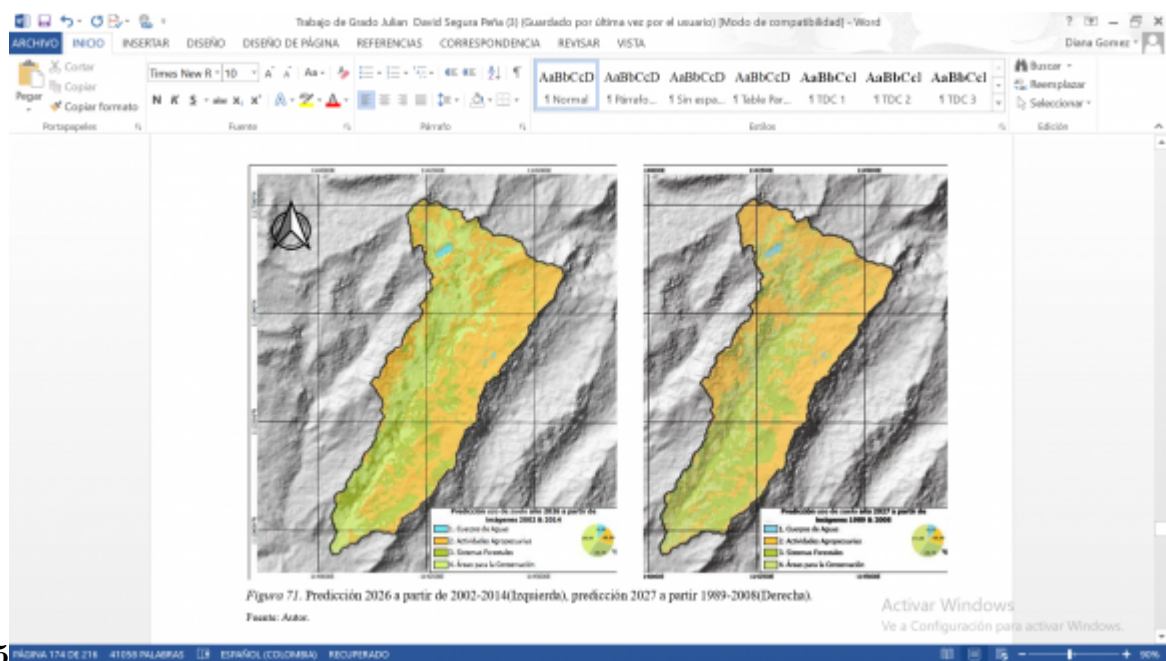
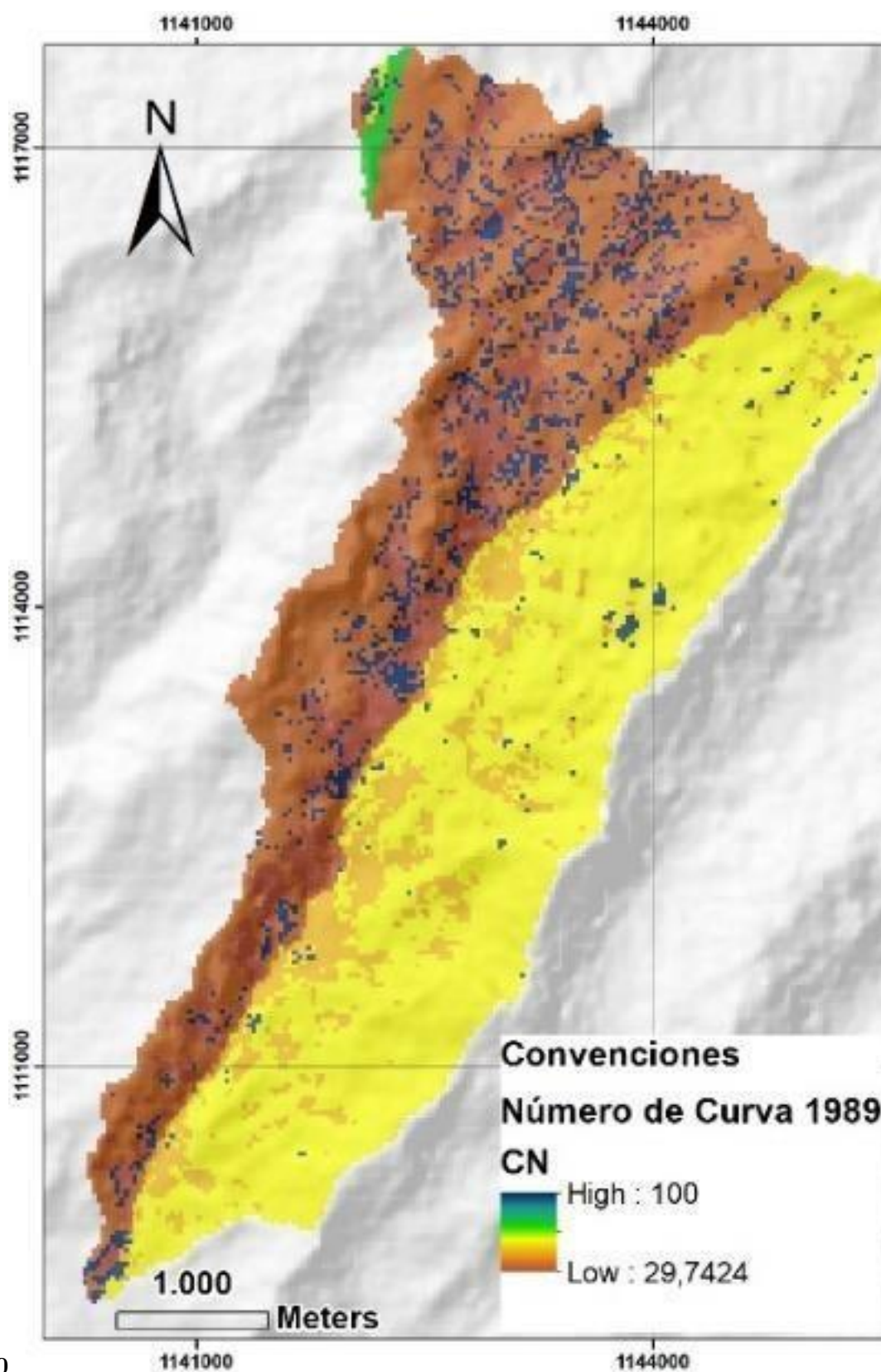


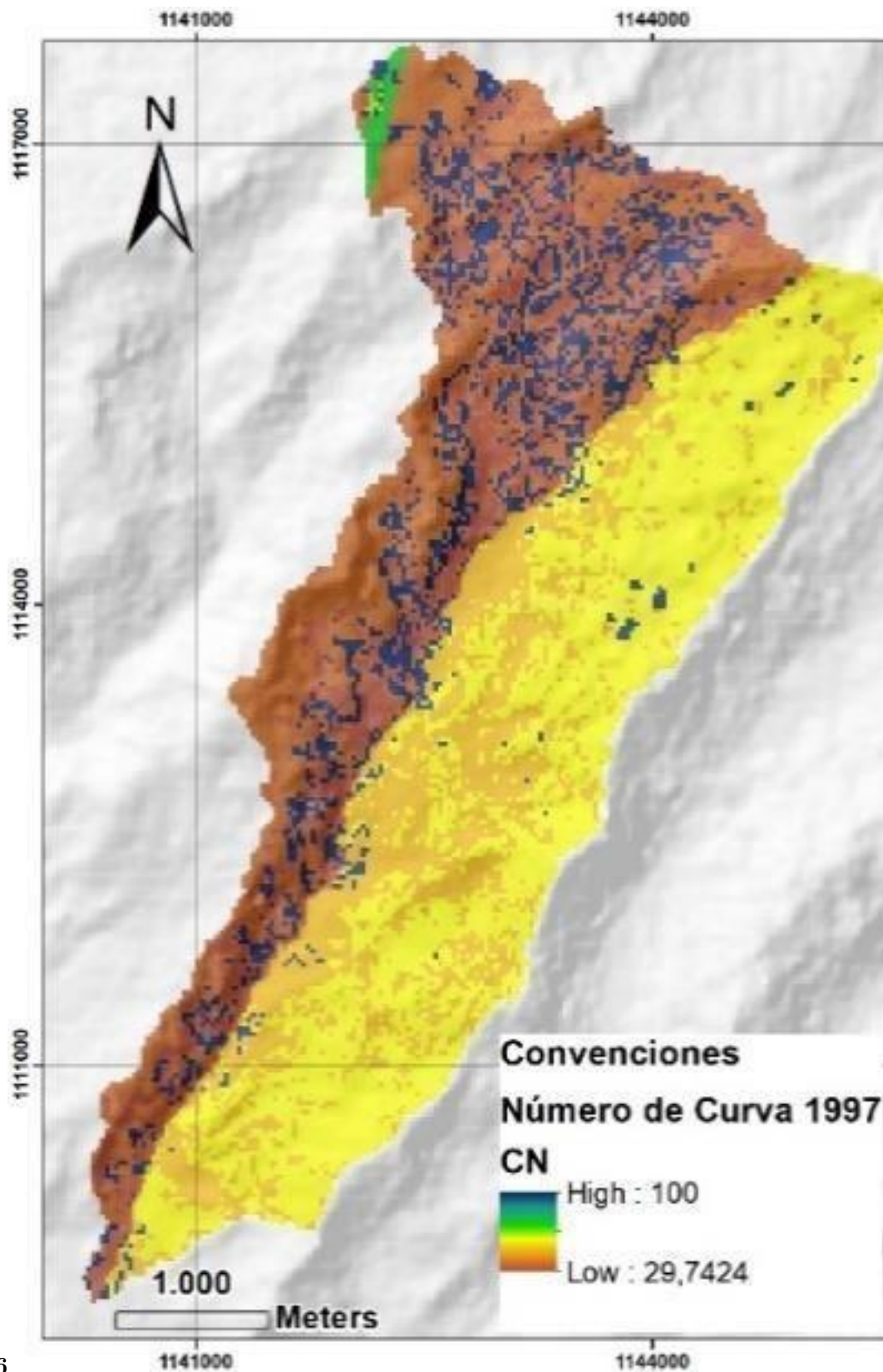
Figure 23: Figura 15 :





10

Figure 24: Tabla 10 :



16

Figure 25: Figura 16 :

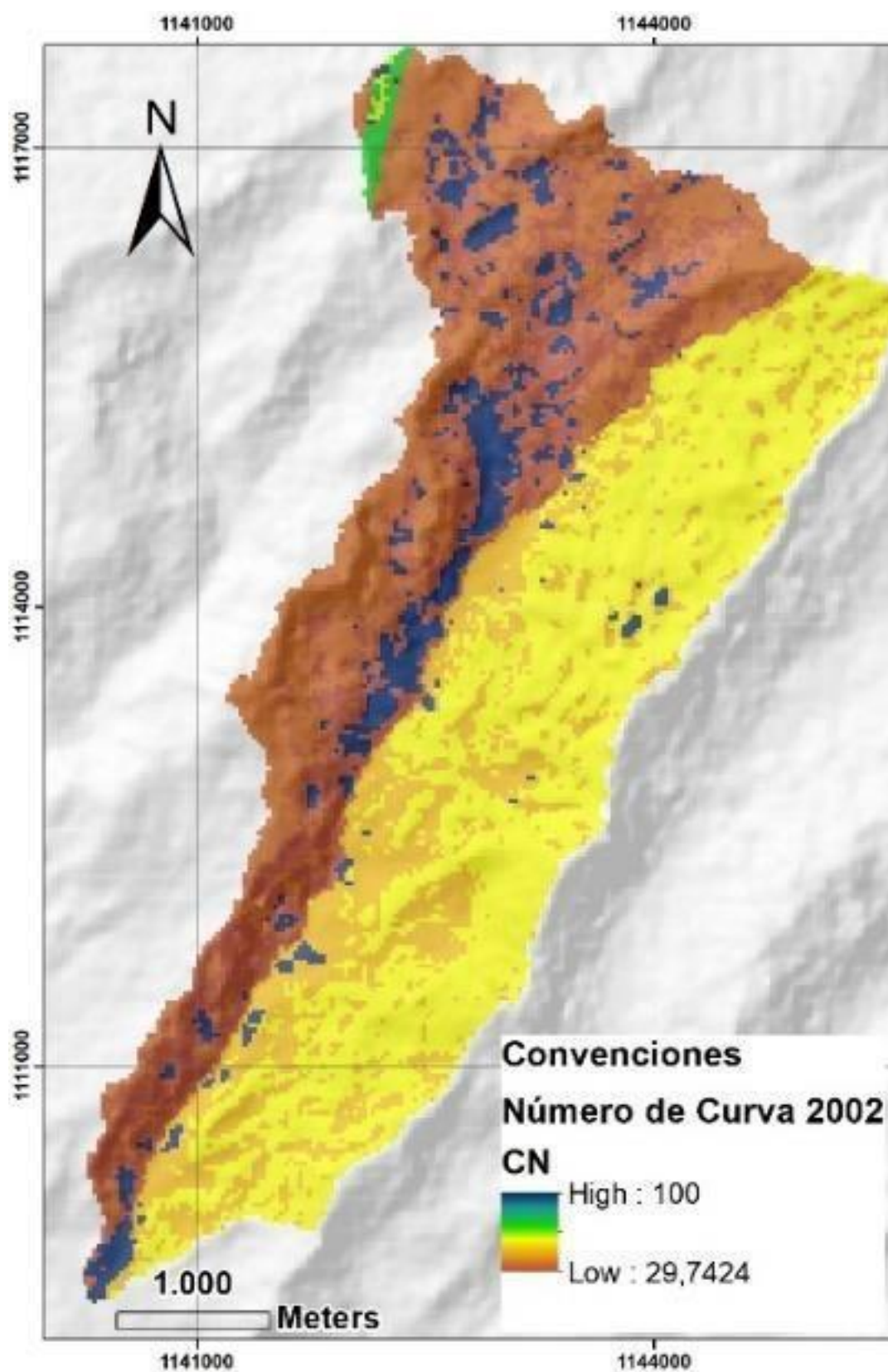
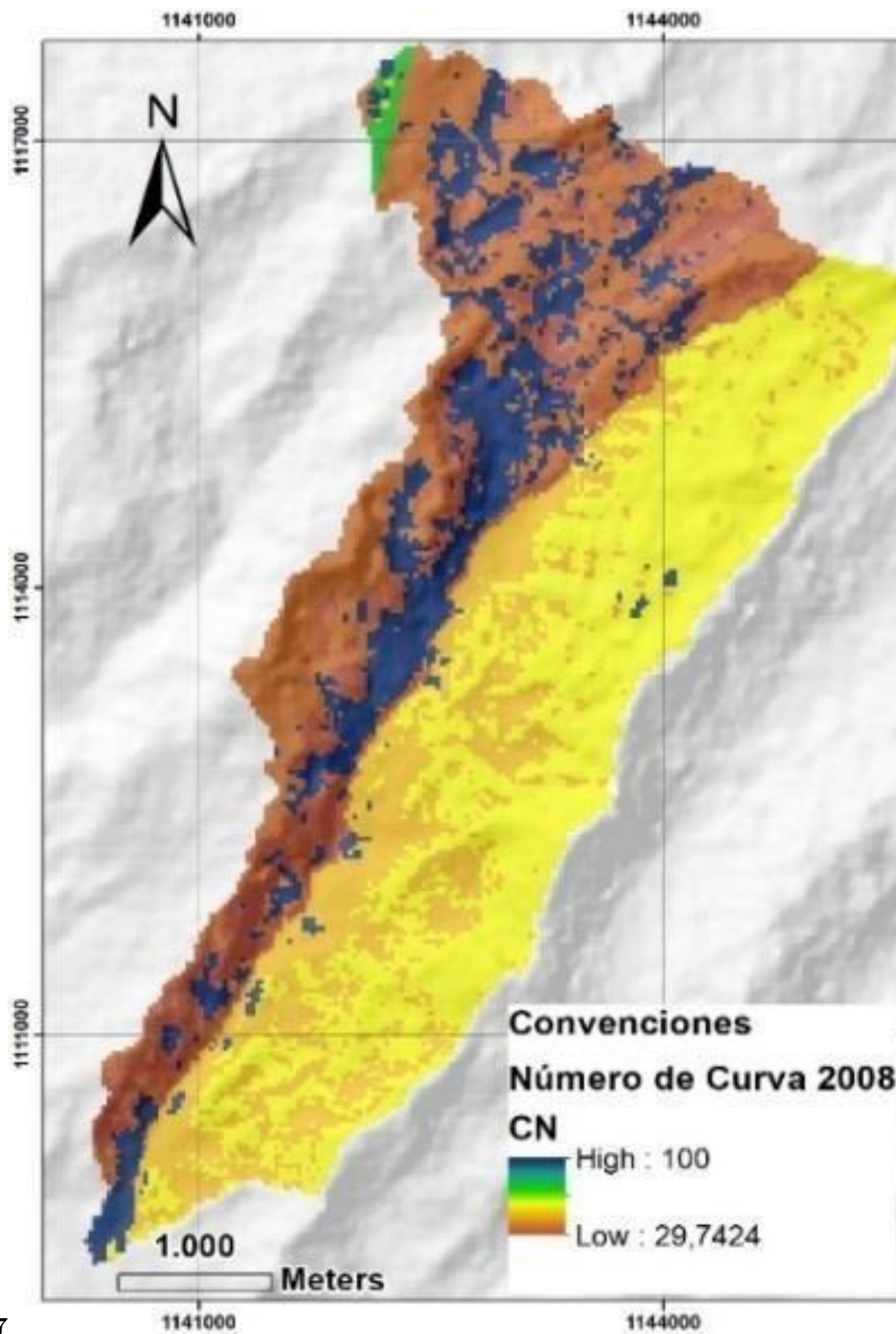


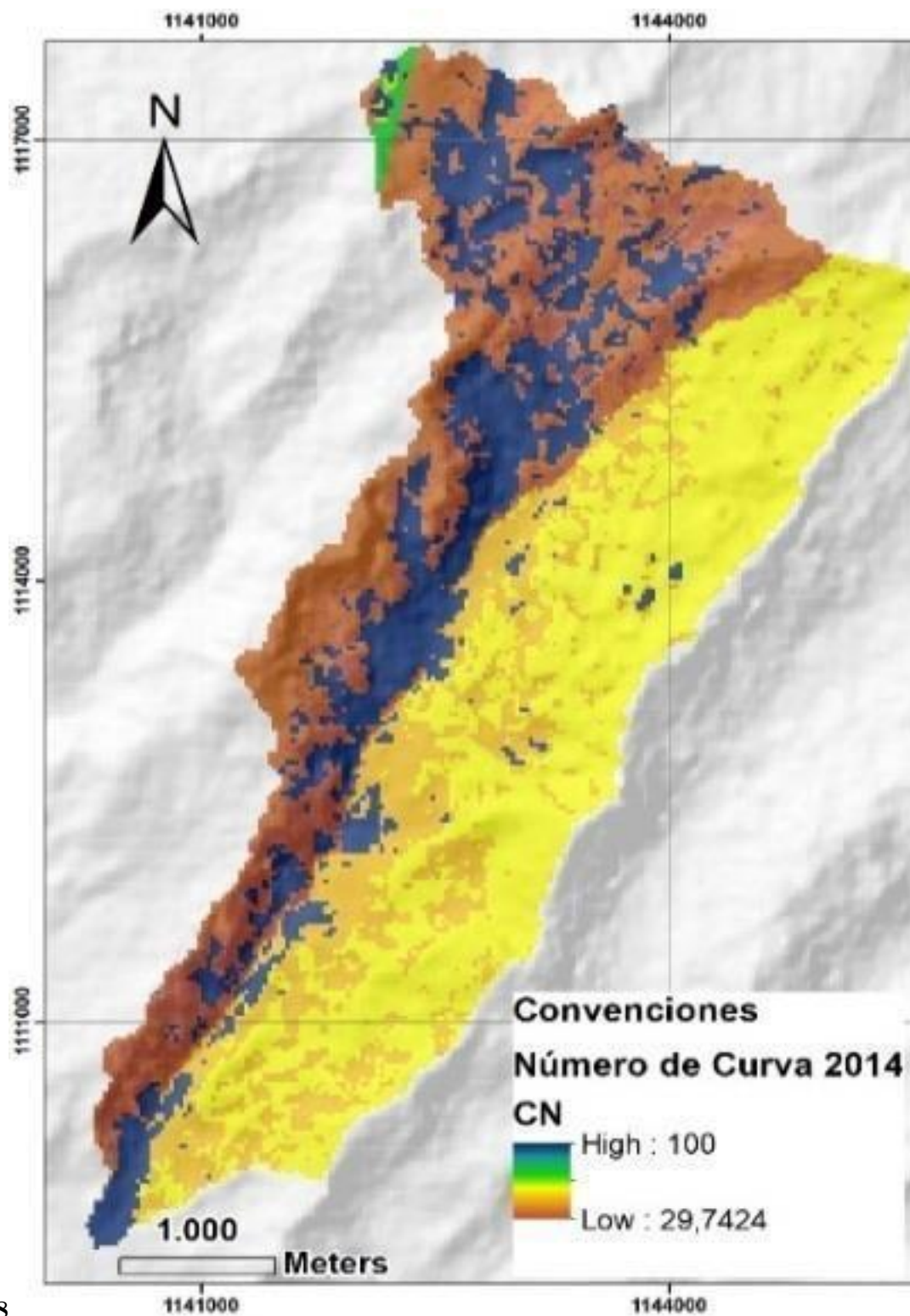
Figure 26:





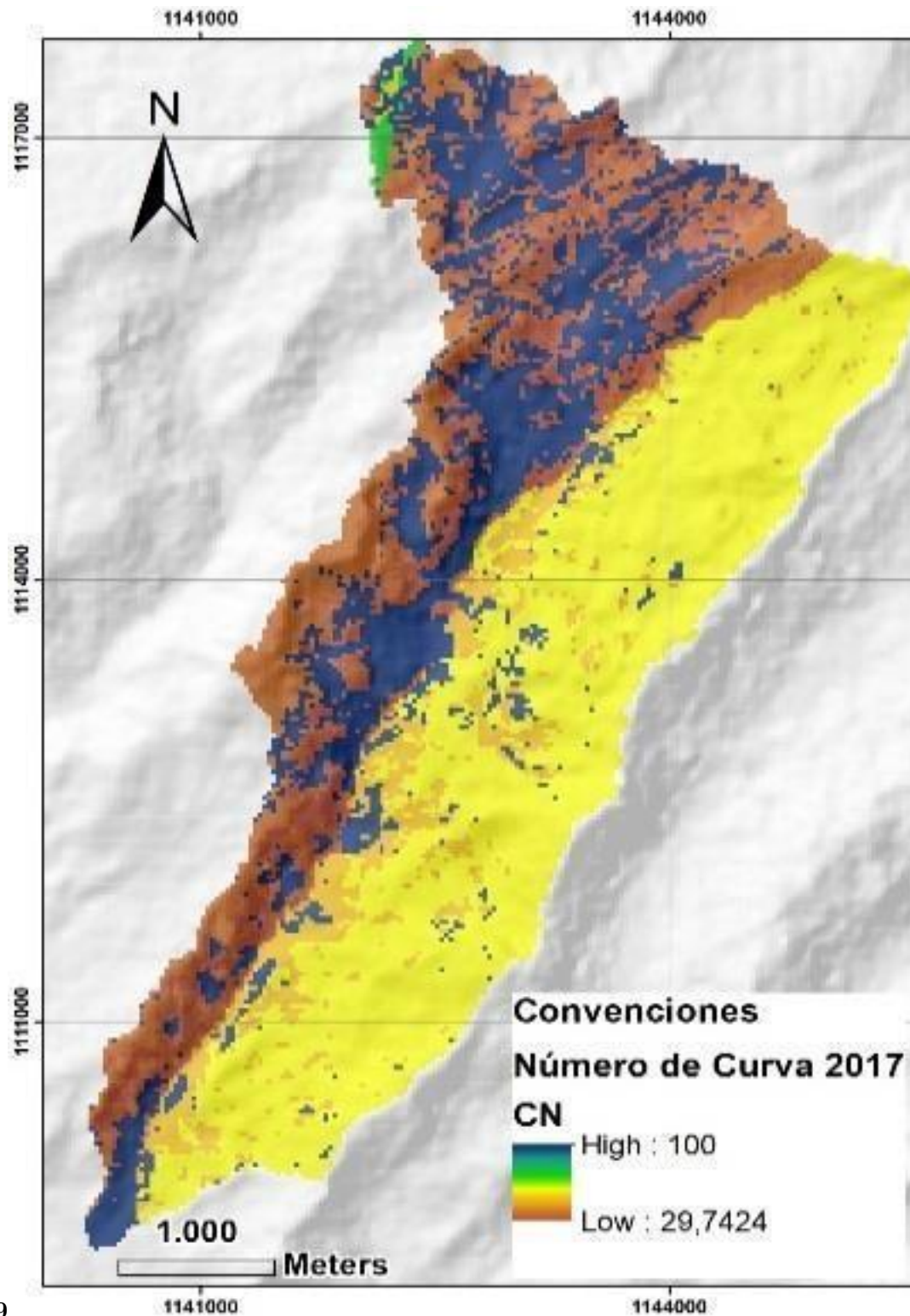
17

Figure 27: Figura 17 :



18

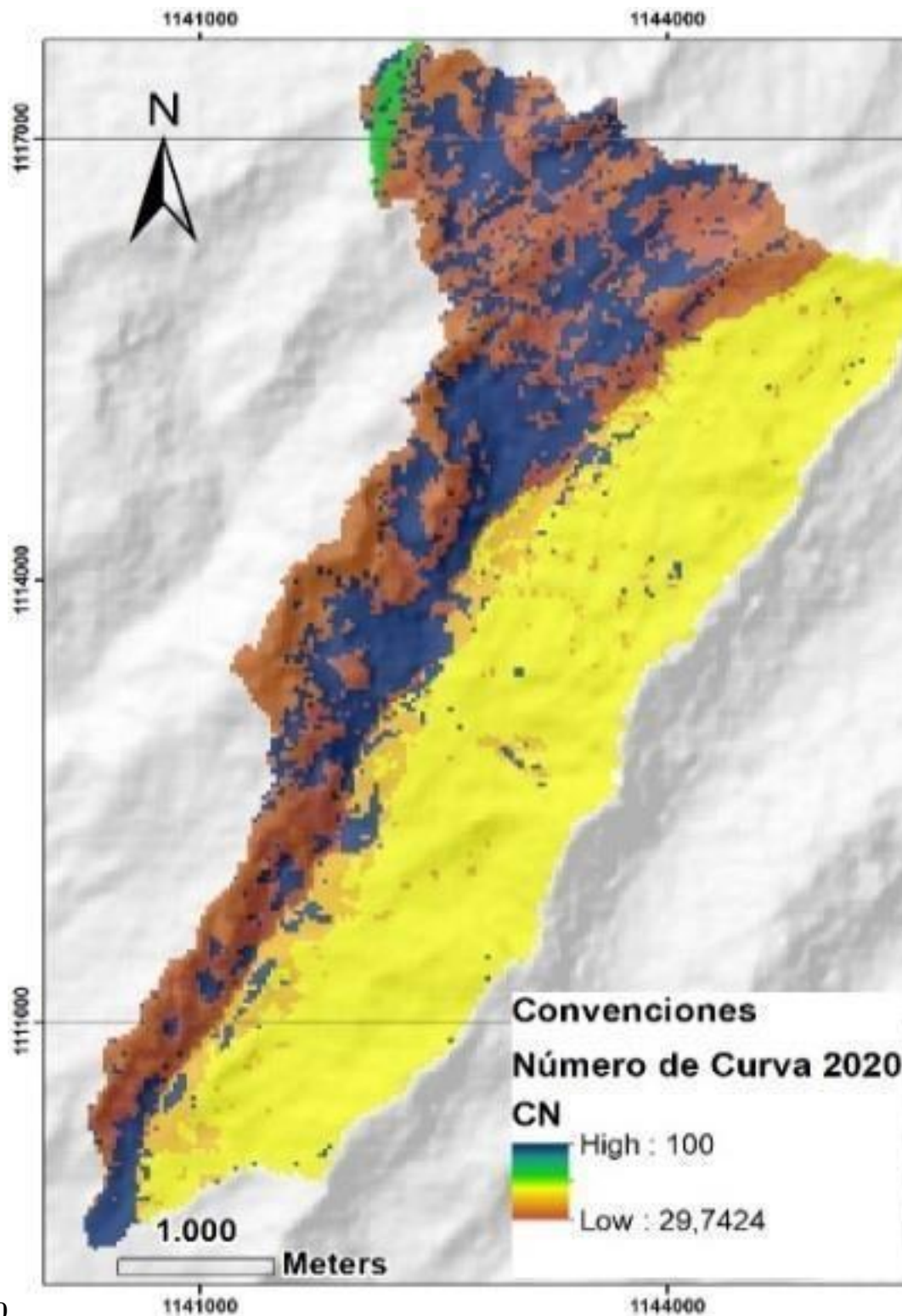
Figure 28: Figura 18 :



19

Figure 29: Figura 19 :





20

Figure 30: Figura 20 :

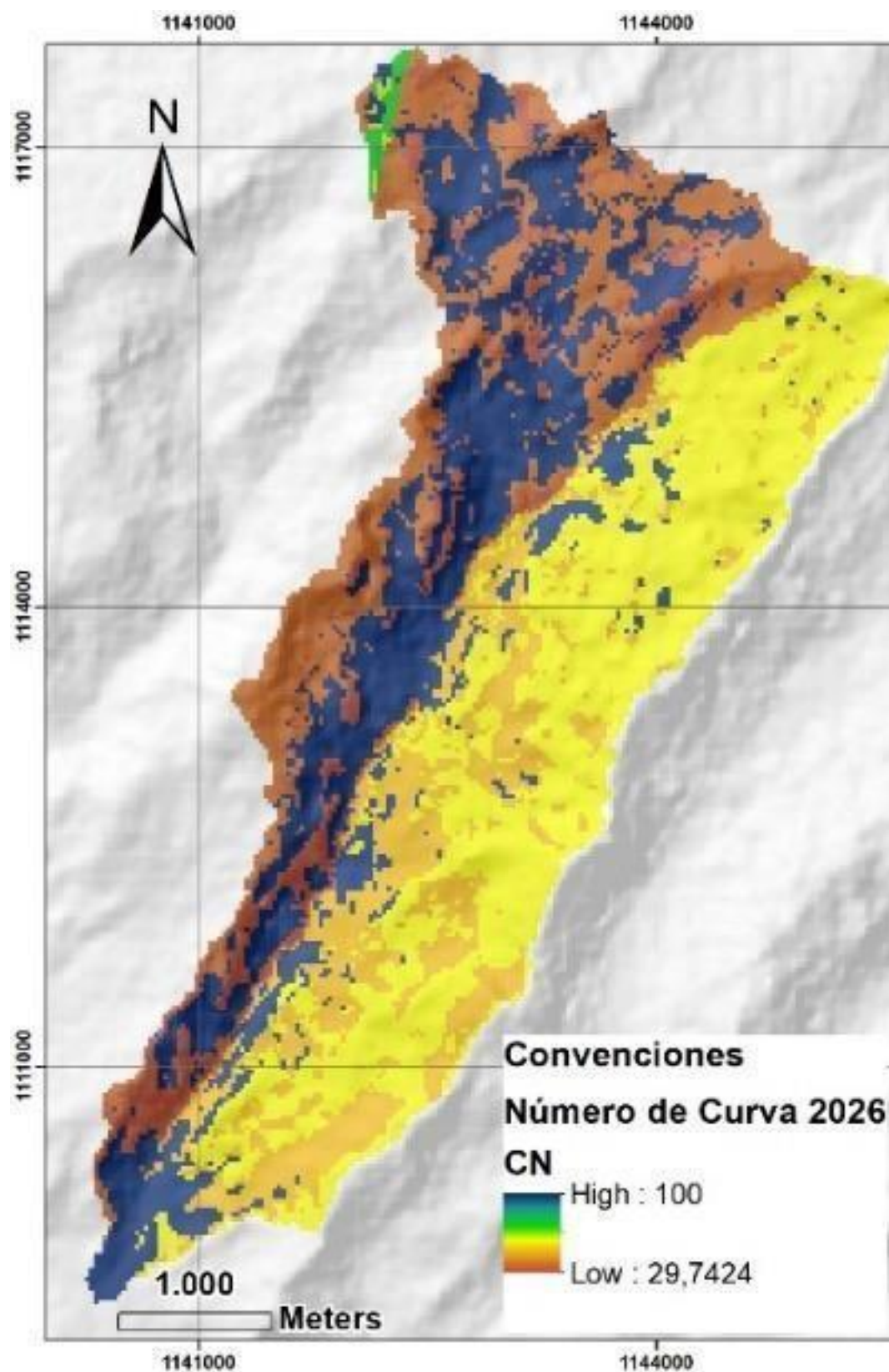


Figure 31:



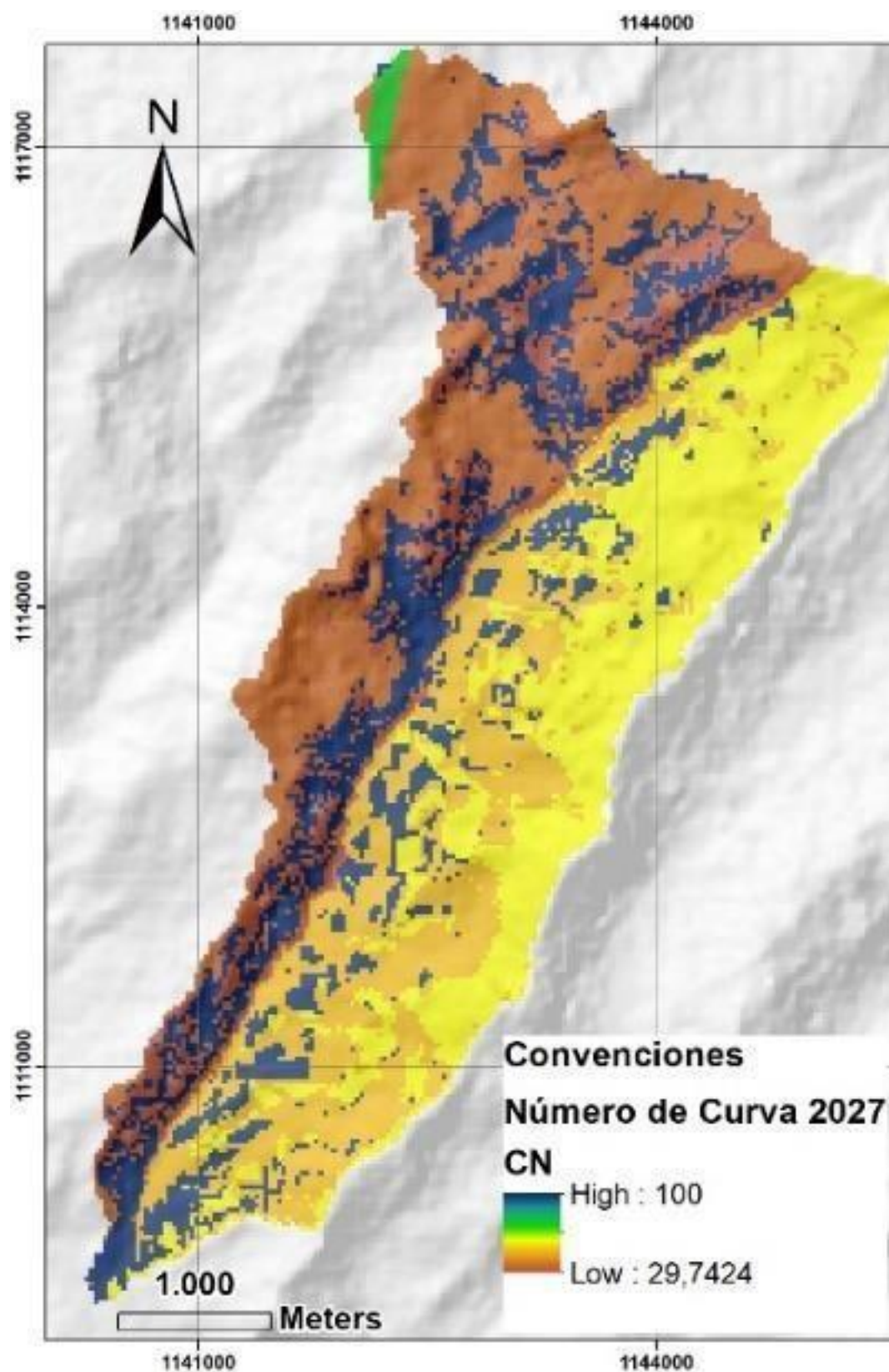


Figure 32:

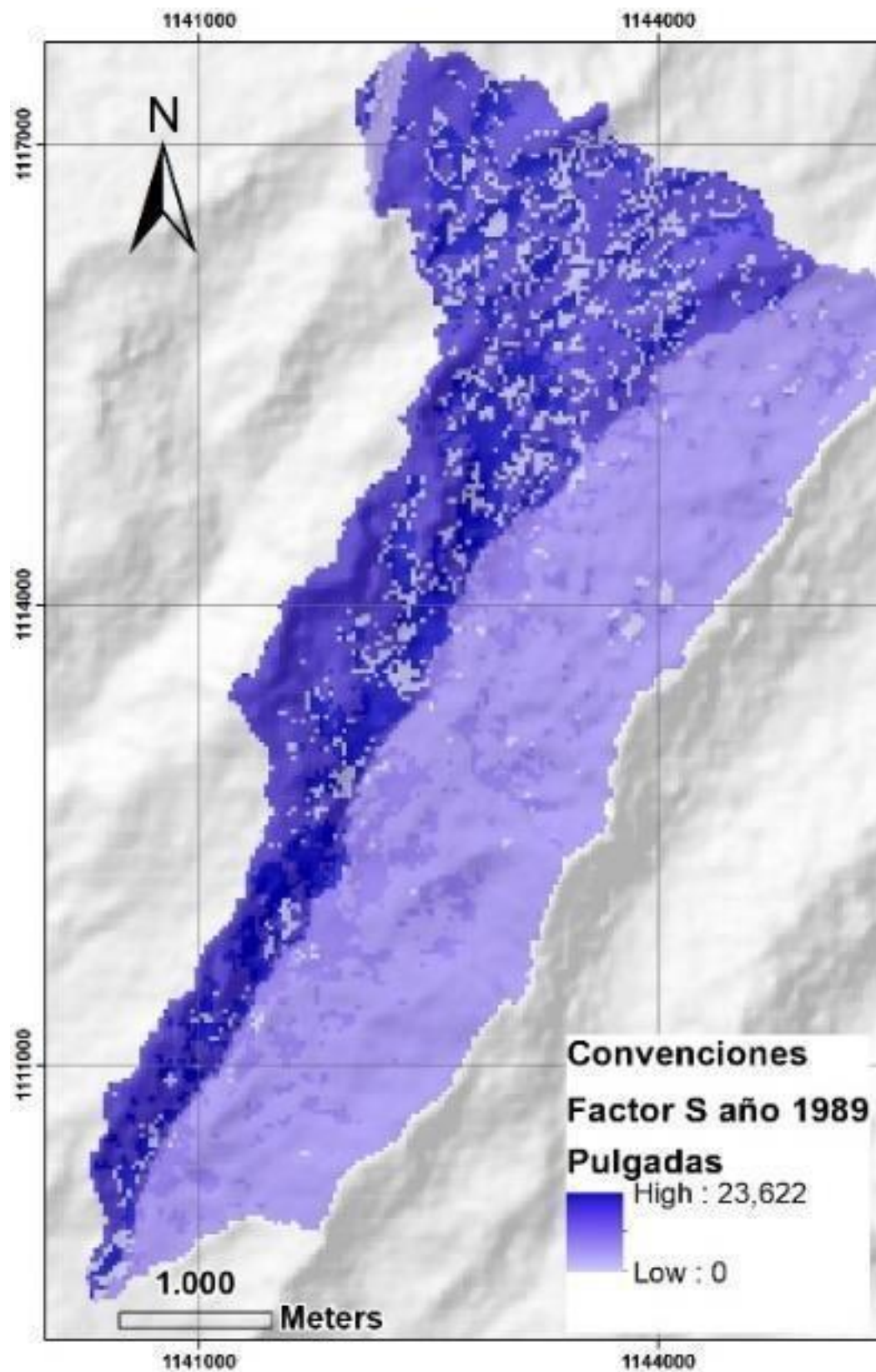


Figure 33:

3

$\frac{P}{P+1} = \frac{4,2 \cdot P}{10-0,058P} \quad (3)$ $\frac{P}{P+1} = \frac{23 \cdot P}{0,13P} \quad (4)$			
Lluvia antecedente total de 5 días (pulgadas)			
Grupo		Estación activa (de	Tipo de
AMC			condición
	Estación inactiva (seca)	crecimiento)	
I	<0,5	<1,4	Seca
II	0,5 a 1,1	1,4 a 2,1	Normal
II	Sobre 1,1	Sobre 2,1	Húmeda
Information Systems			

Fuente:(Avellaneda Córdoba , 2020) Los números de curva se aplican para condiciones de humedad antecedente normales (AMC II). Las otras dos condiciones se determinan a partir de las siguientes ecuaciones:London Journal of Research in Science: Natural and Formal 15 35 Determination of the Hydrological Parameter of the Curve Number (NC) for the Las Cañas Stream in the Siscunsi Paramo by means of Geographic

Figure 34: Tabla 3 :

3.3 Oferta hídrica de la cuenca de estudio empleando el método racional Dick Peschke 118.63 144.9 177.2 230.0

---

Método	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
Método Racional-Modelo Frederick Bell	0.243
Método Racional-Modelo Dick Peschke	0.163
Precipitación Efectiva	0.423
Fuente: Autores.	

Figure 36:



- 
- [ London Journal of Research in Science: Natural and Formal] , *London Journal of Research in Science: Natural and Formal*
- [García Portilla ()] , J García Portilla . 2003. Bogotá, D.C. Universidad Javeriana
- [Calvache ()] , M Calvache . 2010.
- [Rivera Ospina ()] , D Rivera Ospina . 2013.
- [Sánchez Pérez ()] , D F Sánchez Pérez . 2018.
- [Romano Castillo ()] *Algoritmo computacional para describir la dinámica del ciclo hidrológico superficial en una cuenca a partir de cartas temáticas topográficas, edafológicas, uso de suelo y vegetación*, E A Romano Castillo . 2007. Foro-Red-Mat: Revista electrónica de contenido matemático.
- [Avellaneda Córdova ()] *Análisis comparativo de los métodos Racional modificado Témez, Hidrogramas unitarios SCS, Clark y Snyder en la obtención de caudales máximos para las subcuencas Cañad y Alto Chancay Lambayeque Perú*, A D Avellaneda Córdova . 2020. p. . Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo
- [Villalobos Chacón ()] 'Análisis del potencial de escurrimiento en la microcuenca del río Tiribí entre el 2005 al 2029 para la conservación de los servicios ecosistémicos de regulación hídrica. Heredia: Universidad Nacional de Costa Rica'. A Villalobos Chacón . *London Journal of Research in Science: Natural and Formal* 2019. 15 p. 55. (Determination of the Hydrological Parameter of the Curve Number (NC) for the Las Cañas Stream in the Siscunsi Paramo by means of Geographic Information Systems)
- [Cuervo Barahona et al. ()] 'Determinación de las fracciones de carbono orgánico en el suelo del páramo la Cortadera'. E Cuervo Barahona , G Cely Reyes , D Moreno Pérez . *Boyacá. Ingenio Magno* 2016. 7 p. .
- [Díaz Carvajal ()] *Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG*, Á Díaz Carvajal . 2017. Ingeniería y Desarrollo. p. .
- [Castro López ()] *El sistema de información geográfica aplicado a la investigación urbana en México: balance y formación técnica*, J Castro López . 2011. México. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco
- [Deshmukh et al. ()] 'Estimation and comparison of curve numbers based on dynamic land use land cover change, observed rainfall-runoff data and land slope'. D S Deshmukh , U C Chaube , A Ekube Hailu , D Abera Gudeta , Tegene Kassa . *Journal of Hydrology* 2013. 492 p. .
- [Galvis ()] Rubiano Galvis , S . *Protección de páramos y derechos campesinos. Aportes jurídicos y de política Subdirección de Servicios Científicos y Proyectos Especiales* . Bogotá, D.C: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2015.
- [Paredes Pinto ()] *Generación de intensidades de precipitación máxima en estaciones sin información pluviográfica (cuenca del río Illpa-Puno)*, R E Paredes Pinto . 2015. Puno-Perú: Universidad Nacional del Altiplano.
- [Cruz ()] *Gestión integrada del riesgo de inundaciones en Colombia*, Sedano Cruz , RK . 2013. 37 p. . Universitat Politècnica de València
- [Lemus and Navarro ()] *Manual para el desarrollo de obras de conservación de suelo*, M Lemus , V G Navarro . 2003. San Fernando (Chile: Corporación Forestal Nacional.
- [Menéndez and Núñez ()] M Menéndez , V Núñez . *El uso de los sensores remotos en los Recursos Naturales Primera parte: La fotografía aérea y la fotointerpretación Argentina*, 2009. 3 p. .
- [Palomino ()] *Modelación precipitación escorrentía en cuencas urbanas-caso de estudio: Distrito de Carmen Alto*, Sánchez Palomino . 2015. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga
- [Ramos ()] Lao Ramos , B . *La teledetección y los Sistemas de Información Geográfica para el manejo de las tierras. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 2018. p. .
- [Rodríguez et al. ()] A Rodríguez , F Gaspari , G Sinisterra , M Delgado , S Besteiro . *Evaluación del efecto de la restauración agro-hidrológica mediante la aplicación del modelo hidrológico GeoQ. Revista Investigaciones Agropecuarias*, 2012. p. .
- [Law and Nichol ()] 'Topographic correction for differential illumination effects on IKONOS satellite imagery'. K H Law , J Nichol . *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inform. Sci* 2004. 35 p. .
- [Civco ()] 'Topographic normalization of Landsat Thematic Mapper digital imagery'. D L Civco . *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 1989. 55 (9) p. .
- [Morad ()] 'Una aproximación a las ventajas y dificultades de su aplicación'. M Morad . *Sistemas de Información Geográfica y modelizaciones hidrológicas*, 2001. 31 p. .
- [Ven Te ()] C Ven Te . *Handbook of Applied Hydrology*, 1984. McGraw Hill Book Company.