

Universidad de Oviedo

EUIT.Mieres

**Máster en Teledetección y Sistemas de
Información Geográfica**

**Bases de datos y Gis en Hidrogeología.
Método APLIS**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Autor: Elena Solís Berdasco

Tutor: Mónica Meléndez Asensio

Susana Fernández Menéndez

Julio 2014

SUMARIO

1. RESUMEN

2. INTRODUCCIÓN

2.1. Generalidades

2.2. Antecedentes

2.3. Marco geográfico

2.4. Marco geológico

2.4.1. Levantamiento de la cordillera de Picos de Europa

2.4.1.1. Orogenias en Picos de Europa y estructura geológica

2.4.2. Geomorfología

2.4.2.1. Los ríos

2.4.2.2. El karst

2.4.3. Hidrogeología

2.4.4. Glaciarismo cuaternario

2.4.5. Periglaciarismo

2.4.5.1. Formas periglaciares

2.4.6. Procesos de ladera

3. OBJETIVOS

4. PROCEDIMIENTO.METODO APLIS

4.1 Introducción

4.2 Recarga de acuíferos

4.3. Métodos convencionales de recarga

4.3.1. Métodos de determinación directa

4.3.2. Métodos hidrodinámicos

4.3.3. Métodos ambientales químicos e isotópicos

4.3.4. Métodos de balance

4.3.5. Métodos basados en modelos numéricos de flujo de acuíferos

4.3.6. Otros métodos

4.4 Fundamentos del método APLIS

4.5. Aplicación del método APLIS mediante el programa ArcGis

5. RESULTADO

5.1. Preparación del entorno de trabajo en ArcGis

5.2. Cálculo de los archivos derivados del MDE

5.2.1. Obtención del ráster de Altitud

5.2.2. Obtención del ráster Pendiente

5.2.3. Obtención del ráster Litología

5.2.4. Obtención del ráster Infiltración preferencial

5.2.5. Obtención del ráster Suelos

5.3. Cálculo del método APLIS

6. CONCLUSIONES

7. PLANOS

8. BIBLIOGRAFIA

1. RESUMEN

Se ha aplicado el método APLIS en la unidad hidrogeológica de Güeyos-Texa, de 12km² situada en Picos de Europa en el Principado de Asturias. La recarga de este acuífero se produce principalmente por infiltración directa del agua de lluvia. Gran parte de la descarga se produce en la surgencia Gueyos de la Texa situada al Norte del acuífero.

La aplicación del método APLIS ha permitido estimar la tasa media de recarga anual y su distribución espacial, así como evaluar los recursos hídricos medios anuales para toda el área de estudio. La tasa media de recarga es de 59.64% con una variación espacial que depende de la altitud, litología, pendiente, infiltración y tipo de suelo de la zona.

Applied the method APLIS in hydrogeological unit-Texa Güeyos of 12km² located in Picos de Europa in Asturias. Recharging the aquifer occurs primarily by direct infiltration of rainwater. Much of the discharge occurs in upwelling Gueyos Texa situated north of the aquifer.

The application of the method APLIS has allowed estimate the average annual recharge and its spatial distribution, and to evaluate the average annual water resources for the entire study area. The average recharge rate is 59.64% with a spatial variation depending on altitude, lithology, slope, infiltration and soil type in the area.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. Generalidades

En un área kárstica, en términos generales, el volumen de agua que circula por el subsuelo es mucho mayor que el que lo hace en superficie debido a las características de este tipo de sistemas. Uno de los aspectos fundamentales para conocer el funcionamiento de un acuífero kárstico y para valorar el recurso hídrico correctamente es la cuantificación de la recarga. Debido a la propia naturaleza kárstica del acuífero resulta muy complejo la determinación del volumen de la recarga; tradicionalmente se ha utilizado el balance hídrico para la obtención de la misma, si bien, por desconocimiento de algunas de las variables que intervienen en proceso, el valor calculado se considera con cierta incertidumbre.

La aplicación de los sistemas de información geográfica como herramienta en los trabajos de hidrogeología trae consigo el poder determinar características o datos nuevos a partir de estas características de una manera más rápida y cómoda a través tanto de datos obtenidos en campo como de datos obtenidos mediante técnicas espaciales.

Mediante la aplicación de sistemas de información geográfica, el IGME y la Universidad de Málaga han creado un método, denominado método APLIS, en el cual a través de una forma rápida y sencilla se puede calcular la tasa de recarga de un acuífero kárstico. Este método ha sido utilizado en algunas investigaciones mostrando que aporta datos coherentes y de gran utilidad. Estudio metodológico para la estimación de la recarga en diferentes tipos de acuíferos carbonatados, IGME y GHUMA 2001-2002 y Estimación de la recarga en la sierra de la Tramuntana (Mallorca) mediante el método APLIS.) .La importancia de validar este método en un acuífero de montaña ha promovido que se

aplique a un pequeño acuífero en zona de montaña, incluido en la masa de agua subterránea 016.214. Picos de Europa-Panes.

2.2. Antecedentes

Durante los años 1979-82 el IGME llevó a cabo el proyecto Investigación hidrogeológica de la Cuenca Norte: Asturias. Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas, en el que se definieron por primera vez los Sistemas Acuíferos en la cornisa cantábrica (referencia). En el denominado “Sistema Acuífero 3: Caliza de Montaña cántabro-astur”, estaba incluida la Unidad de Picos de Europa-Panes , dentro de la cual se encuentra el acuífero Güeyos-Texa, objeto de este estudio. En la actualidad, atendiendo a la delimitación de masas de agua subterránea, según la Directiva Marco del Agua, la zona se incluye en la 016. 214. Picos de Europa-Panes.

2.3.Marco geográfico

Como primera aproximación comentar que Güeyos Texa se encuentra en la zona dentro del Parque Nacional de Picos de Europa, al norte de España, en su área central. Desde el punto de vista geológico, la región se denomina Picos de Europa, y presenta unas características geológicas e hidrogeológicas particulares.

2.4. Marco geológico

La mayor parte de las rocas que se encuentran en Picos de Europa son acumulaciones de sedimentos de las rocas que se formaron en el Paleozoico, periodo que abarca desde

los 500-250 millones de años. En este periodo de tiempo la cuenca sedimentaria cantábrica sufrió muchas modificaciones relacionadas con el movimiento de las placas dentro de la tectónica de placas, siendo especialmente relevante la Orogenia Alpina, causante del levantamiento de la cordillera, y por tanto del relieve actual. Una de los aspectos resultantes es que en la zona se encuentran tanto sedimentos de zonas marinas profundas como sedimentos continentales.

Dentro de la Zona Cantábrica, en el área de estudio, se pueden diferenciar materiales pertenecientes a tres regiones geológicas distintas: Región de Picos de Europa, Región de Ponga y Región del Pisuerga-Carrión.

1. Región del Ponga

Se extiende sobre la parte baja del valle de Sajambre. La sucesión estratigráfica desde el Cámbrico Inferior al Carbonífero Inferior es igual a la Región Picos, pero en el Carbonífero Superior aparecen materiales siliciclásticos en las formaciones Ricacabiello, Beleño, Escalada y Fito, así como lutitas y conglomerados en el Grupo Remoña

2. Región del Pisuerga-Carrión

Aparecen casi exclusivamente rocas del Carbonífero Superior y aparecen materiales siliciclásticos como pizarras, areniscas y conglomerados. Estas rocas del carbonífero Superior son rellenos de la cuenca marina que bordeaba los Picos de Europa producidos

en distintas fases como son el grupo Potes, Pando, Maraña, Pontón, Valdeón y Remoña y los conglomerados del grupo Pontón y Caliza de Panda.

3. Región de los Picos de Europa:

A continuación se va a estudiar más detalladamente que en las regiones anteriores la columna estratigráfica de Picos de Europa ya que a esta región corresponde la zona Gueyos-Texa, zona de estudio del presente proyecto.

1. Parte inferior de la columna estratigráfica (540-465 millones de años):

Es la región correspondiente desde el Cámbrico Inferior hasta el Ordovícico Inferior, en ella se encuentran las siguientes formaciones:

Láncara: Calizas y dolomías carbonatadas de una plataforma marina situada en zona tropical.

Oville y Barrios: Areniscas y pizarras, sedimentos deltaicos de cursos fluviales de Gondwana.

2. Parte intermedia de la columna estratigráfica (375-295 millones años):

Existe una laguna estratigráfica ya que después de los estratos del Ordovícico Inferior aparecen directamente estratos del Devónico Superior, correspondiente a la formación Barrios. Las formaciones correspondientes a este periodo son las siguientes:

Ermita: Depósitos de areniscas de origen fluvial

Vegamián: Depósitos marinos de pizarras negras

Baleas: Depósitos marinos de calizas blancas

Alba: Estratos delgados de caliza roja con fósiles

Barcaliente: Calizas oscuras sin apenas restos fósiles, depósitos marinos profundos

Valdeteja y Picos de Europa: Calizas grises de tonos claros. En la parte inferior de la formación Picos de Europa se encuentran capas con bandas de sílice microcristalina (chert), producto de la disolución de esponjas marinas que da a la roca un aspecto característico.

Las Llacierias: Calizas oscuras con abundantes restos fósiles

Aliva: Pizarras negras con siderita y capas de areniscas

Lebeña: Conglomerados calcáreos y areniscas

3. Parte superior de la columna estratigráfica (295-240 millones años):

Las rocas predominantes de esta época son las margas y las pizarras con intercalaciones de areniscas, conglomerados y calizas. Su característica principal es su color rojizo debido a la oxidación de pequeñas partes de hierro contenidas en los sedimentos.

2.4.1. Levantamiento de la cordillera de los Picos de Europa.

Las rocas de Picos de Europa son el resultado de la acumulación de sedimentos en lechos marinos a mayor o menor profundidad.

El nivel del mar no alcanzó nunca las alturas a las que se haya las cumbres de Picos de Europa, sino que han sido las rocas las que se levantaron empujadas por las orogenias.

2.4.1.1. Orogenias en Picos de Europa y estructura geológica

Las orogenias son procesos que tienen lugar en el interior de la Tierra y cuyo resultado es la formación de nuevas cadenas montañosas.

La estructura y el relieve actuales de la Zona Cantábrica son el resultado de la superposición de las Orogenias Varisca (o Hercínica) y Alpina, que tuvieron lugar en el Carbonífero y Terciario, respectivamente. Ambas orogenias estuvieron separadas por un período extensional que tuvo lugar durante el Mesozoico y que fue el responsable de la formación de las cuencas mesozoicas.

1. Orogenia Varisca o Hercínica: Carbonífero

En la Zona Cantábrica la deformación Varisca tuvo lugar en la parte superior de la corteza, zona caracterizada por presentar una deformación frágil. La deformación se produce fundamentalmente mediante el desarrollo de cabalgamientos. Estos cabalgamientos basales suelen aprovechar como superficie de despegue las formaciones Láncara y Alba, así como otros niveles de la sucesión devónica. Todos los cabalgamientos convergen hacia el núcleo del Arco Astúrico y presentan un desplazamiento acumulado que en la Zona Cantábrica supera los 150 kms, (Pérez-Estaún *et al.*, 1988). Además de los cabalgamientos, en la Zona Cantábrica se desarrollaron en esta época pliegues de distintas geometrías (longitudinales, radiales...) normalmente desarrollados en relación con el desplazamiento de los cabalgamientos. Otros pliegues se encuentran

afectando directamente a los cabalgamientos como consecuencia del emplazamiento de las láminas alóctonas inferiores.

Las unidades alóctonas en la Zona Cantábrica fueron emplazadas según una secuencia de propagación de tipo *foreland* entre el Westfaliense B y el Estefaniense. El primer manto en emplazarse fue el Manto de Somiedo-Correcilla y las primeras escamas de la Región del Esla, ambas pertenecientes a la Región de Pliegues y Mantos, y tuvo lugar en el Westfaliense B (Arbolea, 1981;). Las siguientes unidades en emplazarse fueron la de Sobia- Bodón, Aramo y Cuenca Carbonífera Central, pero esta vez con una dirección de transporte tectónico dirigida más hacia el NE.

La Unidad del Ponga fue emplazada con una dirección de transporte oblicua a la que tuvo la Cuenca Carbonífera; este hecho se evidencia sobre todo en la parte sur del Manto del Ponga, donde las fallas de León y de Sabero-Gordón actuaron como fallas laterales limitando el Complejo de la Unidad del Ponga. Al mismo tiempo la Falla del Porma, que actuó como falla lateral durante el emplazamiento de las unidades de Somiedo-Correcillas y del Esla, fue reactivada como una falla inversa oblicua (Alonso, 1987).

La última unidad en ser emplazada fue la unidad de Picos de Europa, constituida por un sistema de cabalgamientos imbricados. Su dirección de desplazamiento es muy distinta del resto de las unidades que conforman la Zona Cantábrica, estando dirigida fundamentalmente hacia el sur. La edad de dicho emplazamiento ha sido deducida a partir de depósitos sintectónicos de carácter olistostrómico, obteniéndose una edad Kasimoviense (Marquínez, 1978). En esta época todos

los demás mantos ya han sido emplazados y únicamente se conservan algunas rocas continentales de esta edad reposando disconformemente sobre las Unidades del Ponga y del Esla.

La secuencia temporal y el progresivo cambio en las direcciones de desplazamiento de las distintas unidades de la Zona Cantábrica, que va rotando en el sentido de las agujas del reloj y que concluye con el movimiento dirigido hacia el sur de la Unidad de Picos de Europa, ha dado lugar a un modelo de evolución tectónica que podría asociarse a la formación del Arco Astúrico.

2. Período Extensional: Pérmico y Mesozoico

Durante el Pérmico y el Mesozoico tiene lugar un período extensional ligado a la apertura del Atlántico y Golfo de Vizcaya; en esta época podrían haberse reactivado como fallas directas algunas estructuras variscas y se consuma la erosión de la Cordillera Hercínica. Se generan las cuencas mesozoicas cubriendo gran parte de la Zona Cantábrica, alcanzando la sedimentación su máximo espesor en la plataforma continental asturiana.

3. Orogenia Alpina

El desplazamiento de la Placa Ibérica hacia el norte, producida en el contexto de la Orogenia Alpina, dio lugar a la colisión con la Placa Europea, generando la Cordillera Pirenaica. Hacia el oeste, este movimiento también da lugar a la convergencia de la Placa Ibérica con la corteza oceánica del Cantábrico, produciéndose así el levantamiento de la Cordillera Cantábrica. Durante la deformación Alpina en la Cordillera Cantábrica se produce principalmente el juego de los cabalgamientos y el reapretamiento de los pliegues variscos.

Además, algunas de las fallas extensionales mesozoicas fueron reactivadas como fallas inversas. Todas estas estructuras convergen hacia un cabalgamiento en el basamento que sólo es visible en los perfiles sísmicos profundos (Pulgar *et al.*, 1995). Merced a este cabalgamiento se produjo el levantamiento del zócalo paleozoico y la erosión de los materiales mesozoicos situados sobre la Zona Cantábrica.

Como consecuencia de la deformación alpina tuvo lugar la generación de dos cuencas sinorogénicas en la Zona Cantábrica. Así se creó por un lado la zona N de la Cuenca del Duero, que representa la Cuenca de Antepaís de la Cordillera Cantábrica y, por otra parte, se generó la Cuenca de Oviedo, como consecuencia del rejuego de la falla mesozoica de Llanera (Alonso *et al.*, 1995).

La posterior evolución tectónica de esta cordillera ha ido acompañada por una recuperación isostática durante el Plioceno y el Pleistoceno (Marquínez, 1990). Las tensiones tectónicas en épocas recientes se corresponden con una compresión máxima de dirección N-S con una sismicidad moderada.

A grandes rasgos, las estructuras alpinas en el Cantábrico oriental muestran una dirección predominante E-O y una clara divergencia, con un frente septentrional situado en el margen continental y constituido por un conjunto de fallas inversas dirigidas hacia el N. Por el contrario, la mayor parte de las estructuras alpinas reconocidas en la Cornisa Cantábrica presentan una vergencia hacia el S, igual que ocurre en la Zona Sur-Pirenaica, cuyo frente se puede prolongar hacia el oeste hasta la Cordillera Cantábrica Central. En el occidente de la Cornisa Cantábrica estas estructuras ya no se reconocen, la cordillera se desdibuja y se produce un cambio de dirección en los relieves los cuales ahora se orientan hacia

el SO.

2.4.2. Geomorfología

En la masa calcárea de los Picos de Europa el agua disuelve la roca y excava los conductos internos por lo que la circulación superficial se reduce en favor de la subterránea. Las calizas de los Picos producen grandes escarpes mientras que los sustratos blandos de los alrededores forman relieves más suaves. De este modo Picos de Europa se levanta sobre los terrenos de Sajambre, Valdeón y Liébana.

2.4.2.1. Los ríos

La zona ocupada por Picos de Europa se encuentra enclavada en las cuencas hidrográficas de los ríos Sella, Deva y Cares. El Sella y el Deva son las fronteras occidental y oriental de Picos mientras que el Cares y el Duje dividen Picos de Europa en tres macizos: Occidental o del Cornión, Central o de los Urrieles y oriental o de Andara. El sur está limitado por la cuenca del Esla, que forma parte de la cuenca del Duero.

Una característica de los ríos de Picos de Europa es que mientras que el Sella, Cares y Deva mantienen su caudal todo el año sus tributarios sufren variaciones estacionales, pudiendo quedar parcial o totalmente secos en verano.

En Picos de Europa se forman grandes gargantas y desfiladeros en los que existen depósitos fluviales varios metros por encima del cauce actual. El proceso es el siguiente:

1. El río deposita sedimentos que forman la llanura de inundación en el fondo del valle
2. El cauce del río va encajándose, abandonando la llanura aluvial inicial y formando una nueva llanura de inundación a una cota inferior.
3. Los depósitos fluviales antiguos son erosionados dejando terrazas adosadas a las laderas del valle.

2.4.2.2. El karst

La disolución de las calizas por parte del agua genera los procesos kársticos que se producen en los Picos de Europa. Como resultado se generan varias formas en la roca, tanto en superficie como en el interior del macizo calcáreo.

1 Exokarst

El proceso de karstificación se manifiesta en superficie en las siguientes formas:

- a) Lapiaces: Acanaladuras producidas en las rocas por agua de escorrentía
- b) Dolinas: Depresiones de planta circular o elíptica producidas por el ensanchamiento por disolución de una depresión menor inicial. A veces se pueden colapsar dando lugar a una cavidad subterránea.
- c) Uvalas, Poljes y Valles Ciegos: Se producen cuando dos o más dolinas se unen y forman hondonadas mayores produciendo drenajes subterráneos.

d) Jous: Grandes depresiones cerradas, de origen no necesariamente kárstico, ya que para su formación también interviene el hielo de los glaciares. En los jous se puede acumular material procedente de las laderas, derrubios o materiales procedentes de los glaciares.

Las zonas que coinciden con los tres grandes macizos de Picos de Europa no presentan cursos fluviales ya que la intensa infiltración kárstica impide la circulación superficial del agua.

2. Endokarst

La gran diferencia de altitud entre las cumbres y el curso de los ríos favorece el desarrollo de grandes simas.

La génesis y distribución de simas y galerías se encuentran ligadas a la fracturación del macizo rocoso, principalmente a los cabalgamientos y las fallas. El Jou de Los Cabrones y el Jou Luengu dan entrada a simas de más de 1500m de profundidad mientras que la Red del Toneyu que cuenta con 20km de galerías es el mayor complejo de Picos en desarrollo horizontal.

2.4.3. Hidrogeología

La recarga de los acuíferos se produce principalmente por agua de lluvia, introduciéndose en el subsuelo junto con el agua de los arroyos y ríos, dando lugar a unas tasas elevadas de infiltración y índices de recarga.

A estas tasas altas también ayuda el alto índice de precipitaciones durante todo el año y las precipitaciones en forma de nieve.

Las fracturas de las fallas alpinas en dirección ONO-ESE y las intercalaciones de rocas siliciclásticas entre calizas favorecen la circulación del agua y condicionan la disposición de los cursos subterráneos ya que las calizas son muy compactas.

Los buzamientos de Picos de Europa se encuentran inclinados hacia el norte por lo que gran parte del agua subterránea se incorpora a los cursos superficiales más septentrionalmente que las zonas donde fue captada.

En las regiones kársticas el agua que circula por el interior de los macizos calcáreos genera cuencas de drenaje diferentes a las producidas por los caudales superficiales por lo que una cuenca superficial puede drenar a un río y su cuenca subterránea drena hacia otro distinto, como es el caso del río Cares.

2.4.4. Glaciarismo cuaternario

Los Picos de Europa fueron afectados por glaciaciones en el Cuaternario. Durante la última fase glacial producida hace 38000 las zonas altas de los macizos estuvieron ocupadas por casquetes de los que salían lenguas de hielo descendiendo por las laderas y ocupando fondos de valle.

Hace unos 10000 años estos glaciares desaparecieron de las montañas pero entre los siglos XVI XVIII, durante la Pequeña Edad de Hielo, volvieron a formarse masas de hielo en las zonas más altas.

En la base de algunas paredes de las zonas más altas de Picos de Europa se pueden observar unos cambios de coloración de las rocas relacionadas con la Pequeña Edad de Hielo. El hielo y la nieve generados durante esta época y acumulados al pie de los escarpes protegió a la roca de agresiones externas e impidió la colonización de líquenes, dando un color más claro que a la roca descubierta.

1 Erosión glaciaria

- a).Circos glaciares: Depresiones semicirculares cerradas en ocasiones por un umbral.
- b) Aristas glaciares: Resultado de las excavaciones realizadas por el hielo en las paredes de las montañas. Muy abundantes en Picos a partir de los 1600m de cota
- c) Horn (Cuerno): Erosión producida por los circos glaciares en varias vertientes de las cumbres, produciendo formas más o menos piramidales
- d) Valles en artesa: Valles excavados en forma de U producidos por el deslizamiento lateral abajo de las lenguas glaciares.
- e) Rocas aborregadas: Excavación de lomas como consecuencia del desplazamiento de los glaciares con pendientes más suaves hacia la cabecera y más fuertes hacia el valle.

2 Depósitos glaciares

Los depósitos glaciares o till están formados por una mezcla caótica de fragmentos de cualquier tamaño, desde arcillas a grandes bloques, sin muestras de reondeamiento por transporte. Cuando los materiales del till son finos se favorece el desarrollo de suelos y el crecimiento de cubierta vegetal.

a) Morrenas: Lomas alargadas que se forman cuando el material transportado por las lenguas glaciares que se deposita en el frente y en los bordes de esta quedan al descubierto cuando el hielo retrocede. Las morrenas pueden ser de tres tipos:

1.a) Morrenas laterales: Cuando los depósitos quedan abandonados en posición longitudinal con respecto a la dirección del flujo glaciar.

2.a) Morrenas centrales: Cuando los depósitos se sitúan en la confluencia de dos lenguas glaciares.

3.a) Morrenas terminales: Cuando los depósitos son originados en el frente de una lengua glaciar.

b) Bloques erráticos: Fragmentos de rocas de grandes dimensiones que son transportados por el hielo, a veces a grandes distancias de su origen.

2.4.5. Periglacialismo

Es el conjunto de procesos asociados a la acción de la nieve y a los ciclos hielo-deshielo. El clima de la Cordillera Cantábrica se caracteriza por sus heladas y las nevadas invernales que contribuyen al modelado actual de las vertientes de Picos de Europa.

2.4.5.1. Formas periglaciares

Estas formas se desarrollan en sustratos rocosos con que presentan discontinuidades como diaclasas y superficies de estratificación. El contraste térmico entre el día y la noche provoca que el agua que penetra en las fisuras se congele y se funda continuamente. El aumento de volumen del agua producido por la congelación crea un efecto cuña que amplía las discontinuidades en la roca mediante un proceso denominado gelifración.

- a) Canchales: Desprendimiento de fragmentos de roca que se acumula al pie de los escarpes debido a la gelifración
- b) Terracitas de soliflucción: Se forman debido al desplazamiento de las partículas finas del suelo como consecuencia de los ciclos de las heladas.
- c) Glaciares rocosos: Depósitos de derrubios en forma de lóbulos

2.4.6. Procesos de ladera

Los principales mecanismos de movilización de laderas son los desprendimientos, deslizamientos y flujos. En los macizos calcáreos predominan las caídas de rocas y los flujos de derrubios mientras que en las zonas

siliciclasticas son más comunes los deslizamientos, los pequeños flujos y la reptación.

Los procesos de ladera son más importantes en el frente sur de Picos de Europa ya que el cabalgamiento basal hace que las calizas se superpongan sobre materiales más blandos produciendo entonces grandes avalanchas y deslizamientos.

1. Levees: Canal delimitado por acumulaciones de depósitos abandonados procedentes de una masa en movimiento que desciende como un flujo de derrubio de alto poder destructivo.
2. Creep (reptación): Movimiento muy lento (orden de pocos milímetros al año) que se produce en la superficie de la ladera y va reduciéndose hasta amortiguarse a escasa profundidad.

3. OBJETIVOS

Como se ha dicho anteriormente, el principal objetivo del presente proyecto es cuantificar la recarga de un acuífero kárstico situado en una zona de alta montaña. Se ha elegido para ello un pequeño acuífero, situado en el entorno de Los Lagos de Covadonga cuya surgencia principal es el manantial de los Güeyos de la Texa.

Para la obtención de la tasa de recarga, mediante la utilización de un sistema de información geográfica (ArcGis) se aplica la una metodología denominada método APLIS. A partir de determinadas características del terreno como son la pendiente, orientación, suelo, permeabilidad y altitud se llega a un resultado de tasa de recarga. Este método ha sido desarrollado por el IGME y por la Universidad de Málaga (referencia) llegando a unos resultados satisfactorios y muy parecidos a los calculados por otros métodos tradicionales de tasas de recarga.

Para finalizar se valoraran los resultados obtenidos en el caso concreto de GüeyosTexa para ver si el método APLIS es un buen método para utilizar en el sistema kárstico de Picos de Europa.

4. PROCEDIMIENTO.METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE RECARGA.MÉTODO APLIS

Para la obtención de la tasa de recarga en el acuífero Gueyos-Texa se aplicara el denominado método APLIS mediante la utilización de un sistema de información geográfica (Arcgis).

4.1. Introducción

En el marco del Plan de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS) desarrollado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) durante la década de los 80 se realizaron las primeras estimaciones de la recarga de los acuíferos españoles para poder efectuar balances hidrogeológicos coherentes con el grado de conocimiento existente. La metodología empleada consistió en la realización del cálculo de la precipitación neta, y considerando un coeficiente de infiltración estimado en función del tipo de litología se obtuvo la tasa de recarga. Los resultados obtenidos se han aplicado posteriormente en muchos estudios, trabajos e investigaciones de una manera indiscriminada aunque los valores calculados presentan cierto grado de incertidumbre. La metodología empleada en el PIAS, si bien se considera una buena estimación, no tuvo en cuenta ciertos parámetros que juegan un papel muy importante en la recarga en acuíferos carbonatados. Dentro de las actividades del IGME está la de desarrollar metodologías y herramientas I+D para gestionar y reconocer los recursos hídricos. El IGME ha realizado numerosos trabajos hidrogeológicos, algunos de los cuales han permitido establecer con mayor precisión la recarga real a acuíferos carbonaticos.

El IGME aprobó en el año la realización de un Proyecto de Investigación para el desarrollo de metodologías que permitieran estimar la recarga procedente de la lluvia en

diferentes tipos de acuíferos carbonáticos tomando acuíferos de la cordillera Bética como áreas de trabajo (REFERENCIA). En el citado proyecto han participado investigadores de la Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas del IGME y del grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (GHUMA) durante los años 2001 y 2002.

Se ha pretendido establecer una pauta para asignar valores a la recarga procedente de la lluvia en función de las características diferenciales de los acuíferos: características topográficas (altitud, pendiente), modelados kársticos, los desarrollos de los suelos, las características climáticas (precipitación, temperatura), características litológicas y estructurales. Además de mejorar el conocimiento de la recarga y descarga natural de algunos acuíferos de interés se trata de realizar una clasificación de los acuíferos carbonáticos y proponer una metodología para el cálculo de la recarga a partir de una serie de variables que habitualmente están disponibles en las bases de datos de Organismos Públicos.

4.2. Recarga de acuíferos

De acuerdo con Custodio (1998) la recarga de un acuífero es el volumen de agua que penetra en un acuífero al cabo de un cierto intervalo de tiempo o el flujo unitario (tasa de recarga), expresado en volumen por unidad de tiempo o en volumen por unidad de superficie y unidad de tiempo o en altura por unidad de tiempo. Esta tasa de recarga puede ser tanto el valor en un momento determinado, como el valor medio que corresponde a un cierto periodo de tiempo. La recarga puede ser difusa, preferencial o concentrada y lo más común es que se produzca por infiltración de agua de lluvia (o en forma de nieve) aunque también se puede producir recarga a partir de aguas superficiales o por

transferencia de agua subterránea procedente de otro acuífero. En la investigación mencionada sobre el cálculo de la recarga mediante el método APLIS se ha considerado la procedente del agua de lluvia y se ha expresado en forma de porcentaje respecto a la precipitación.

4.3 Métodos convencionales de recarga de acuíferos

De acuerdo con Samper (1998) la medida de la recarga puede abordarse aplicando diferentes métodos que se citan a continuación:

4.3.1. Métodos de determinación directa

Se basa en la construcción de un dispositivo que mide a suficiente profundidad el agua que se dirige a la zona saturada. Se realiza mediante lisímetros y medidores de filtración. Este método tiene la ventaja de que mide directamente el valor de la recarga aunque la información es puntual y a veces puede no ser representativa del acuífero en su conjunto.

4.3.2. Métodos hidrodinámicos

Se basan en la utilización de la ecuación del flujo bajo condiciones de saturación parcial o total. Pueden ser métodos de campo y métodos numéricos. Los primeros suelen suponer régimen estacionario y funcionan mejor para un flujo saturado,

mientras que los segundos permiten abordar situaciones más complejas aunque requieren mayor número de datos.

4.3.3. Métodos ambientales químicos e isotópicos

Constituyen una alternativa a los métodos hidrodinámicos basada en el estudio y análisis de las propiedades del agua. Los trazadores pueden ser artificiales o naturales.

Entre los primeros destacan los colorantes, orgánicos e inorgánicos, que a veces suelen interactuar con el suelo, lo cual constituye un inconveniente. Los trazadores naturales más utilizados en los estudios de recarga son: el ion cloruro, los isotopos estables (^{18}O y ^2H) Y radioactivos (^3H , ^{14}C).

El método basado en el ion cloruro es el que más se utiliza en acuíferos kársticos, dado

el carácter conservativo del ion en ausencia del mismo en las rocas carbonáticas. Para obtener la recarga en acuíferos kársticos aplicando este método es necesario conocer el contenido de cloruros en el agua de la precipitación (C_p) y del agua subterránea (C_a). La tasa de recarga o infiltración se establece como el cociente entre C_p/C_a .

4.3.4. Métodos de balance

Consiste en la aplicación del principio de la conservación de masa a una cierta región de volumen conocido y definida por unas determinadas condiciones de contorno. Durante un determinado periodo de tiempo en el que se realiza el balance, la diferencia entre las entradas y las salidas debe ser igual al cambio de

agua en el almacenamiento. La realización de un balance requiere conocer y medir los flujos de entrada y salida del agua, así como su almacenamiento.

En la práctica solo alguno de los componentes de la ecuación del balance puede ser medido directamente, como la precipitación o el caudal de las descargas puntuales, mientras que el resto debe ser estimado indirectamente a partir de fórmulas semiempíricas como las de Thornthwaite, Coutage y Turc entre otros.

4.3.5. Métodos basados en modelos numéricos de flujo de acuíferos

Si se dispone de un modelo numérico válido es posible deducir la magnitud de la recarga a partir de la calibración del modelo de flujo, considerando la recarga como uno de los parámetros de calibración

4.3.6. Otros métodos

Tratan de correlacionar la recarga con otras variables topográficas y climáticas como la altitud o la precipitación. La validez de los resultados obtenidos por estos métodos es

limitada ya que expresiones obtenidas para un determinado tipo de acuíferos solo son extrapolables a otros similares

4.4. Fundamentos del método APLIS

Para desarrollar una propuesta metodológica que permita evaluar la recarga se han considerado los mapas o capas de información correspondientes a variables que intervienen en la recarga

(precipitación, altitud, pendiente, litología, áreas de recarga preferencial y suelos) y que suelen estar disponibles en las bases de datos de los Organismos Públicos. Tomando como referencia las tasas de recarga determinadas por los métodos convencionales antes citados se ha llevado a cabo un ensayo metodológico aplicando técnicas de superposición cartográfica en un Sistema de Información Geográfica y procedimientos matemáticos (regresión lineal, análisis del punto ideal, sumatoria lineal ponderada) para combinar las capas de información disponibles para desarrollar un método nuevo.

El resultado ha sido el método APLIS, acrónimo que corresponde a las iniciales de las variables utilizadas: Altitud(A), Pendiente (P), Litología (L), zonas preferenciales de Infiltración (I) Y Suelo(S).

Se ha desarrollado un sistema de puntuaciones para crear el mapa de cada variable (Tablas 1 a 5). Las puntuaciones varían entre 1 y 10, siguiendo una progresión aritmética de diferencia 1, con el objetivo de que se puedan equiparar fácilmente a porcentajes de recarga del acuífero. El valor 1 indica mínima incidencia de los valores de esa variable en la recarga del acuífero, mientras que el valor 10 expresa la máxima influencia en la recarga. Siempre que ha sido posible se han establecido 10 clases, cada una de ellas con una puntuación.

Altitud(m)	P
≤ 300	1
(300-600]	2
(600-900]	3
(900-1200]	4
(1200-1500]	5
(1500-1800]	6
(1800-2100]	7
(2100-2400]	8
(2400-2700]	9
> 2700	10

Tabla1. Puntuación del parámetro altitud

Pendiente (%)	P
≤ 3	10
(3-8]	9
(8-16]	8
(16-21]	7
(21-31]	5
(31-46]	4
(46-76]	3
(76-100]	2
>100	1

Tabla2. Puntuación del parámetro pendiente

Infiltración-absorción preferencial	P
Abundantes formas de infiltración preferencial	10
Escasas formas de infiltración preferencial	1

Tabla4. Puntuación del parámetro infiltración

Litología	P
Calizas y dolomías karstificadas	10,9
Calizas y dolomías fracturadas, algo karstificadas	8,7
Calizas y dolomías fisuradas	6,5
Arenas y gravas, coluviones	4
Brechas y conglomerados	3
Rocas plutónicas y metamórficas	2
Esquistos, pizarras, limos, arcillas	1

Tabla3. Puntuación del parámetro litología

Suelo	P
Leptosoles	10
Arenosoles álbicos y Xerosoles cálcicos	9
Regosoles calcáreos y Fluvisoles	8
Regosoles eútricos, dísticos y Solonchaks	7
Cambisoles cálcicos	6
Cambisoles eútricos	5
Histosoles eútricos y Luvisoles órticos y cálcicos	4
Luvisoles crómicos	3
Planosoles	2
Vertisoles crómicos	1

Tabla5. Puntuación del parámetro suelo

Los valores de Pendiente se han agrupado en nueve clases irregulares (Tabla 2). La asignación de valores a las distintas Litologías se ha efectuado en función de criterios hidrogeológicos (Tabla 3); en particular, las puntuaciones entre 5 y 10 se atribuyen según el grado de fisuración y karstificación. La puntuación asignada a las zonas de Infiltración preferencial presenta dos clases (Tabla 4): valor 10 para las áreas preferenciales de absorción y valor 1 para el resto. En el caso del suelo, las distintas clases se han agrupado según las características generales de espesor y textura que predominan en sus horizontes, Así, en suelos poco evolucionados como los leptosoles (Tabla 5), generalmente con escaso espesor y textura muy gruesa, la recarga es máxima (puntuación 10), mientras que en suelos que suelen ser potentes y arcillosos (vertisoles crómicos), la recarga es mínima (puntuación 1).

La expresión matemática del método APLIS es la única que permite obtener valores de la tasa de recarga coherentes con los que se habrían determinado por técnicas convencionales y, además, permite obtener una zonación de la recarga en los mismos. La expresión es la siguiente:

$$R = (A + P + 3 \cdot L + 2 \cdot I + S) / 0'9$$

La ponderación de cada variable en la expresión anterior trata de responder a la importancia que ejerce cada una de ellas sobre la recarga, de acuerdo con los resultados del análisis previo de las variables que influyen en la misma (Durán et al., 2004). Al dividir por 0'9, se obtienen valores de la tasa de recarga que varían entre un mínimo de 8'88 % y un máximo de 88'8 % de la lluvia sobre el acuífero; es decir, siempre hay algo de recarga y nunca la recarga es del 100% de la precipitación. La tasa media de recarga anual se representa agrupada en cinco intervalos regulares, a cada uno de los cuales se le asigna una categoría (Tabla

7).

Clase de recarga	Muy Baja	Baja	Moderada	Alta	Muy Alta
Intervalos de Recarga(%P)MétodoAPLIS	≤ 20 %	20 – 40	40 – 60	60 – 80	> 80

Tabla7. Intervalosyclasesde recargasegúnelmétodoAPLIS

4.5. Aplicación del método APLIS mediante GIS utilizando ARCGIS

Se ha elegido el programa ArcGis ya que es un programa muy intuitivo que trabaja muy bien con ficheros raster, ficheros que en ocasiones son muy pesados.

En primer lugar hay que tener en cuenta los sistemas de referencia que se han de adoptar en todo trabajo cartográfico en la Península Ibérica.

El sistema de referencia oficial en la península es el sistema ETRS-89 y teniendo en cuenta que los Picos de Europa se encuentran enclavados en el Huso30N, lo primero será preparar el proyecto de Arcgis en este sistema.

Una vez referenciado nuestro espacio de trabajo el siguiente paso será cargar un MDE (Modelo Digital de Elevaciones) a partir del cual se realizarán todos los cálculos para obtener los mapas que nos ayudarán a calcular la recarga.

Como bien dice el fundamento del método APLIS los ficheros que se necesitan se pueden obtener de organismos públicos, en este caso el MDE se obtiene de la página oficial de Instituto Geográfico Nacional y el mapa de suelos nos es facilitado por el Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo.

A partir de los raster derivados de los mapas geológicos y de suelos así como de los obtenidos del MDE original se llegará al resultado de la tasa de recarga en la zona deseada.

Este resumen del método APLIS mediante ArcGis se verá más detalladamente explicado en el apartado de RESULTADOS en el que se aplicará esta teoría a la zona concreta de Gueyos-Texa.

5. RESULTADO

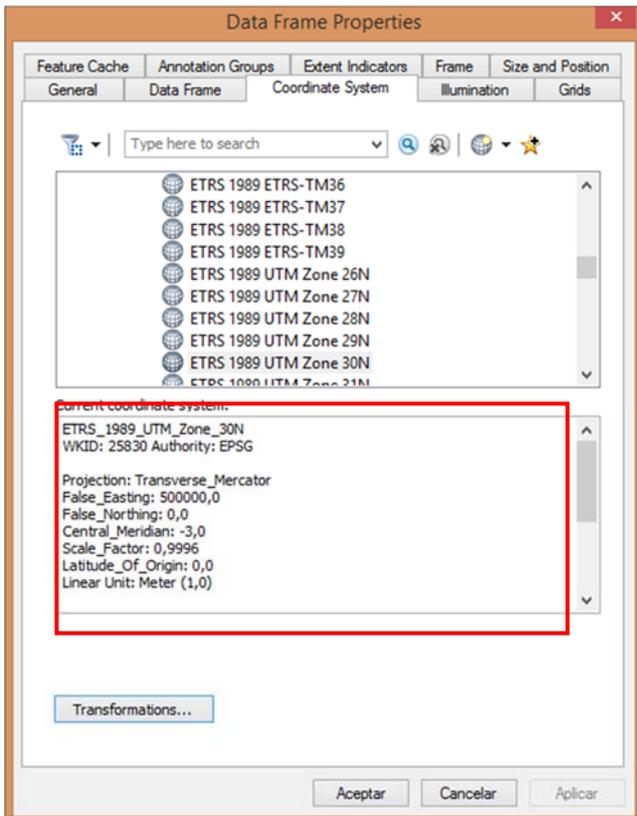
En este apartado se explica con detalle todos los procedimientos realizados hasta llegar al resultado final, que será un archivo ráster zonificado según el porcentaje de tasa de recarga de Güeyos-Texa.

5.1. Preparación del entorno de trabajo en ArcGis

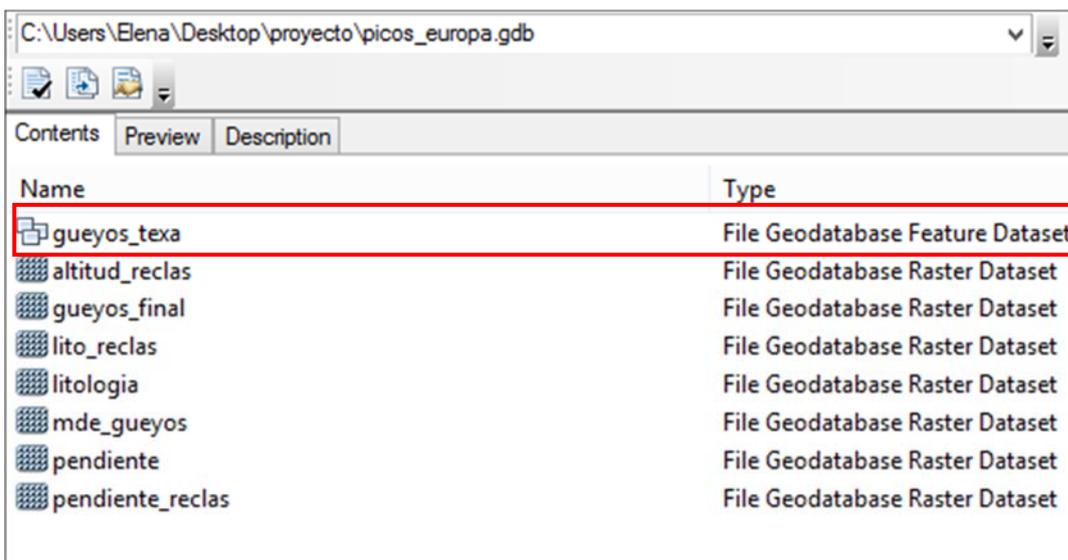
Como ya se ha comentado anteriormente, el Real Decreto 1017/2007 en su artículo 3 “sistema de referencia geodésico” dice lo siguiente:

Se adopta el sistema ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989) como sistema de referencia geodésico oficial en España para la referenciación geográfica y cartográfica en el ámbito de la Península Ibérica y las Islas Baleares. En el caso de las Islas Canarias, se adopta el sistema REGCAN95. Ambos sistemas tienen asociado el elipsoide GRS80 y están materializados por el marco que define la Red Geodésica Nacional por Técnicas Espaciales, REGENTE, y sus densificaciones.

Debido a ello, nuestro entorno de trabajo tendrá como base el sistema geodésico el ETRS-89.

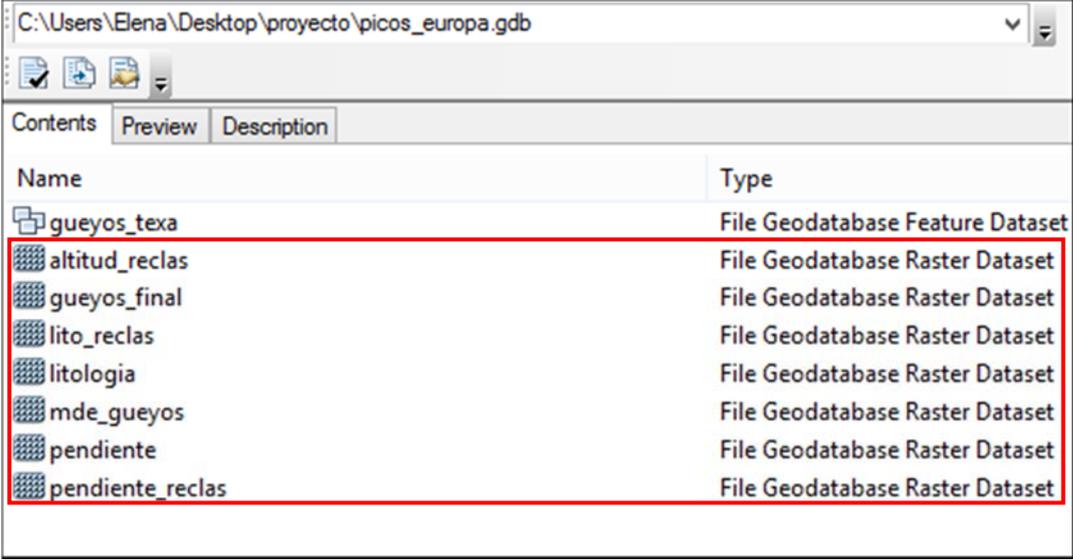


A continuación se ha creado un dataset para recoger la información vectorial correspondiente a la cuenca, litología, depósitos, depresiones y surgencias que servirán de base para llegar a nuestro objetivo:



Se trabajará con un dataset ya que este tipo de archivos de ArcGis solo permiten guardar vectoriales que estén en un determinado sistema de referencia, es decir,

como nuestro dataset está en ETRS-89 no nos permitirá cargar un archivo en ED-50, así se conseguirá que no se cometan errores de cálculo ni que se trabaje con sistema de referencia distintos, lo que daría lugar a errores tanto en planimetría como en cota.



Name	Type
gueyos_texta	File Geodatabase Feature Dataset
altitud_reclas	File Geodatabase Raster Dataset
gueyos_final	File Geodatabase Raster Dataset
lito_reclas	File Geodatabase Raster Dataset
litologia	File Geodatabase Raster Dataset
mde_gueyos	File Geodatabase Raster Dataset
pendiente	File Geodatabase Raster Dataset
pendiente_reclas	File Geodatabase Raster Dataset

Los dataset de tipo ráster también se encuentran en el sistema ETRS-89, ya que como el ráster de partida (mde_gueyos) está en este sistema, el resto de ráster derivados deberá de adaptarse a este.

5.2. Cálculo de los archivos derivados del MDE:

El modelo digital de elevaciones se ha conseguido a través de la página oficial del Instituto Geográfico Nacional. Es un modelo digital recogido mediante técnica Lidar con resolución de 5m.

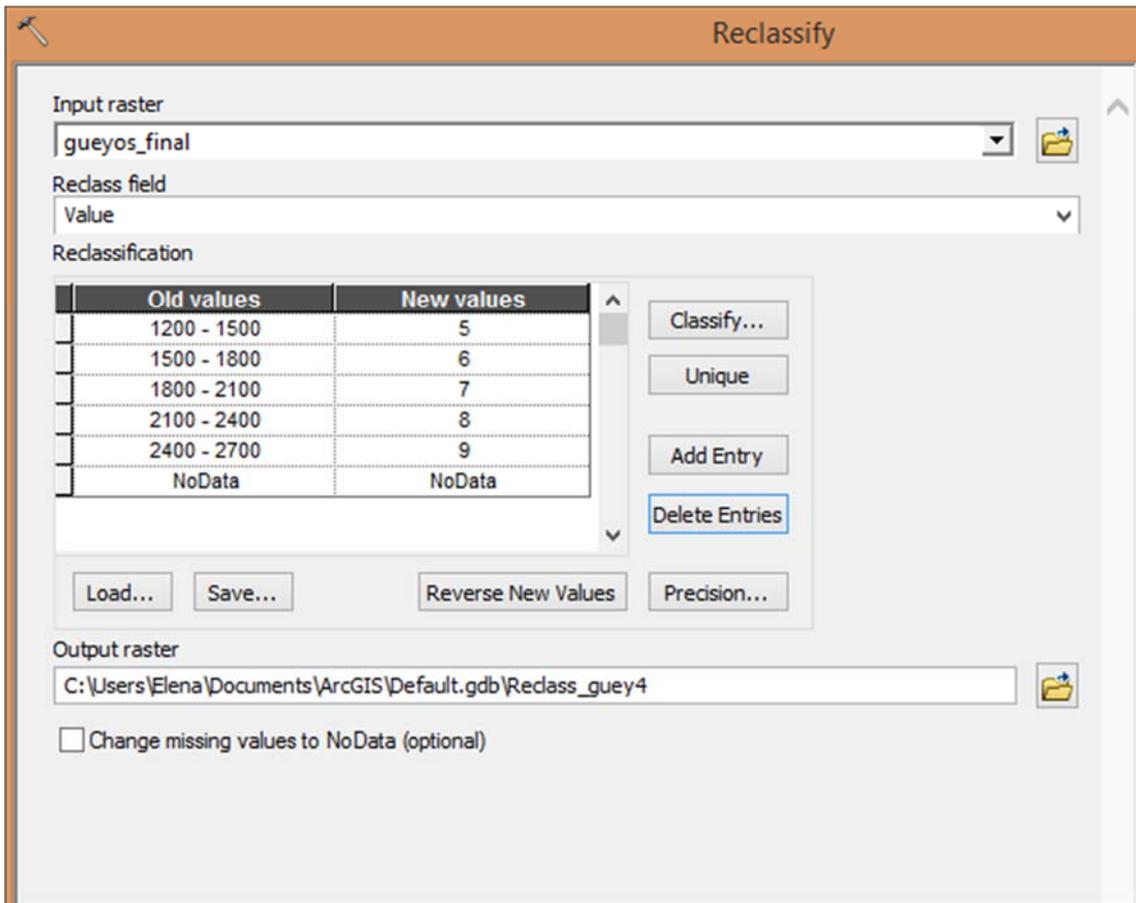
Como el MDE es muy pesado, se ha recortado por la zona de la cuenca de Güeyos- Texa para poder así trabajar fácilmente con él. El resultado es el siguiente:



A partir de este modelo de elevación sacaremos todos los ráster derivados, a excepción de los suelos, necesarios para la realización del presente trabajo.

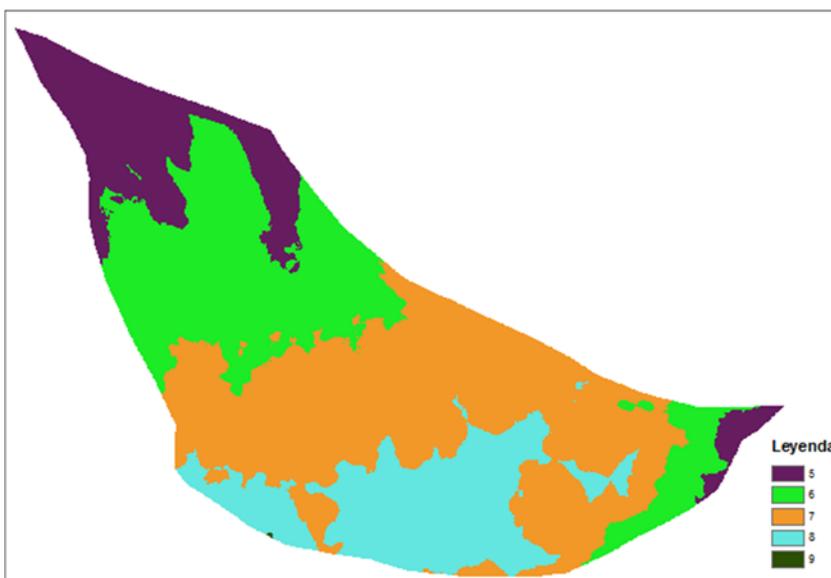
5.2.1. Obtención del ráster de Altitud:

El ráster de altitud se obtiene reclasificando el MDE con la herramienta reclassify que se encuentra en “Toolbox” de Arcgis. La altitud en esta cuenca, referida en metros, varía entre los 1234 y los 2420, por lo que no tendremos todos los intervalos de la tabla propuesta por el IGME:



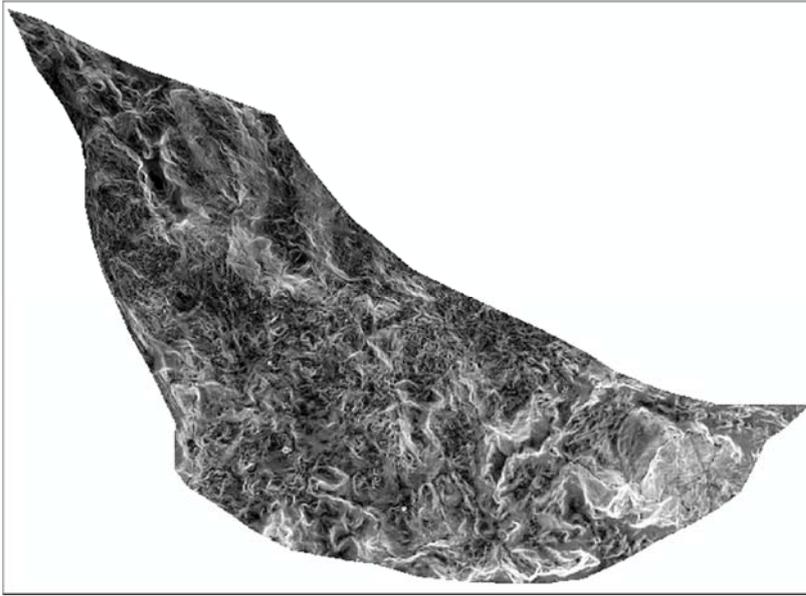
Este procedimiento de clasificación será el que se siga con todos los ráster para generar la imagen final.

El resultado de reclasificar la altitud es el siguiente:

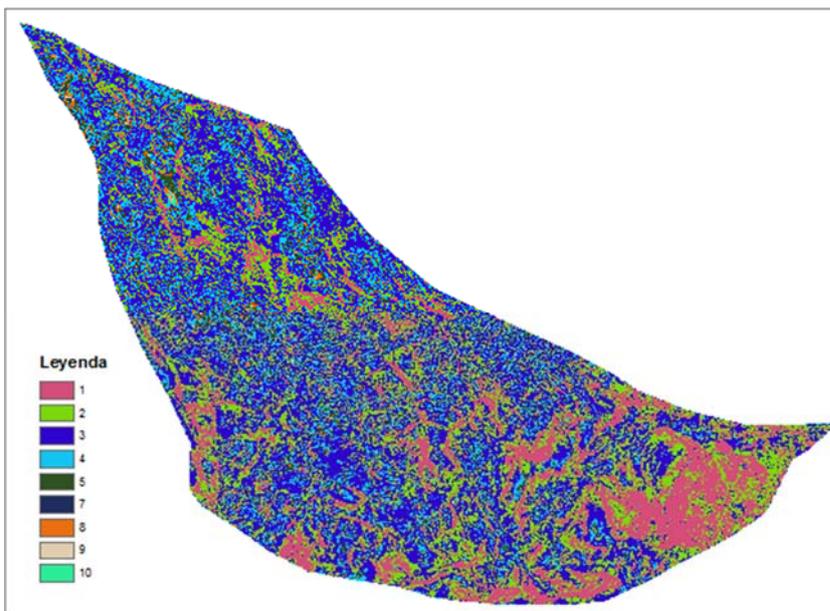


5.2.2. Obtención del ráster Pendiente:

En primer lugar calcularemos la pendiente del MDE de Güeyos-texa con el comando “slope”:



Una vez obtenido este ráster lo clasificamos de manera similar al ráster de altitud, quedando la siguiente imagen clasificada:



5.2.3. Obtención del ráster Litología:

Fijándose en la tabla asociada al archivo vectorial de la litología, se dan los siguientes valores a los distintos tipos:

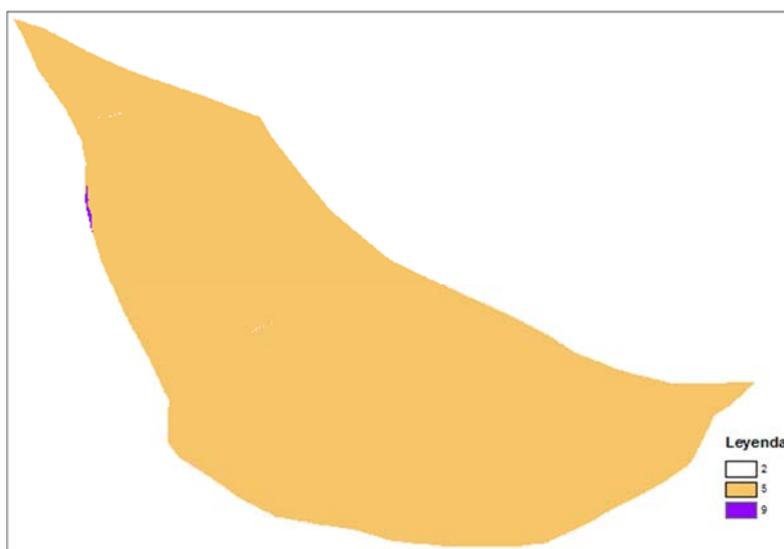
litho_gueyostexa		
OBJECTID *	Shape Length	Litologia
6	861,462131	Calizas
1	538,928634	Calizas+Chert+Pizarras
2	1404,082217	Calizas+Chert+Pizarras
4	22739,302605	Calizas+Chert+Pizarras
5	4743,504586	Calizas+Chert+Pizarras
7	1248,742943	Calizas+Chert+Pizarras
9	650,221321	Calizas+Chert+Pizarras
10	636,857076	Calizas+Chert+Pizarras
11	774,916818	Calizas+Chert+Pizarras
3	454,68129	Rocas Igneas
8	439,242296	Rocas Igneas

Calizas-9

Calizas+Chert+pizarras-5

Rocas Igneas-2

Quedando el ráster de la litología clasificado de la siguiente manera:



5.2.4. Obtención del ráster Infiltración preferencial:

Para conseguir la clasificación en este ráster primero se deben hacer varios procesos para determinar qué zonas son preferentes y cuáles no.

Hay que tener en cuenta que si las depresiones se encuentran rellenas de materiales como las arcillas, esas depresiones no filtrarían el agua al subsuelo por lo que no serían zonas preferenciales.

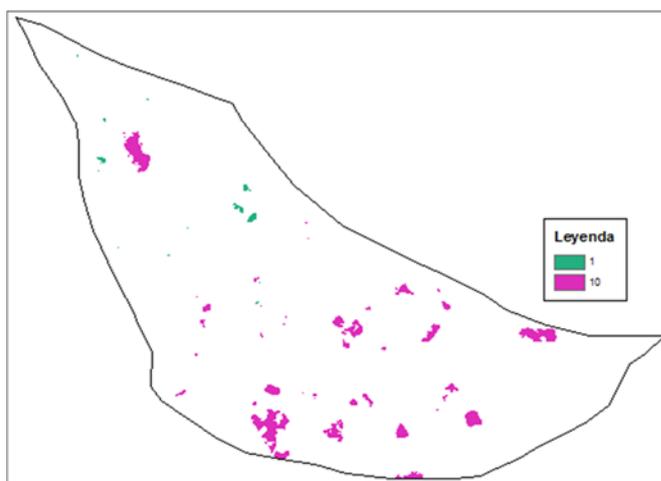
En cambio vamos a considerar que las dolinas sin ningún tipo de depósito o sin depósitos kársticos son zonas de infiltración preferencial.

Primero realizamos una intersección entre depresiones y depósitos para conseguir un shape en el que se encuentran las depresiones, tanto dolinas como las depresiones glaciocrásticas, rellenas de depósitos kársticos, rocas de avalanchas, rocas caídas, depósitos de avalanchas de nieve, depósitos de morrena, depósitos de talud y till. El criterio a seguir es el siguiente:

Dolinas sin depósitos glaciokarsticos-10

Resto-1

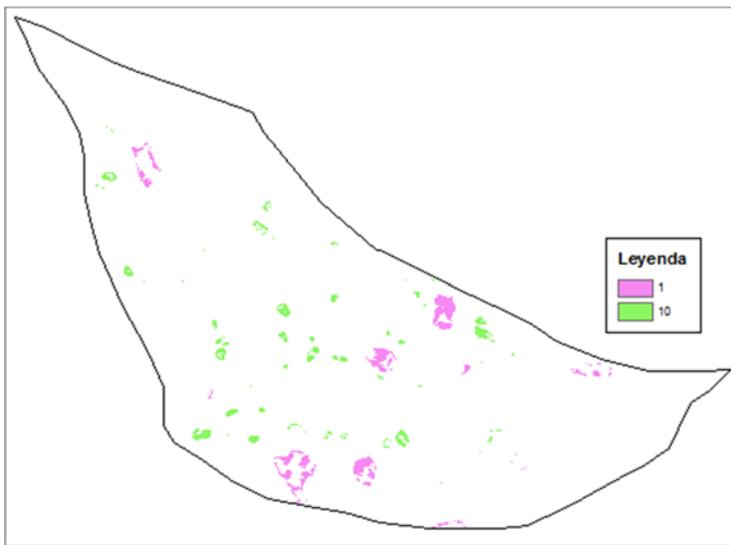
A continuación se pasa el shape a ráster y se clasifica, quedando de la siguiente manera:



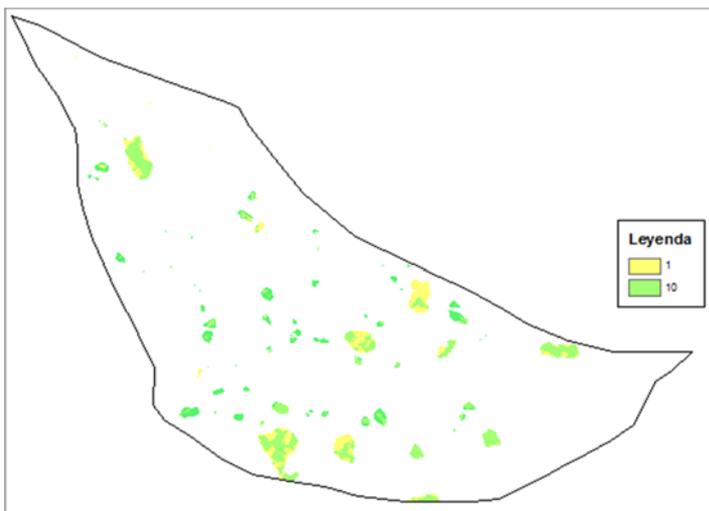
Ahora se calcula que parte de las depresiones no están cubiertas por ningún tipo de depósito. Con el comando “erase” se obtiene geoméricamente las zonas y posteriormente se rasteriza quedando de la siguiente manera la clasificación:

Dolinas-10

Depósitos glaciokarsticos-1

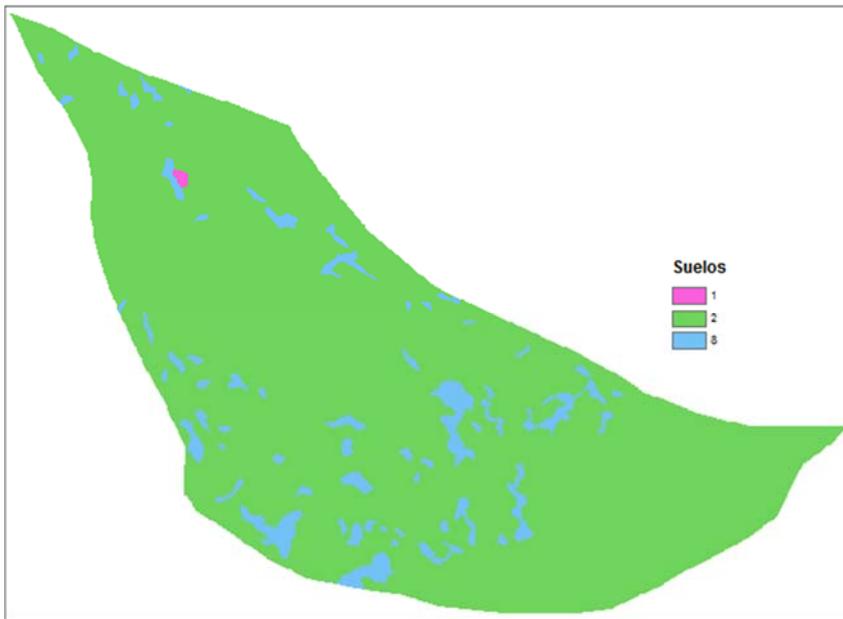


Finalmente se unen estos dos raster para tener las áreas de infiltración preferencial:



5.2.5. Obtención del ráster Suelos:

Por último nos queda definir el ráster referente a los suelos procediendo como en las ocasiones anteriores:

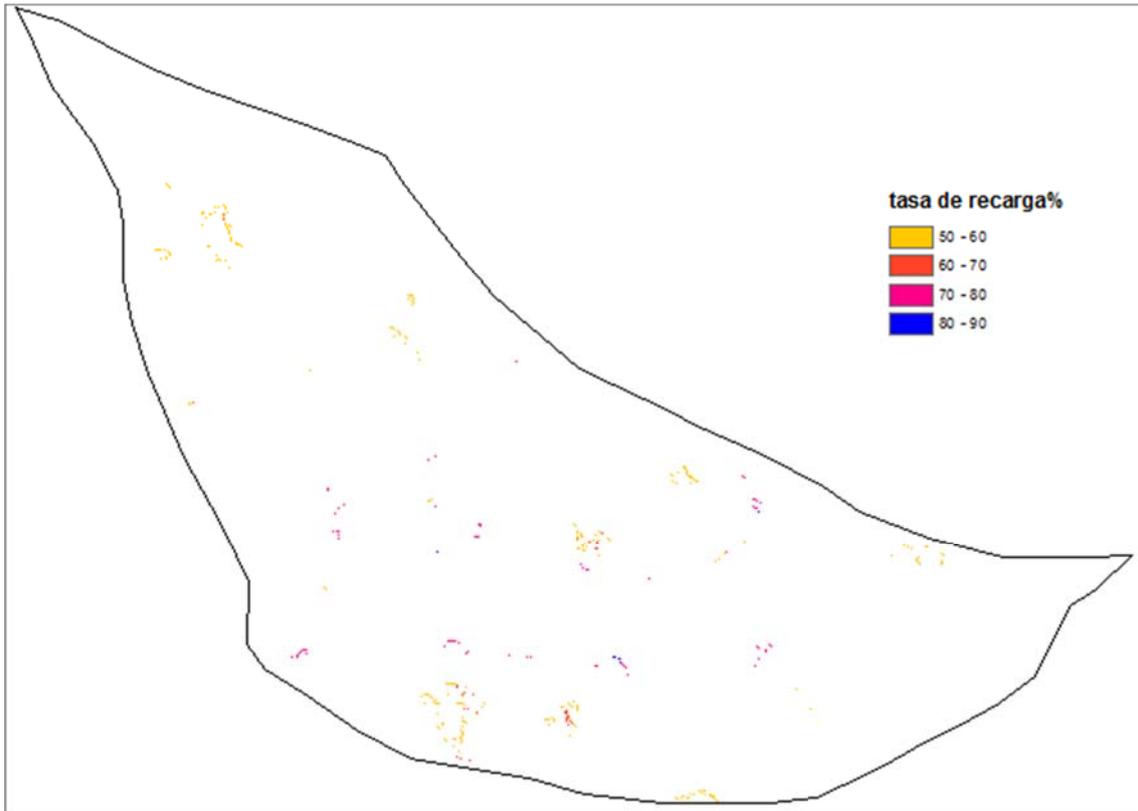


5.3. Cálculo del método APLIS:

A través de la calculadora ráster del programa ArcGis se procede a insertar la fórmula para llegar al resultado final:

$$R=(A+P+3*L+2*I+S)/0.9$$

Mapa de tasa de recarga y su correspondiente zonificación:



Atendiendo a la clasificación correspondiente al método APLIS la recarga media de Güeyos-Texa es del 59.64%, por lo que este acuífero se clasifica como acuífero de clase Media.

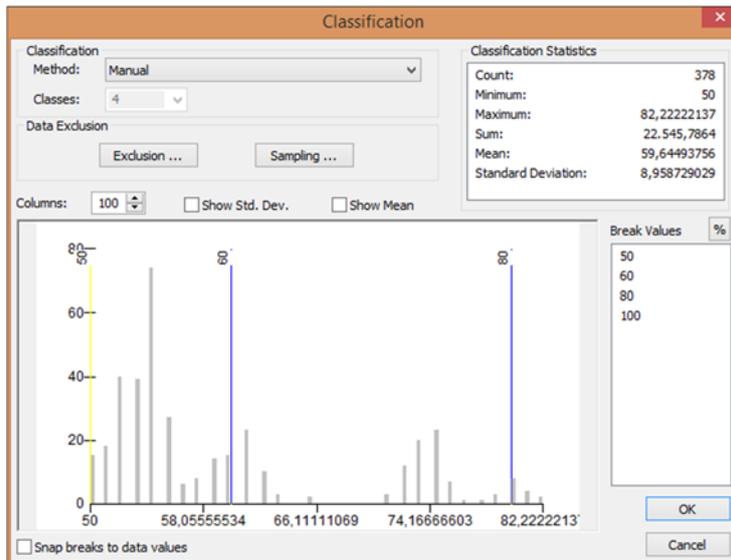
6. CONCLUSIONES

Viendo el histograma del resultado de la tasa de recarga :

Nº pixels 40-60% recarga-256 m2 superficie 6400

Nº pixel 60-80% recarga-116 m2 superficie 2900

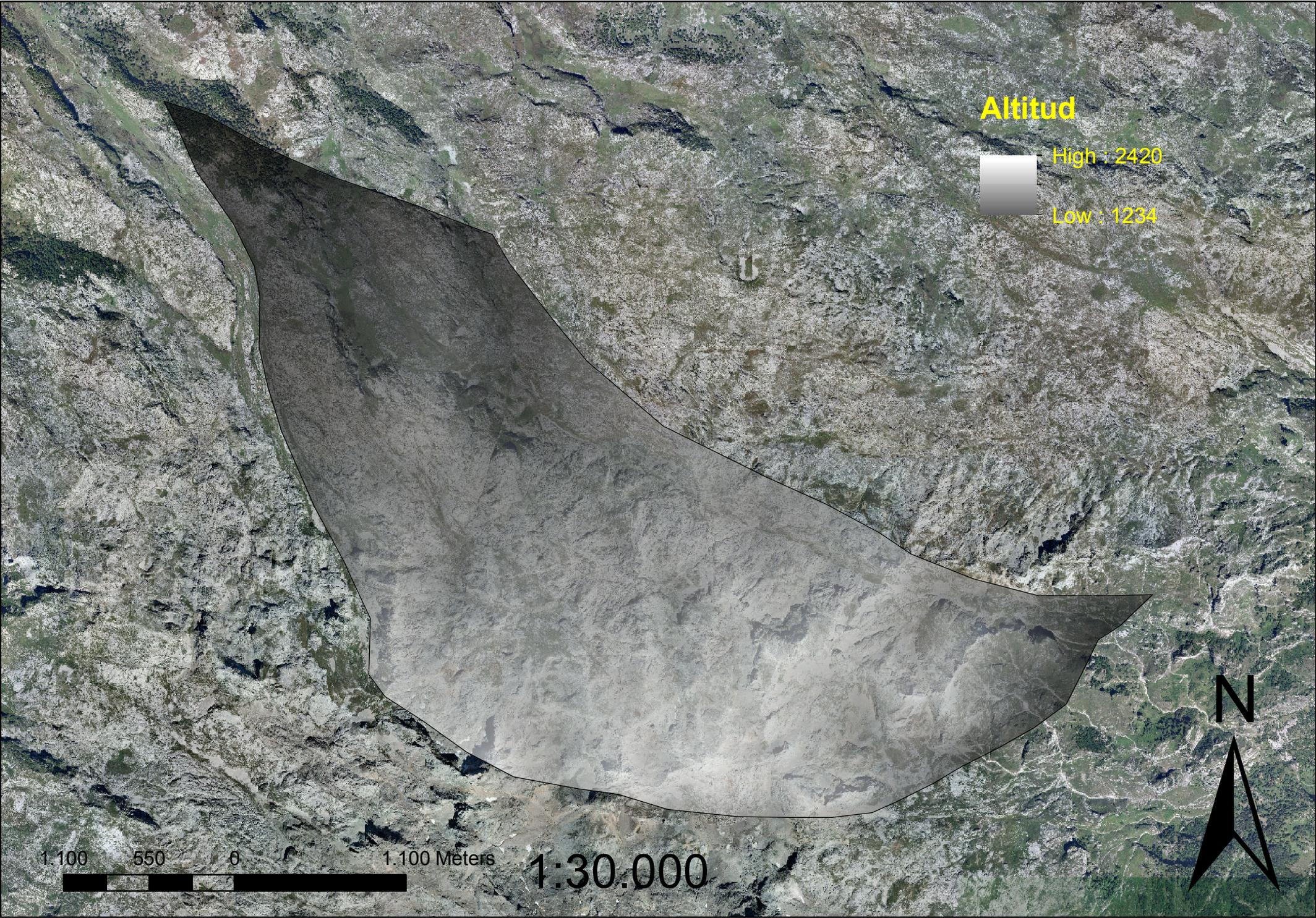
Nº pixel +80% recarga-6 m2 superficie 150



Por lo que la clase de recarga predominante es la moderada con una media del 59,64%, la tasa de recarga alta también es significativa mientras que la tasa de recarga muy altas es prácticamente inapreciable.

Apreciar también que las zonas de la recarga corresponden a zonas de depresiones (como era de esperar).

7. PLANOS



Altitud



High : 2420

Low : 1234

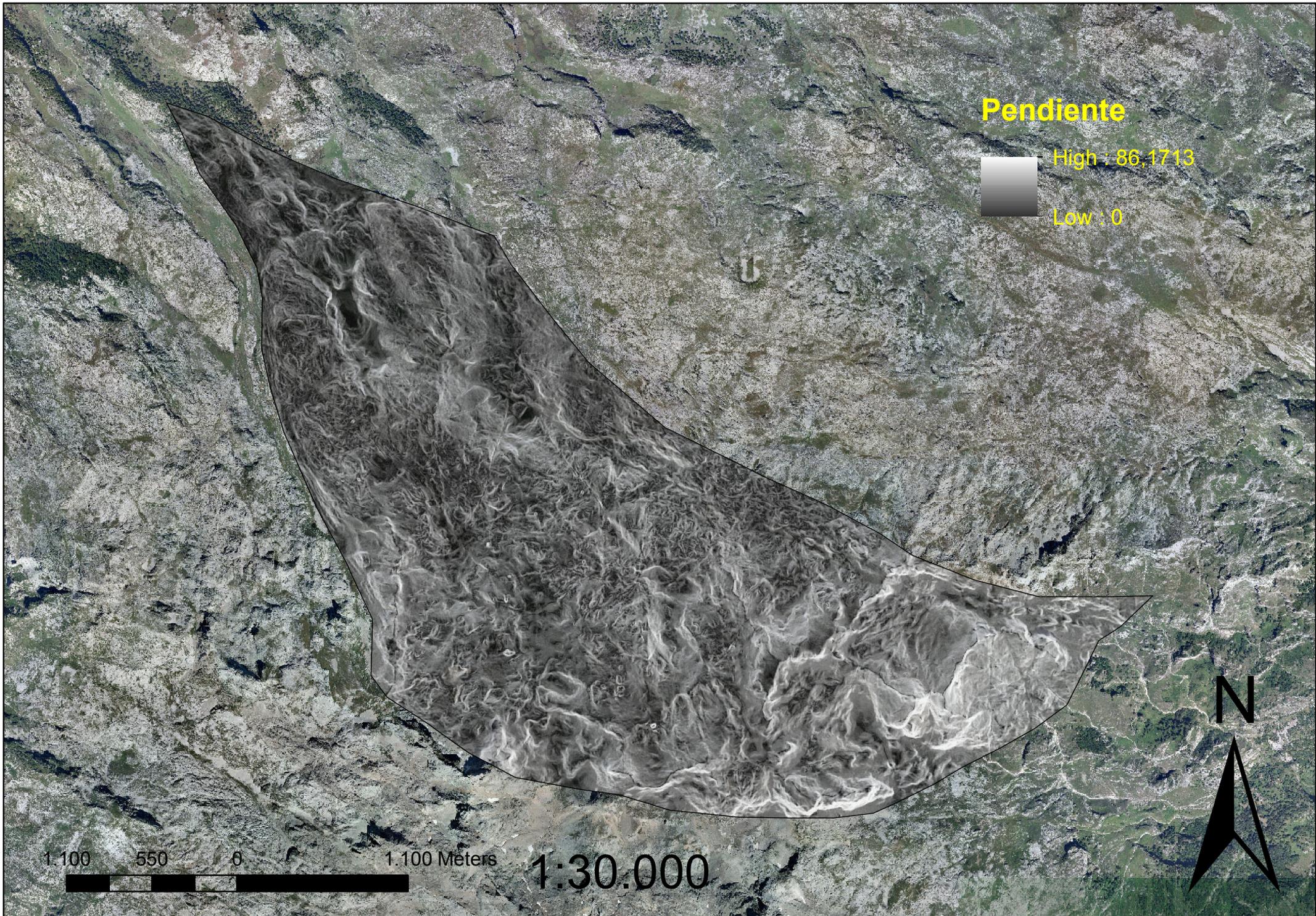
1 100 550 0

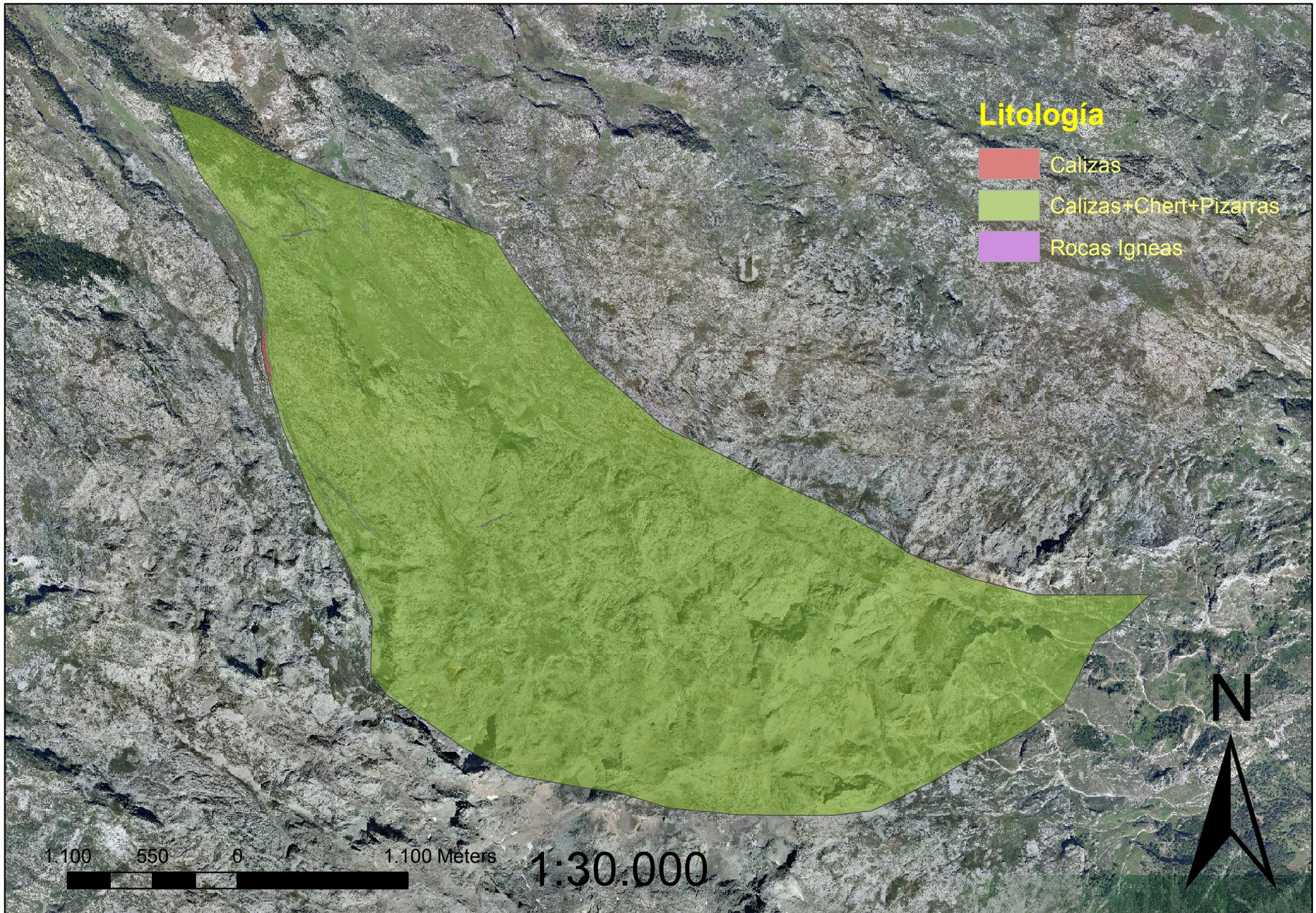
1 100 Meters

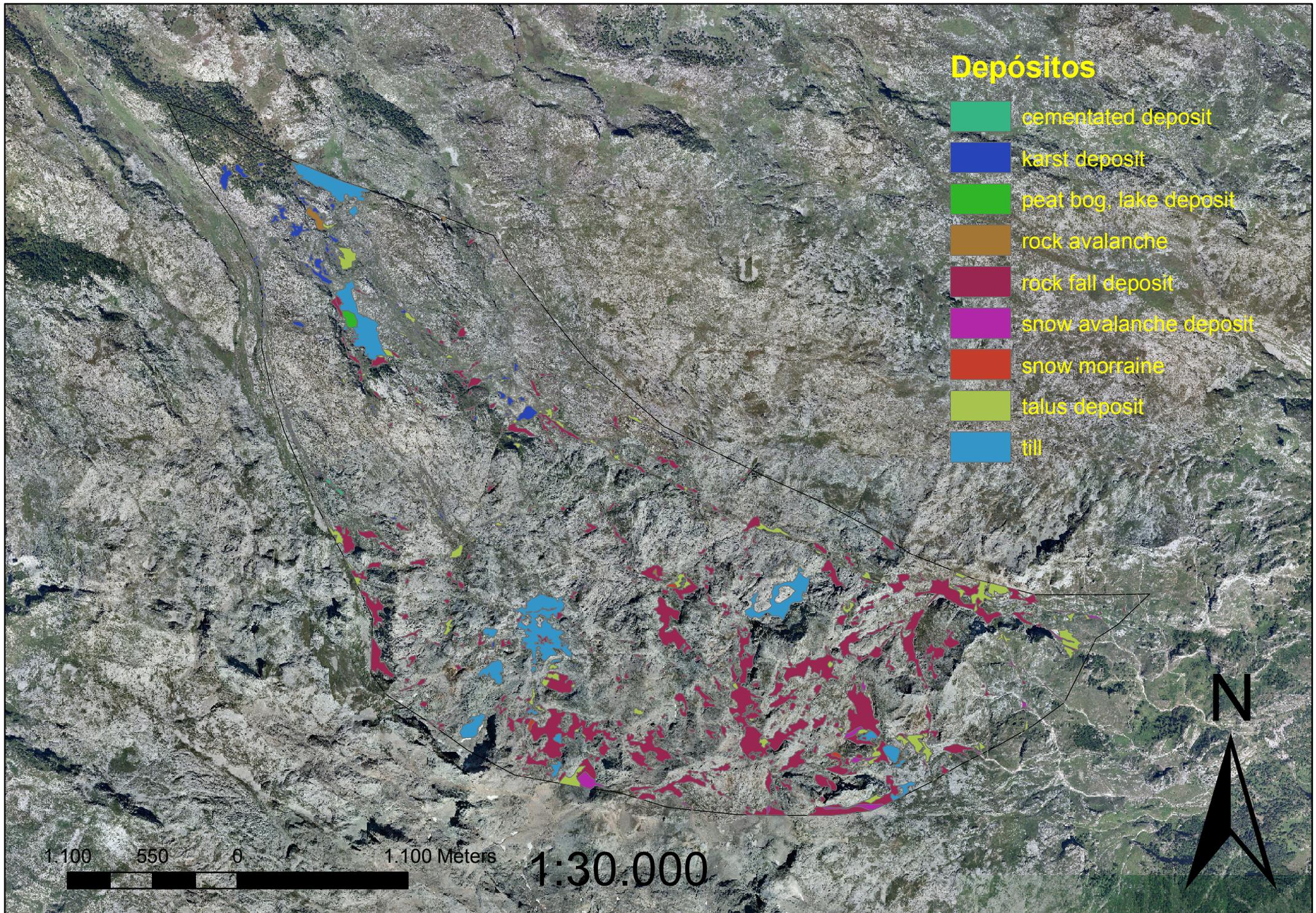
1:30.000

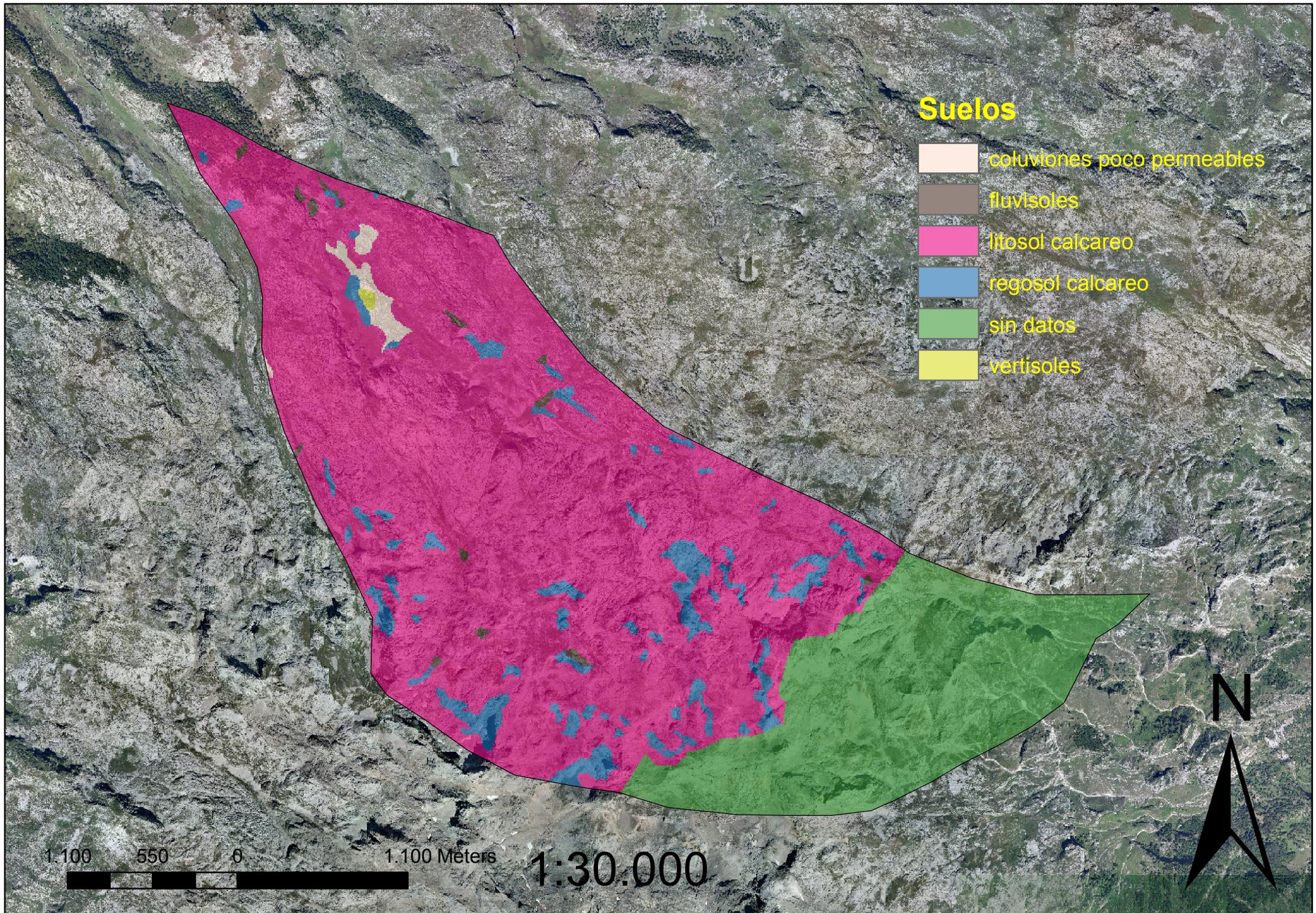
N

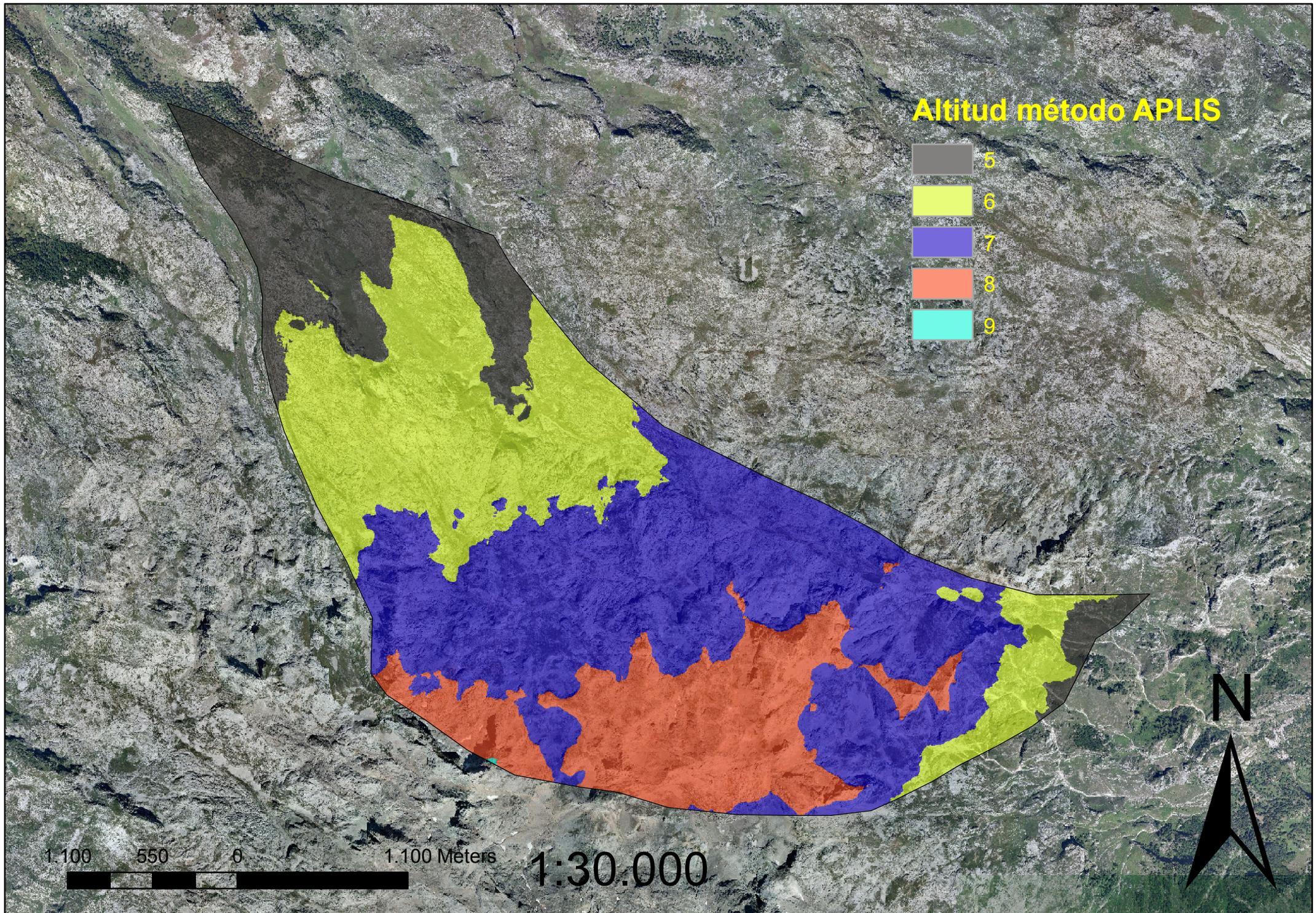






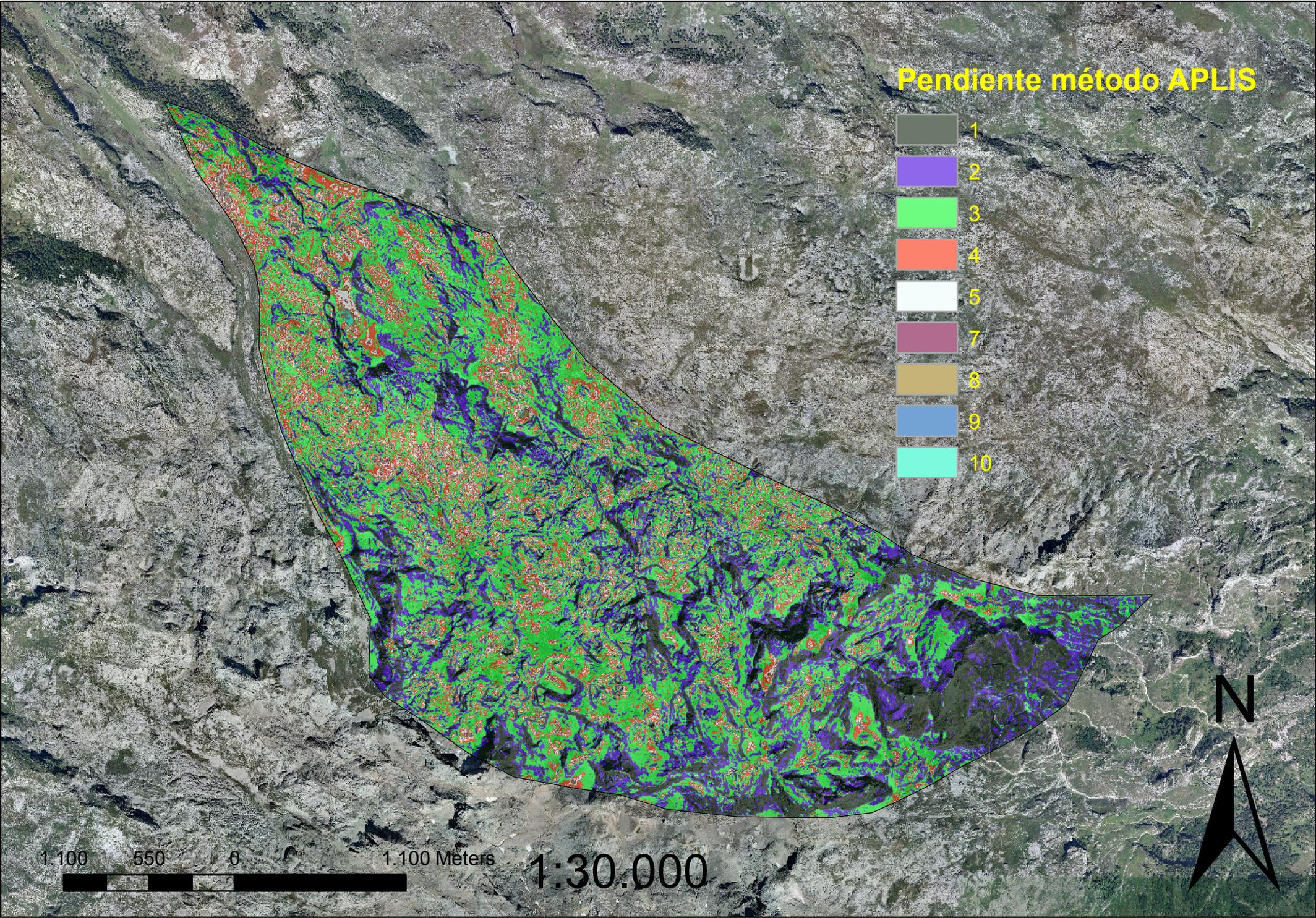




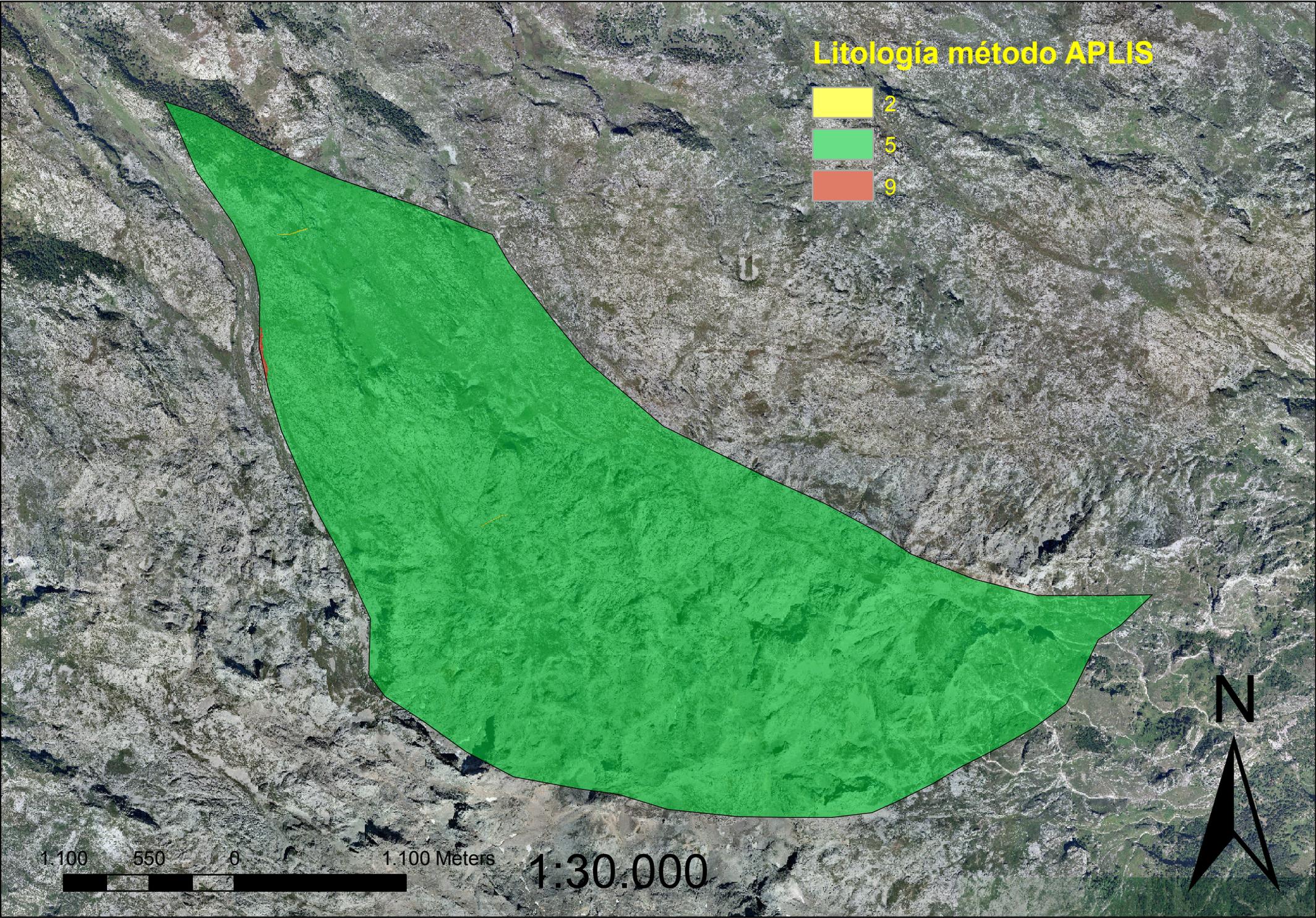


Pendiente método APLIS

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 7
- 8
- 9
- 10



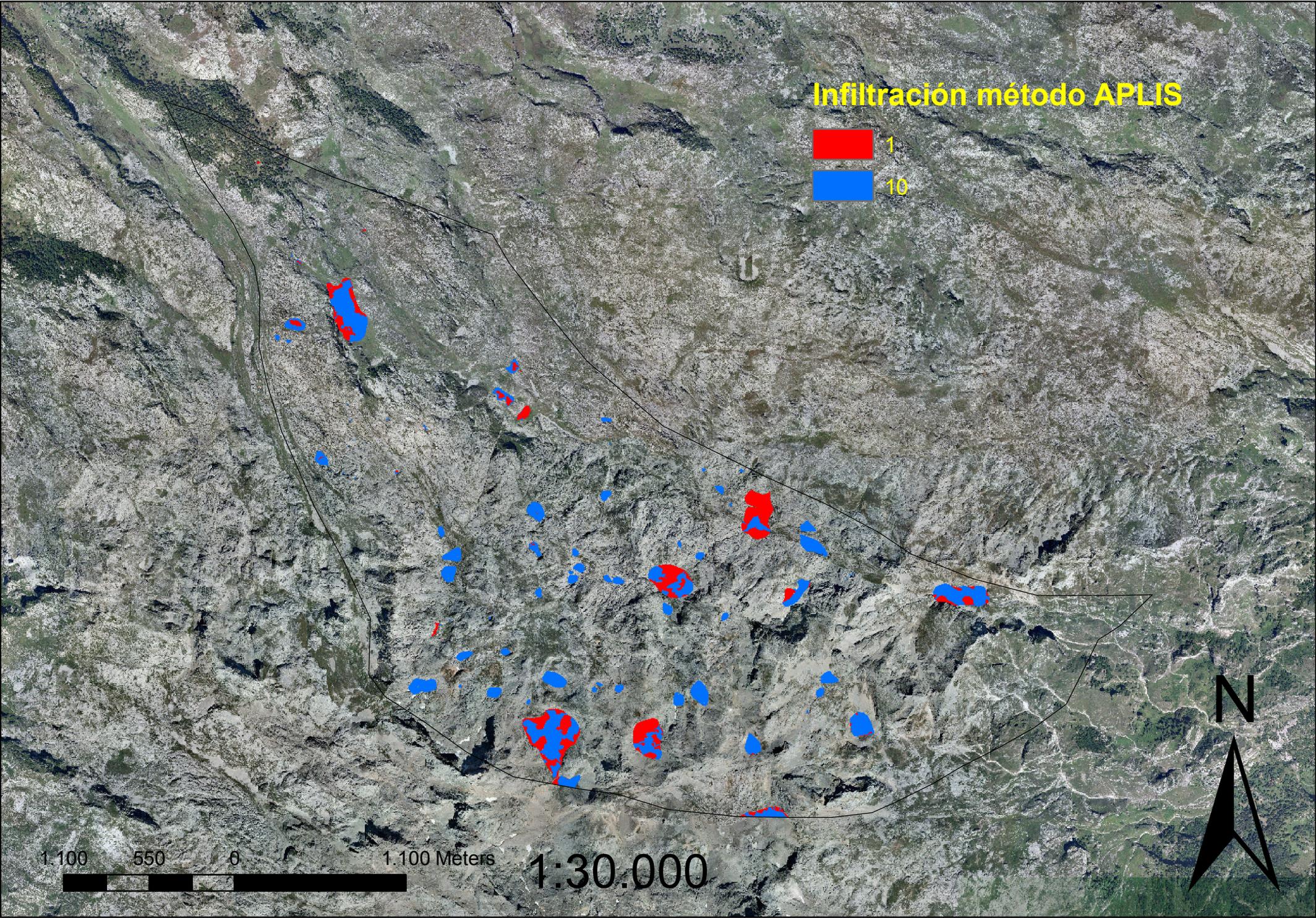
Litología método APLIS



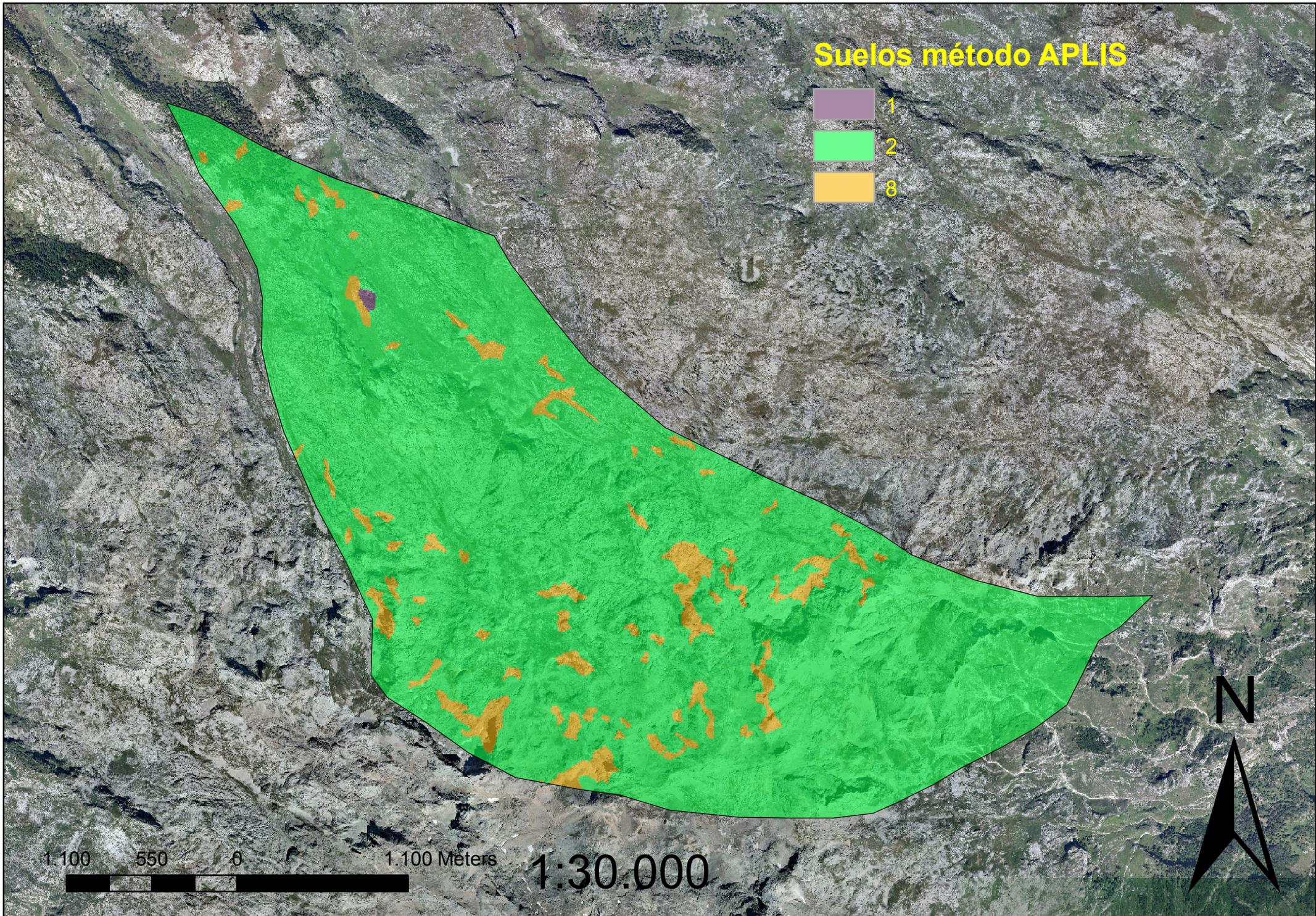
1:30.000



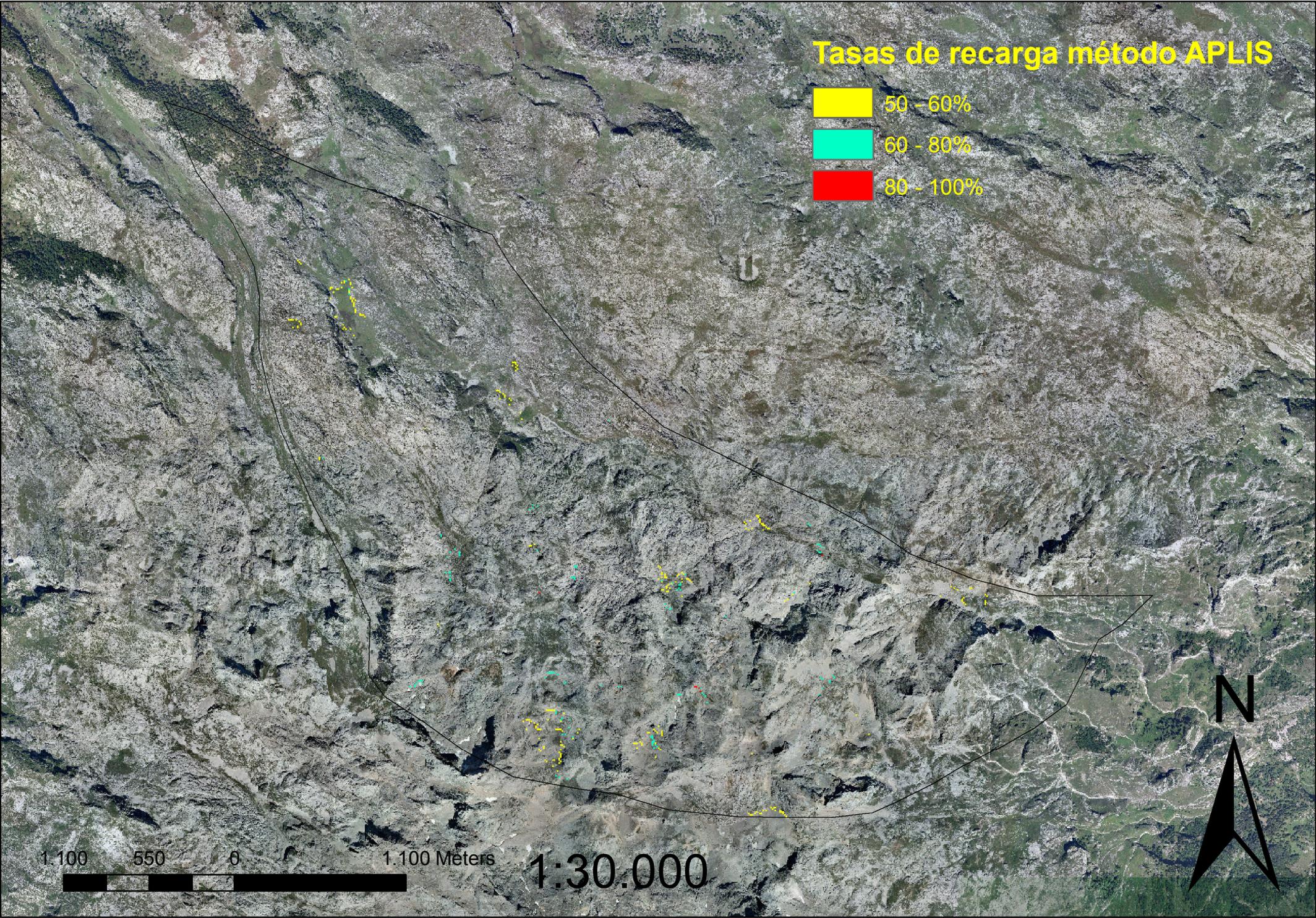
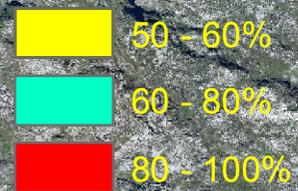
Infiltración método APLIS



Suelos método APLIS



Tasas de recarga método APLIS



1 100 550 0 1 100 Meters

1:30.000



8. BIBLIOGRAFIA

“Estudios metodológicos para la estimación de la recarga en diferentes tipos de acuíferos carbonáticos: Aplicación a la Cordillera Bética” IGME, Ministerio de Ciencia y Tecnología

“Karst, cambio climático y aguas subterráneas” J.J.Duran, B.Andreo, F.Carrasco

“Karst Hydrology and Geomorphology” Derek Ford and Paul Williams

“Methods in Karst Hydrogeology” Nico Goldscheider Y David Drew

“Parque Nacional de Picos de Europa. Guía geológica” Mónica Meléndez Asensio (IGME) et all.