

**ANALISIS MULTI-TEMPORAL DE LA EROSION EN EL AREA PROTEGIDA ENSENADA
DE RIONEGRO (ANTIOQUIA) CON MIRAS A GEOCONSERVACION**

Elaborado por

Juan Fernando Zapata Herrera

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de Geólogo

Directora:

María Isabel Marín Cerón, PhD.

Asesores:

Juan Felipe Paniagua Arroyave, PhD

Escuela de Ciencias

Departamento de Ciencias de la Tierra

Universidad EAFIT

Medellín, Colombia

2020

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	5
2. Marco teórico Modelamiento ART, BQART y RUSLE	6
3. Metodología	7
3.1 Conformación de base de datos el APER y análisis multi-temporal de la cobertura vegetal	8
3.2 Modelo ART	8
3.3 Modelo BQART	8
3.4 Modelo RUSLE	9
3.4.1 Fuerza erosiva de la lluvia (R)	9
3.4.2 Erodabilidad del suelo (K)	9
3.4.3 Factor topográfico (LS).....	9
3.3.4 Factor de cobertura y manejo del suelo (C)	9
3.3.5 Factor de protección de las coberturas (P)	9
4. Resultados	9
4.1 Base de datos y cambio de cobertura multi-temporal	9
4.1.1 Geología local	10
4.1.2 Geomorfología	10
4.1.3 Suelos.....	10
4.1.4 Hidroclimatología	10
4.1.5 Cambios de cobertura vegetal	10
4.2 Modelo ART	11
4.3 Modelo BQART	11
4.4 Modelo RUSLE	11
5. Discusión	12
5.1 Efectos de la ampliación de la frontera agrícola sobre los ecosistemas	12
5.2 Aprovechamiento de los servicios ecosistémicos de la APER	12
5.3 Propuesta de ampliación de la APER	12
5.4 Conflicto armado como principal dinámica en la ocupación Territorial del Norte de Urabá	12
6. Conclusiones y recomendaciones	13
Bibliografía	15
Figuras	19
Tablas	32

PREFACIO

El presente trabajo de grado se presenta en forma de manuscrito para ser sometido a Ocean and Coastal Management. Se adjunta como material anexo, la base de datos y SIG asociado, soporte fotográfico, mapas conceptuales de cada modelo y scripts de programación. Los resultados, se enmarcan en la producción del semillero de investigación en Geología Regional y Geoquímica, en las áreas de sensores remotos y geoconservación.

Agradezco primeramente a Dios por esta enorme bendición, seguidamente a la universidad EAFIT, por haberme dado la oportunidad de estudiar, agradezco a mi madre por su amor y paciencia, a mi padre por su amor y consejo, a mis hermanos por su acompañamiento a mis maestros en especial a la profesora María Isabel, quien sin su guía, no hubiera llegado hasta aquí, al profe Pani, por sus consejos y comprensión, agradezco también de manera especial a Miguel, que guio este proyecto desde el Cielo, gracias a mis compañeros por su amistad, especialmente Ana María, Andrés, Juan Pablo, Sebas el abogado, Alejandro, Santi Yepes, Alejandra y Vanessa.

ANÁLISIS MULTI-TEMPORAL DE LA EROSIÓN EN EL ÁREA PROTEGIDA ENSENADA DE RIONEGRO (ANTIOQUIA) CON MIRAS A GEOCONSERVACIÓN

Juan Fernando Zapata Herrera, María Isabel Marín-Cerón, Juan Felipe Paniagua Arroyave

Highlights: Biodiversity, GIS, Erosion, Gulf of Urabá, Geoconservation, Protected Area

Resumen

La falta de claridad en la legislatura colombiana con respecto a la importancia de la geología en el manejo de las áreas protegidas implica la no incorporación del vínculo entre los factores bióticos y abióticos que dicta su evolución ambiental. Para explorar estos vínculos, se realizó una cuantización comparativa multitemporal de la erosión por procesos de escorrentía y la producción de sedimentos para el Área Protegida de la Ensenada de Rionegro (APER), ubicada al Norte del Municipio de Necoclí. Se integraron herramientas derivadas de la geología, como los sensores remotos y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) a los planes de manejo y conservación para aplicar un análisis cualitativo y cuantitativo entre los años 1992 y 2019. Se representó la APER como una matriz de proximidad para el cambio de coberturas, modelación de escenarios de erosión para condiciones prístinas y de intervención humana, así como la zonificación de zonas de riesgo por erosión. Se concluye preliminarmente que la intervención humana sobre la APER afecta los ecosistemas a través de la producción de sedimentos que aumenta 33% pasando de ~6 kg/s en condiciones prístinas a ~8 kg/s en un escenario de intervención total (definido por el cambio de todas las coberturas por pastizales). La degradación por presión humana implicaría un aumento de 270 veces en los pastizales junto a una reducción del 7.6% del área de bosques, derivando esto en el desarrollo de áreas de riesgo por pérdida de suelo (109 t/ha-año). A pesar de las limitaciones de los resultados, relacionadas con la calidad y escala de las imágenes remotas y los modelos aplicados sin calibraciones con datos de campo, nuestros resultados resaltan el rol del entendimiento de los procesos geomorfológicos en el estudio ambiental de las áreas protegidas en zonas tropicales.

1. Introducción

La geoconservación se ha destacado en los últimos años como una de las ciencias emergentes más importantes dentro de las Ciencias de la Tierra (Henriques et al. 2011; Gordon et al., 2012; Gray, 2013; Gray et al., 2013; Prosser et al., 2013; Crofts and Gordon, 2015; Díaz-Martínez y Fernández-Martínez, 2015), tanto por su valor propio, como por la importancia de su rol complementario a la biología para la conservación de los ecosistemas (McNeely and Miller, 1984; Nelson and Serafin, 1997). Sin embargo, la legislación colombiana con respecto a las áreas protegidas, si bien exige la integridad de los ecosistemas, no tiene en cuenta sus factores abióticos, a diferencia de la International Union for Conservation of Nature, IUCN (Dudley, 2008), que reconoce el vínculo entre actividades antrópicas, modelado del paisaje y el equilibrio de los ecosistemas (Gordon et al., 2017), así como la comprensión generalizada de riesgos como los movimientos en masa, el hundimiento de los karst y la erosión de los suelos (Sharples, 1995), o como es el caso de la influencia de los cambios de las coberturas vegetales, sobre el cambio en el flujo de sedimentos y el aumento en la erosión (e.g. Dunne, 1979; Douglas, 1996; Vörösmartry et al., 2003; Syvitski et al., 2005; Restrepo and Syvitski, 2006; Syvitski and Kettner, 2011; Restrepo et al., 2015). Para el correcto manejo y administración de las áreas protegidas se hace necesario que estos cambios sean monitoreados y calculados (modelado matemático), de manera que los múltiples impactos sobre los servicios ecosistémicos y la biodiversidad (Sala et al., 2000; Margules and Pressey,

2000; Liu et al., 2001), la degradación de los suelos (Lal et al., 1989; Trimble and Crosson, 2000; Jie et al., 2002, Alkharabshah et al., 2013), sean evitados o minimizados, a fin de evitar incluso a que la capacidad de los ecosistemas para sostener la vida humana pueda verse afectada (Vitousek et al., 1997).

El presente artículo intenta evidenciar los efectos de una inadecuada planificación de la APER al no ser tomada en cuenta la influencia antrópica sobre los procesos naturales y las conexiones entre la biología y la geología a la hora de definir o administrar las áreas protegidas. Partimos de la siguiente hipótesis: La APER presenta cambios (multi-decadales) en sus condiciones prístinas que se ven reflejados en un mayor aporte de sedimentos en suspensión de acuerdo con los observados en cuencas de características morfológicas y climáticas similares con afectaciones humanas comparables. El objetivo general realizar el análisis cuantitativo multi-temporal de la erosión del suelo y sus implicaciones en el manejo integrado del Área Protegida Ensenada de Rionegro. Tomando como caso de estudio esta (APER), la cual sufre una problemática ligada al cambio de los usos del suelo derivado de la expansión de la frontera agrícola, expresado en el aumento de las zonas de cultivo y pastoreo, junto con la aplicación de técnicas tradicionales poco tecnificadas e inadecuadas tales como la tala y quema de bosques nativos (CORPOURABÁ, 2009). Adicionalmente, al ser una zona costera, la acentuada problemática de pérdida de suelo afecta algunos ecosistemas litorales (e.g., Blanco-Libreros, 2016; Mira-Martinez et al., 2017) debido a procesos de erosión o sedimentación asociado a la influencia antrópica (Posada, 2011).

El Distrito Regional de Manejo Integrado (DRMI) de la Ensenada de Rionegro, Los Bajos Aledaños, Las Marismas de Marimonda y el Salado está ubicado cerca del municipio de Necoclí, Golfo de Urabá, Caribe Sur de Colombia (Figura 1). Esta área protegida es una de las reservas de biodiversidad más importantes de la zona; con una importante riqueza en manglares representada por siete órdenes (Corpourabá, 2003), diecinueve especies de mamíferos, como *Didelphis marsupialis*, *Tamandua tetradactyla*, *Ciclops didactylus* y *Bradypus variegatus*, veintitrés especies de reptiles entre los cuales se pueden encontrar tortugas en peligro crítico como *Caretta caretta*, *Chelonia mydas*, *Eretmochelys imbricata*, *Dermochelys coriácea* y *Chelonoidis carbonaria* (CORPOURABÁ, 1999; Támara et al., 2018).

Finalmente, haciendo uso combinado de los modelos ART, BQART y RUSLE, se encontró que entre 1992 y 2019 la APER sufrió cambios en sus coberturas nativas, por la expansión de la frontera agrícola, expresado en un aumento drástico en pastizales para ganadería, así como remplazo de bosque nativo por cultivos silvícolas. También se calculó el incremento en los sedimentos disueltos en un escenario de intervención total (0.25 Mt/y), frente a la producción en condiciones prístinas (0.19 Mt/y, comportamiento comparable a cuencas de condiciones climáticas y de área en la zona del Urabá, obtenidos por Restrepo y Kjerfve, 2004), el incremento total fue de un 33.16%, comparable al aumento promedio del 30% que sufrió la cuenca del Magdalena y sus subcuencas a causa de la deforestación (Restrepo et al., 2015). Así mismo se definió por medio del modelo RUSLE que las zonas con riesgo más alto de erosión son mayores en 2019 que en 1992, con un incremento progresivo hacia el 2019, concentrado en el sur de la APER, así como los bordes de las ciénegas de la Marimonda, el Salado y el Río Negro. Estos resultados demuestran como los procesos de ocupación territorial de la APER, así como el aprovechamiento de recursos naturales, han hecho que se aumente su grado de intervención, siendo las actividades agropecuarias las de mayor peso, lo cual incide directamente en la transformación del territorio, las coberturas y ecosistemas de la APER, generando fenómenos como la fragmentación de los bosques por la deforestación (CORPOURABÁ-DAMA, 2007). Estos cambios en las coberturas nativas han sido parte de las dinámicas de ocupación de territorio, derivadas del desplazamiento de la población principalmente esto debido a la violencia que ha azotado a la zona históricamente.

2. Marco teórico Modelamiento ART, BQART y RUSLE

La aplicación de modelos matemáticos es una herramienta útil para la apropiada delimitación y el correcto manejo de las áreas protegidas, puesto que permiten la conocer la magnitud de los fenómenos

naturales y de las intervenciones de origen antrópico y si estas tienen algún tipo de incidencia sobre los ecosistemas.

El modelo **ART** es un modelo matemático basado en la topografía, la temperatura promedio anual, condicionada por latitud y el área o caudal promedio, fue planteado por Syvitski y otros (2003) para calcular el flujo de sedimentos a largo plazo desde las cuencas hacia el océano. Este modelo ha sido propuesto para calcular la carga y producción de sedimentos en cuencas en condiciones preantropocénicas o prístinas (Syvitski et al., 2005a). El transporte de sedimentos es la primera pista para saber que el paisaje está evolucionando; el transporte de sedimentos puede ser usado para entender los impactos de actividades antrópicas como la minería, deforestación y las prácticas agrícolas (Oldeman et al., 1991). Las cuencas fluviales cambian a través del tiempo, siendo que en los ríos modernos, están influenciados tanto por sus condiciones antiguas como aquellas que son influencia directa del ser humano (Syvitski., 2003)

En cuanto al modelo **BQART** es un modelo analítico modificado con algoritmos empíricos, planteado por Syvitski y Milliman (2007), como un predictor más completo del flujo de sedimentos que el modelo ART; puesto que ahora se tiene en cuenta la influencia de factores tales como la geomorfología, la geología, la tectónica y la influencia antrópica. Estimar la redistribución de la carga de sedimentos es importante debido a que expresa los cambios en los agentes de la erosión, así como el transporte, deposición y cambios en el paisaje (Walling y Fang, 2003).

El modelo **RUSLE** utiliza la ecuación universal revisada de pérdida de suelo, que es una actualización del modelo USLE, propuesto para conocer la pérdida de suelo por erosión laminar y erosión en surcos a fin de proporcionar una guía para las decisiones metodológicas en el planeamiento de conservación. Esto lo hace combinando la influencia de varios factores tales como prácticas de control de erosión, sistemas de cultivo o técnicas de conservación en un lugar en particular (Renard et al., 1997). Desglosando el modelo, se hace necesaria la definición de los siguientes parámetros: Fuerza erosiva de la lluvia (R), este factor refleja el efecto de la fuerza de la lluvia sobre la erosión del suelo, siendo que, partículas de suelo depende en gran medida del impacto de las gotas de lluvia, de manera que varía según la intensidad de la lluvia y el tamaño de las gotas, de manera que, si bien en este estudio no pudo ser realizado debido a la falta de registros en la zona de estudio, es necesario calcularlo para cada variación climática, dentro de los ciclos intermensuales, interanuales e interdecadales. El factor de erodabilidad del suelo K, representa la susceptibilidad de un suelo o superficie de material a la erosión, siendo que depende de las propiedades derivadas de la textura del suelo, aunque otros factores como la materia orgánica y la estructura también influyen (Montoya et al., 2005). Los factores L y S (Simms et al., 2003), representan la influencia topográfica y define los efectos del ángulo y longitud de la pendiente en la erosión laminar y de cárcavas, este factor es el más difícil de definir, debido a que envuelve juicios subjetivos. El factor L (longitud de la pendiente) se define como el punto donde comienza el flujo al punto donde la pendiente se suaviza y se inicia la acumulación, o donde el flujo de agua se concentra en un canal bien definido. El factor C al igual que el P se define a partir de las coberturas presentes en cada año, siendo los únicos factores que cambian para cada año de este estudio. El factor P es resultado de conjugar el uso del suelo con la pendiente, y representa la tasa de pérdida de suelo, se estima que al implementar medidas de conservación se logra reducir la pérdida de suelo.

3. Metodología

El flujograma metodológico (Figura 2) muestra la conceptualización del proyecto en general, conformado por tres objetivos específicos: (a) Conformación de la base de datos y análisis multi-temporal; (b) modelamiento ART; (c) Modelamiento BQART y (d) modelamiento RUSLE. Cada uno se describe a continuación con su desarrollo metodológico.

3.1 Conformación de base de datos el APER y análisis multi-temporal de la cobertura vegetal

Con la finalidad de conocer el estado de la APER, así como desarrollar los modelos matemáticos, se construyó una base de datos, para la información geográfica a partir de datos de terceros, a fin de estructurar y almacenar datos, siguiendo la arquitectura de GBD del software ArcGis. En este estudio, se estructuró la base de datos en paquetes temáticos: geología, geomorfología, suelos coberturas vegetales y climatología. Así mismo se reunió información con temática sociológica a fin de comprender los principales eventos de ocupación del territorio y si estos tenían incidencia sobre los ecosistemas.

Para poder comparar las coberturas digitalizadas en este estudio se emplearon nueve Land Use/Land Cover (LULC), en las cuales siete se ven representadas en la APER, bosque (1), agricultura (2), pastizales (3), arbustos (4), humedales (6) y agua (7). La descripción de cada clase se encuentra en la tabla (1).

La matriz de detección de cambios para el periodo entre 1992 y 2019 se generó usando el método píxel por píxel, todos estos datos fueron procesados usando ArcGIS 10.5. Este procesamiento incluye la asignación de un mismo sistema de coordenadas, reducción al área específica de la APER y conversión a ráster con una misma resolución de 30mx30m. Posteriormente estos rústeres fueron convertidos a puntos y sus tablas de datos se procesaron por medio de condicionales en Microsoft Excel.

3.2 Modelo ART

Para la zona de estudio se empleó la ecuación 10 de Syvitski et al., 2003, la cual describe la carga de sedimentos disueltos (Kg/s), A es el área de la cuenca (Km^2), R representa el relieve, desde el nivel del mar hasta la cota máxima (m), T es la temperatura promedio de la cuenca ($^{\circ}C$), y son índices que se encuentran en la tabla (2).

$$Q_s = A^{\alpha_4} R^{\alpha_5} e^{KT} \quad (1)$$

3.3 Modelo BQART

Este modelo se aplicó siguiendo las ecuaciones 1a y 1b propuestas por Restrepo et al., 2015, donde hace unos ajustes mínimos para aplicarlos a nivel de subcuenca.

$$\bar{Q}_s = \bar{\omega} B \bar{Q}^{0.31} A^{0.5} R \bar{T} \quad \text{para } T \geq 2^{\circ}C \quad (2)$$

Donde B se define por medio de:

$$B = IL(1 - T_E)E_h \quad (3)$$

Donde la carga de sedimentos disueltos a largo plazo (kg/s , usando como constante de conversión proporcional = 0.02), es el caudal de agua a largo plazo (Q), A es el área de la cuenca (Km^2), R es la diferencia altitudinal entre el punto más alto de la cuenca y el sitio de descarga (km), es la temperatura promedio anual dentro de la cuenca ($^{\circ}C$), I es el factor de erosión glaciario, L representa el factor litológico de toda la cuenca, es la eficiencia de retención de sedimentos en los reservorios y embalses, es el factor de erosión por influencia antrópica, para este estudio se entiende que es por influencia directa de la deforestación.

Para el cálculo del caudal de la APER, se emplearon las ecuaciones 11 y 12 de Syvitski et al. (2013):

$$\Theta = P - E \pm S \quad (4)$$

Donde Θ es la escorrentía ($mm/año$), P, es la precipitación media anual ($mm/año$), obtenida a partir del cálculo del promedio de datos de precipitación de una estación meteorológica del IDEAM, cerca de la zona de estudio, E es la evapotranspiración promedio ($mm/año$), obtenida a partir de la misma estación del IDEAM y S es el almacenamiento medio anual, que al no disponer de información en la zona no se tuvo en cuenta.

$$Q = \Theta/A \text{ (5)}$$

Donde Q , es el caudal medio anual (m^3/s), Θ es la escorrentía (mm/año) y A es el área de la APER (km^2).

3.4 Modelo RUSLE

La aplicación del modelo RUSLE se expresa matemáticamente con la ecuación (6):

$$A = LS * K * R * C * P \text{ (6)}$$

Donde A es la pérdida media anual del suelo en un punto específico (t/ha.yr), LS , K , R , C y P se describen a continuación:

Para la correcta implementación de este modelo son necesarios datos de coberturas vegetales, precipitación, prácticas de manejo y conservación, textura de los suelos y topografía, se

3.4.1 Fuerza erosiva de la lluvia (R)

Para el caso de Colombia Pérez (2001) establece una relación a partir de datos de precipitación media multianual en la ecuación (x), empleable en zonas cuya precipitación media anual sea superior a los 1240 mm/año, condición que se cumple la zona de estudio, pues a partir del ráster de precipitaciones, se observa que los valores varían entre 1867.1 y 2911 mm/año. Dónde R es la fuerza erosiva de la lluvia y Pma es la precipitación media anual de la zona de estudio. Posteriormente esta ecuación fue aplicada al ráster de prepitación tomado de Ceccherini et al., 2015 y analizado en ArcGis.

3.4.2 Erodabilidad del suelo (K)

Para la zona de estudio se empleó la información del mapa de texturas del suelo del IDEAM escala 1:100.00, posteriormente los valores asignados para el factor K fueron adaptados de León, 2001, resumido en la tabla 3.

3.4.3 Factor topográfico (LS)

Para el cálculo del factor LS , se usó la ecuación modificada de Simms et al., 2003 y adaptada para ArcGis por Alkharabsheh et al., 2013 y Ganasri y Ramesh 2015.

$$((Flow\ accumulation) \times tamaño\ de\ celda) / 22.13)^{0.6} \times ((Sin\ Slope) \times 0.01745) / 0.0896^{1.3} \text{ (6)}$$

3.3.4 Factor de cobertura y manejo del suelo (C)

Los valores tomados para cada cobertura se presentan en la tabla (4). Para la cuenca se usaron los valores propuestos por Shi et al. (2002) y usado en cuencas del Urabá por Posada (2011).

3.3.5 Factor de protección de las coberturas (P)

De igual manera que con el factor C se adaptaron los valores propuestos por Shi et al. (2002) usados en Posada (2011) representados en la tabla (5)

4. Resultados

4.1 Base de datos y cambio de cobertura multi-temporal

La recopilación de la información bibliográfica empezando por el acuerdo del consejo directivo número 12 de CORPOURABÁ del 2009, mediante el cual la APER fue declarada área protegida, resaltándose únicamente el patrimonio biológico.

4.1.1 Geología local

Al Este de la zona, se encuentra un plegamiento en forma de sinclinal; en el núcleo de la estructura afloran las Arenas Morenas de la Formación Corpas del Plioceno, en los flancos están expuestos los estratos de la unidad Pavo superior de la Formación Floresanto de edad Langhiense. hacia el centro de la APER está expuesta la Formación Floresanto con la unidad Pavo Superior de edad Langhiense, hacia el Este de la zona, seguido por la unidad Pavo Inferior tanto en costado Occidental como Oriental, estas formaciones están afectadas por la Falla Congo que se encuentra al Sureste (Figura 3).

4.1.2 Geomorfología

El IDEAM clasifica la APER dentro de los sistemas morfo genéticos como una zona litoral, siendo que principalmente su geomorfología se compone de planicies de depósitos aluviales y marinos, siendo en su mayoría de topografía plana, con solo tres pequeños cerros, uno hacia el borde litoral, el cerro del Águila el más importante como atractivo ecoturístico debido a su vista panorámica, los otros cerros están localizados uno al centro y otro en el borde Este. (Figura 4).

4.1.3 Suelos

La APER posee una gran variedad en suelos, debido a su amplia variedad edafológica, por este motivo es una zona con un alto potencial agrícola, dado que gran parte de los suelos tienen buen espesor y en general están bien drenados, así como su alta fertilidad, son ideales para cultivos como el banano y el coco, que predominan en la zona del Urabá (Figura 5).

4.1.4 Hidroclimatología

La precipitación media anual (pma) en la APER varía entre los 1867.1 mm/año hasta los 2911.24 mm/año, con las menores precipitaciones hacia el borde este de la APER, y las mayores hacia la línea de costa. (Figura 6)

4.1.5 Cambios de cobertura vegetal

El análisis multi-temporal se basó en la identificación de los cambios de coberturas se decidió crear una matriz de aproximación de los cambios de LULC entre 1992 y 2019. Para esto se usaron dos fuentes distintas de información, para 1992 imágenes satelitales de la iniciativa de Cambio Climático de la Agencia Espacial Europea (CCI-ESA) con una resolución de 300m x 300m, para el 2019 se usó el mapa de coberturas de CORPOURABÁ (2016) escala 1:10.000, modificado en 2019 a partir de observaciones campo.

Entre 1996 y 2019, se evidencia una clara expansión en la frontera agrícola, principalmente para la siembra de pastos, con un aumento de 26990.6%, pasando 19.2 ha en 1992 a 5201.4 ha en 2019, en la LULC tipo pastizal, concentrado principalmente en la zona Este, donde también se encuentra la mayor parte de los cultivos. así como en la zona Centro y rodeando al litoral, incluso cerca de la zona de especial protección, como playa Bobalito donde las tortugas ponen sus huevos (Támara et al., 2018); aquí las LULC originales fueron remplazadas principalmente las coberturas de arbustos, agricultura. la cobertura tipo bosque; El aumento en el 246.5% en la cobertura de mangle, (pasando de 1487.4 ha en 1992 a 4831.8 ha en 2019) se puede explicar debido a que el satélite de la CCI-ESA, reconoce parte de los manglares como bosque, a diferencia del mapa modificado de CORPOURABÁ, los cambios se resumen en la Tabla (6).

A partir de los mapas de coberturas reclasificados en las nueve LULC, se obtuvo una matriz de cambios representada en la tabla (7), seguido por el bosque con una reducción del 7.6%. Todas las LULC muestran cambios hacia pastizales, siendo que el mayor cambio es del bosque, puesto que 2737.2 ha se convirtieron en pastos para ganadería.

Se observa que la LULC más estable corresponde al agua, con solo un 0.6% de aumento pasando de 1487.4 ha en 1992 a 1478.4 ha en 2019, se observa que la LULC más estable corresponde al agua, con solo un 0.6% de aumento pasando de 1487.4 ha en 1992 a 1478.4 ha en 2019.

4.2 Modelo ART

Una vez ingresado los datos al script de Matlab, se obtuvo que la carga de sedimentos disueltos a largo plazo dentro de la APER en condiciones prístinas fue de 5.88 kg/s (0.19 MT/y), los datos usados y los resultados se resumen en la Tabla 8. Posteriormente se procedió a comparar los resultados con los calculados por Restrepo y Kjerve 2004, en cuencas de la zona del Urabá, con características de área, precipitación y temperatura similares a la de la APER, los resultados se resumen en las Figuras 7a y 7b. Si bien los resultados no sirven para validar el modelo, siendo necesaria la calibración por medio de mediciones periódicas en campo si muestran que la APER tiene una tendencia y comportamiento similar.

4.3 Modelo BQART

Para calcular el modelo BQART, se definió el factor B que define la influencia geológica y antropogénica, y por lo tanto el escenario de intervención, los valores usados para cada subfactor y el insumo usado se muestran en la tabla (9). Luego se calculó el caudal promedio anual de la cuenca por medio de las ecuaciones 11 y 12 de Syvitski et al., 2013, los datos empleados y los resultados se resumen en la tabla (10). Finalmente, estos datos junto con los otros datos necesarios se ejecutan en el script de Matlab, los datos usados se resumen en la tabla (11).

En este escenario el incremento en la producción de sedimentos es del 33.16% con respecto a las condiciones preantrópicas calculadas con el modelo ART; estos resultados pueden ser comparados con los obtenidos por Restrepo y colaboradores (2015) en la cuenca del Magdalena, donde el incremento promedio a causa de la deforestación es del 30%

4.4 Modelo RUSLE

Se obtuvo un ráster de cada una de las variables necesarias para el modelo RUSLE, se multiplicaron, para generar el mapa de riesgo por pérdida de suelo promedio anual, dada en t/ha.año para ambas fechas definidas, obteniendo los mapas mostrados en la figura (8a) y figura (8b). Para la definición de la magnitud del riesgo, se siguió la clasificación empleada por Woldemariam y otros (2018), mostrada en la Tabla (12).

Comparando ambas fechas el modelo mostró un comportamiento creciente en sus valores máximos, así como el aumento de áreas críticas, esto asociado a las coberturas, el factor de erodabilidad de suelo (K) fue la única variable que se cambió para ambas fechas analizadas.

Para 1992 las zonas con riesgo alto corresponden a un solo punto y otro a medio y una mayor proporción corresponde riesgo bajo-medio, en las zonas cuyo uso de suelo es la agricultura, y las de riesgo bajo corresponden a zonas de arbustos.

Al comparar el mapa de riesgo por pérdida de suelo del 2019 con el mapa de coberturas e hidrológico, los puntos más críticos (riesgo muy alto y extremadamente alto), coinciden con los bordes de las ciénagas, siendo que estos ecosistemas son especialmente importantes y susceptibles ([Valiela et al, 2001](#); [Restrepo, 2005](#) y [Hogarth, 2007](#)).

Comparando las zonas los cambios netos y el cambio porcentual (figura 9a y 9b) en general se denota una relativa estabilidad en la mayoría de la APER, siendo que la mayor parte se mantiene sin riesgo o en riesgo bajo o medio-bajo, pero las áreas con un mayor cambio son las que bordean las ciénagas, tramos de la vía principal y el litoral, en estas zonas es donde se concentra la mayor expansión de la frontera agrícola.

Estos datos son consecuentes con lo hallado en otras cuencas de Urabá (Acandí y Turbo) por Posada (2011), donde para el río Turbo en 2010, el máximo rango varía entre 100-366 t/ha.y y en el río Acandí el mayor rango se encuentra entre 41.09 y 93.54 t/ha.y, en 1975, estos valores son similares en los encontrados en la APER (con un valor máximo de 25.35t/ha.y en 1992 y de 107.26t/ha.y para el 2019).

5. Discusión

5.1 Efectos de la ampliación de la frontera agrícola sobre los ecosistemas

Debido al aumento en la producción de sedimentos progresivo que ha habido en la APER, siendo principalmente la expansión los pastos destinados a ganadería (potreros), se podría decir que los ecosistemas se podrían ver afectados (Blanco-Libreros et al., 2013), como es el caso de los manglares que al ser barreras o filtros para el depósito de sedimentos en sus suelos. Los manglares no deforestados presentaron mayor contenido de materia orgánica, uniformidad en los sedimentos, y profundidad de las charcas intermareales, mientras que los manglares que sufrieron tala, o directamente convertidos en potreros presentaron mayores valores de pH y temperatura, mostrando que el conjunto de variables físico-químicas del agua intersticial y las propiedades de los sedimentos cambian significativamente a lo largo de la interfase manglar-potrero, siendo el aumento de temperatura del aire y del suelo efecto de la “potrerización” del manglar, en la que generalmente se dejan algunos árboles para proveer sombra para el ganado). Además de la pérdida de árboles, la pérdida de plántulas y neumatóforos parece ser el mecanismo que incrementa el rigor ambiental y el riesgo de depredación (Blanco y Castaño, 2012)

5.2 Aprovechamiento de los servicios ecosistémicos de la APER

La mayor importancia de la APER proviene de los diferentes servicios ecosistémicos de cada uno de los ecosistemas; varios de estos servicios se ven amenazados debido al aprovechamiento indebido de algunos de ellos, principalmente de aquellos derivados de las actividades agrícolas como los cultivos (Hubert et al., 2010) y en mayor medida la conversión de grandes extensiones en pastizales para ganadería, poniendo así en riesgo la continuidad y sostenibilidad de la APER.

Las áreas protegidas funcionan como una de las principales estrategias para mitigar la grave crisis de biodiversidad actual (Rodrigues et al., 2004; Chape et al., 2005; Butchart et al., 2012), teniendo una mayor relevancia las áreas costeras, como la APER que presenta algunos de los más importantes para la actualidad, como son la regulación del recurso hídrico, la conservación de la biodiversidad y geodiversidad, la captura de dióxido de carbono y el ecoturismo, otros servicios se muestran en la Figura (11). Sin embargo, en la región Caribe solo se encuentra la quinta parte de las áreas protegidas de Colombia, siendo la región que atrae mayor número de turistas y enfrenta una alta presión por parte de la población, debido a los altos índices de pobreza (Aguilera-Díaz et al., 2006).

Los ecosistemas más importantes por los múltiples servicios ecosistémicos que prestan son las ciénagas y los humedales (principalmente la regulación hidrológica, mitigando las inundaciones, reducción de la erosión y los deslizamientos de lodo, Ricaurte et al. (2017), pero estos como se muestra con los resultados del modelo RUSLE son los que se encuentran en mayor riesgo.

5.3 Propuesta de ampliación de la APER

Siendo que uno de los principales objetivos de la APER es conservar en el mejor estado posible los diferentes ecosistemas, se notó que el área delimitada no cubre totalmente la cuenca de la ciénaga del Salado. Se propone la ampliación de 2291.82 ha (Fig. 10) siguiendo las políticas de conservación, preservación, protección y aprovechamiento sostenible, que se establecen en el Artículo Décimo del Acuerdo 12 del Consejo Directivo (por medio del cual se estableció la zona como un área protegida). El impacto sobre este importante ecosistema sería menor si se restringen las actividades humanas sobre el área de influencia de este.

5.4 Conflicto armado como principal dinámica en la ocupación Territorial del Norte de Urabá

En las etapas anteriores a la conquista española, las comunidades indígenas habitaron la zona del Urabá; el territorio de la APER se encontraba habitado por la etnia Caribe, cuyos descendientes actuales (Tules o Cunas), aún habitan su territorio ancestral desde el municipio de Necoclí hasta las Islas de San Blas. Tras las primeras exploraciones por parte de los españoles, cerca del área protegida se funda la primera

población continental americana, San Sebastián de Urabá, fundada en 1505; posteriormente a solo cinco kilómetros de la cabecera urbana de Necoclí, se fundó en 1535 la población de San Sebastián de Buenavista, sin embargo, solo duró hasta 1550 (Castro et al., 2013).

Posteriormente desde inicios del siglo XX, el departamento de Antioquia estableció políticas de colonialismo interno hacia Urabá, dando continuidad a las prácticas europeas y norteamericanas, así como el establecimiento de grandes explotaciones de recursos naturales por partes de grandes empresas multinacionales como la sociedad alemana bananera llamada Consorcio Albinga, la Compañía del Caucho y posteriormente la United Fruit Company, negando la tierra a los pequeños campesinos y la población fue sometida a estas compañías (Bucheli 2005). Posteriormente en 1935 se estableció el municipio de Necoclí una colonia penal, gracias a sus condiciones favorables, tales como, abundancia de agua, riqueza agrícola por la fertilidad de sus tierras, fácil adquisición de madera apta para construcción, así como ser una importante parada, al ser puerto de la carretera al mar. Esta práctica de ocupación territorial por medio de colonias penales fue ampliamente implementada debido a la abundancia de recursos naturales, pero la tremenda falta de capital, consiguiendo así fuerza de trabajo sin paga, para explotación agrícola o el desarrollo de infraestructura (Horta, 2019).

Entre las posibles causas del inicio del conflicto en la década de 1950, se encuentran la lucha entre los campesinos y los grandes terratenientes, y por lo tanto el Estado, por la tierra, el alza del precio del café y la crisis de la bolsa de Nueva York, así como la influencia de ideas socialistas en la organización de ligas de campesinos, la intervención del partido conservador (Molano, s.f.). El territorio de Urabá jugó un importante papel durante el periodo conocido como La Violencia (1925-1955), al ser el territorio por donde entraban las armas de contrabando para los grupos liberales, y por ser un foco de resistencia y de olas de migraciones de refugiados (Escobar, 2018).

Para las décadas de 1970 a 1990 a los conflictos de los anteriores años, se suman la llegada de nuevos actores, como lo son los grupos guerrilleros comunistas como el ejército popular de liberación (EPL) y las fuerzas armadas revolucionarias de Colombia (FARC) (Bejarano, 1988). La expansión de las compañías agroindustriales nuevamente genera conflictos a través de intimidaciones y actos violentos, como el desalojo de tierras (Bejarano, 1993, en García y Aramburo, 2011).

La década de los 90's fue la más violenta en todo el Urabá, gracias a la reorganización de los grupos armados anteriormente mencionados, a esto se le suma la integración de las Autodefensas Campesinas de Córdoba y Urabá por parte de los hermanos Castaño, los cuales ordenaron múltiples masacres (Verdad abierta, 2016), y libraron una fuerte confrontación contra la EPL y las FARC (Salas 2019)

Negrete (2020), menciona que la región del Urabá ha sido una zona estratégica para muchos grupos armados y el narcotráfico, haciendo presencia en las últimas cuatro décadas, esto debido a sus puertos y litorales, como los alrededores de la APER, a esto se le suman las complejidades traídas por la industria del banano; generando esto cambios en las dinámicas ocupacionales en la zona, ocupando áreas antes pobladas y centros poblados siendo desplazados.

6. Conclusiones y recomendaciones

Existe un vínculo directo entre los procesos que han condicionado los procesos de ocupación histórica del Norte de Urabá, principalmente el conflicto armado, con la producción de sedimentos y las consecuencias sobre los ecosistemas, respondiendo a procesos naturales y antrópicos. Estos procesos a su vez responden a hechos pasados pero que inciden en nuevos procesos; demostrando que existe una sinergia natural entre todos los componentes de los ecosistemas (biológicos, geológicos, antrópicos) como lo es el caso de la APER y se muestra en la figura 12, generando una reacción en cadena entre los procesos y las intervenciones, dando una alta relevancia de planificar y evaluar las decisiones que se

toman para la adecuada conservación y aprovechamiento de los servicios ecosistémicos, considerando los efectos a futuro.

Así mismo solo se debe considerar la variación debido a la intervención antrópica de estos fenómenos, como es el caso de los modelos ART y BQART, también es importante la variación espacial, modelo RUSLE, puesto que la ocupación de la APER cambia según cada zona, siendo unas más conservadas que otras, siendo que las que se encuentran en condiciones más prístinas se vean afectadas por aquellas más intervenidas. En el presente trabajo, se identifica que los cambios en los ecosistemas y sus servicios, derivados del cambio de suelo, tienen una tendencia de retroalimentar los elementos que controlan los cambios en las LULC, procesos que son resultados de la interacción de diferentes niveles de organización del sistema hombre-ambiente, la mezcla de fuerzas conductoras varían con el tiempo y el espacio, según las condiciones específicas del sistema, proponiendo entonces usar sistemas complejos adaptativos y transiciones para abordar el tema.

Este trabajo pretende administrar herramientas derivadas de la geología, en función de la conservación, de manera que los tomadores de decisiones tengan criterios científicos para una mejor administración y manejo de la APER a fin de evitar los procesos que produzcan alguna degradación ambiental.

Finalmente, se recomienda tener en cuenta que la diferencia en las escalas y fuentes en el análisis de las coberturas vegetales se convierten en un factor limitante para la comparación directa en los modelos ART y BQART. Adicionalmente, no fue posible la calibración de los modelos a falta de estaciones hidrológicas en la zona de estudio, lo cual puede afectar los resultados del modelo RUSLE, sin embargo, se encontró que, en comparación con los modelos calibrados por otros autores ampliamente explicados en la discusión, los órdenes de magnitud son similares a los presentado en cuencas de similares características, en las cuencas del río Magdalena. Por lo tanto, los resultados obtenidos, se convierten en una importante herramienta para la planificación ambiental.

Bibliografía

- Aguilera-Díaz, M. M., Bernal-Mattos, C., & Quintero-Puentes, P. (2006). Turismo y desarrollo en el Caribe colombiano. *Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional y Urbana; No. 79*.
- Alkharabsheh, M. M., Alexandridis, T. K., Bilas, G., Misopolinos, N., & Silleos, N. (2013). Impact of land cover change on soil erosion hazard in northern Jordan using remote sensing and GIS. *Procedia Environmental Sciences*, 19, 912-921.
- Bejarano, A. (1988). La violencia regional y sus protagonistas: el caso de Urabá. *Revistas.unal.edu.co*.
- Blanco, J. F., & Castaño, M. C. (2012). Efecto de la conversión del manglar a potrero sobre la densidad y tallas de dos gasterópodos en el delta del río Turbo (golfo de Urabá, Caribe colombiano). *Revista de Biología Tropical*, 60(4), 1707-1719.
- Blanco-Libreros, J. F., Taborda-Marín, A., Amortegui-Torres, V., Arroyave-Rincón, A., Sandoval, A., Estrada, E. A., ... & Narváez, A. V. (2013). Deforestación y sedimentación en los manglares del Golfo de Urabá. Síntesis de los impactos sobre la fauna macrobéntica e íctica en el delta del río Turbo. *Gestión y Ambiente*, 16(2), 19-36.
- Blanco Libreros, J. F. (2016). Cambios globales en los manglares del golfo de Urabá (Colombia): entre la cambiante línea costera y la frontera agropecuaria en expansión.
- Bucheli, M. (2005). Después de la Hojarasca, United Fruit Company en Colombia 1899-2000. Bogotá: Banco de la República/ Universidad de los Andes.
- Butchart, S. H. M. et al. Protecting important sites for biodiversity contributes to meeting global conservation targets. *PLoS One* 7, (2012).
- Chape, S., Harrison, J., Spalding, M. & Lysenko, I. Measuring the extent and effectiveness of protected areas as an indicator for meeting global biodiversity targets. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 360, 443–455 (2005).
- Ceccherini, G., Amezttoy, I., Hernández, C. P. R., & Moreno, C. C. (2015). High-resolution precipitation datasets in South America and West Africa based on satellite-derived rainfall, enhanced vegetation index and digital elevation model. *Remote Sensing*, 7(5), 6454-6488.
- CORPOURABA, 1999. “Inventario de Vertebrados (excluidos Peces) y Vegetación Arbórea de Áreas adyacentes a la Ensenada de Rionegro y Ciénagas La Marimonda y El Salado Necoclí”. Botero, D., Tesis de Grado Universidad Nacional de Colombia. Medellín 1999.
- CORPOURABÁ. 2003. Caracterización y zonificación de los manglares del Golfo de Urabá-departamento de Antioquia. Proyecto Zonificación y Ordenamiento de los manglares de Urabá. Convenio 201671 FONADE-CORPOURABA. Apartadó (Antioquia, Colombia): CORPOURABÁ
- CORPOURABA-DAMA. 2007. Plan de manejo del Distrito de Manejo Integrado (DMI) de la ensenada de Rionegro y las ciénagas La Marimonda y El Salado, municipio de Necoclí, departamento de Antioquia. Bogotá, Colombia
- DE ANTIOQUIA, G. O. B. E. R. N. A. C. I. O. N., DE, S. Y. A. D. P., LA, M. P., & PROTEGIDAS, D. D. A. (2009). CORPORACION PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE DEL URABA CORPOURABA.
- Crofts R, Gordon JE (2015) Geoconservation in protected areas. In: Worboys GL, Lockwood M, Kothari A, Feary S, Pulsford I (eds) Protected area governance and management. ANU Press, Canberra, pp 531–567

- Díaz-Martínez E, Fernández-Martínez E (2015) Geoheritage value: 1, fundamentals and significance (in Spanish). *Cuadernos del Museo Geominero* 18:13–18
- Douglas, I. (1996). The impact of land-use changes, especially logging, shifting cultivation, mining and urbanization on sediment yields in humid tropical Southeast Asia: a review with special reference to Borneo. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences*, 236, 463-472.
- Dunne, T. (1979). Sediment yield and land use in tropical catchments. *Journal of hydrology*, 42(3-4), 281-300.
- Dudley, N. (ed) (2008). *Guidelines for Applying Protected Area Management Categories*. Gland,
- Ganasri, B. P., & Ramesh, H. (2016). Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS-A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*, 7(6), 953-961.
- Gray M (2013) *Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature*, 2nd edn. Wiley-Blackwell, Chichester
- Gray, M., Gordon, J.E., Brown, E.J., 2013. Geodiversity and the ecosystem approach: the contribution of geoscience in delivering integrated environmental management. *Proceedings of the Geologists' Association* 124, 659–673.
- Gómez, J., Montes, N.E., Nivia, Á. & Diederix, H., compilers. 2015b. *Geological Map of Colombia 2015*. Scale 1:1 000 000. *Servi-cio Geológico Colombiano*, 2 sheets. Bogotá.
- Gordon, J. E., & Barron, H. F. (2012). Valuing geodiversity and geoconservation: developing a more strategic ecosystem approach. *Scottish Geographical Journal*, 128(3-4), 278-297.
- Gordon, J. E., Crofts, R., Díaz-Martínez, E., & Woo, K. S. (2018). Enhancing the role of geoconservation in protected area management and nature conservation. *Geoheritage*, 10(2), 191-203.
- Henriques, M. H., dos Reis, R. P., Brilha, J., & Mota, T. (2011). Geoconservation as an emerging geoscience. *Geoheritage*, 3(2), 117-128.
- Hogarth, P.J. (2007). *The biology of mangroves and seagrasses* (No. 2nd Edition). Oxford University Press.
- Horta Gaviria, C. M. *Espacio salvaje y colonización de Urabá, 1840-1960* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín).
- Hubert, B., Rosegrant, M., van Boekel, M.A.J.S., Ortiz, R.A., 2010. The future of food: scenarios for 2050. *Crop Science* 50, S1–S17.
- Jie, C., Jing-Zhang, C., Man-Zhi, T., & Zi-tong, G. (2002). Soil degradation: a global problem endangering sustainable development. *Journal of Geographical Sciences*, 12(2), 243-252.
- Liu JG, Linderman M, Ouyang Z, An L, Yang J, Zhang H. 2001. Ecological degradation in protected areas: the case of Wolong Nature Reserve for Giant Pandas. *Science* 292:98–101
- Lal, R., Logan, T. J., & Fausey, N. R. (1989). Long-term tillage and wheel traffic effects on a poorly drained mollic ochraqualf in northwest Ohio. 2. Infiltrability, surface runoff, sub-surface flow and sediment transport. *Soil and Tillage Research*, 14(4), 359-373
- Margules CR, Pressey RL. 2000. Systematic conservation planning. *Nature* 405: 243–53
- McNeely, J.A. & Miller, K.R., eds. (1984) *National Parks, Conservation and Development: The Role of Protected Areas in Sustaining Society*. Washington DC, USA: Smithsonian Institution Press: 825 pp.

Molano, A. (S.f.). Fragmentos de la historia del conflicto armado (1920-2010). Altocomisionadoparalapaz.gov.co. Disponible en: <http://www.altocomisionadoparalapaz.gov.co/mesadeconversaciones/pdf/fragmentos-de-la-historia-del-conflicto-armado-1920-2010-1447167631-1460380435.pdf>

Montoya, R., Montoya, L., & Anaya, J. (2005). Evaluación de la producción de sedimentos en el río La Miel. *Avances en recursos hidráulicos*. N° 12, 119-134.

Negrete Padilla, K. J. (2020). Analizar el conflicto armado en la región norte del Urabá antioqueño desde 1950 hasta la actualidad (Doctoral dissertation).

Nelson, J.G. & Serafin, R., eds. (1997) *National Parks and Protected Areas: Keystones to Conservation and Sustainable Development*. NATO ASI Series, Ser. G, Ecological Sciences, Volume 40. Berlin, Germany: Springer: 292 pp.

World Map Of the Status Of Human-induced Soil Degradation :An Explanatory Note. In: Oldeman, L.R., Hakkeling, R.T.A., Sombroek, W.G. (Eds.), *ISRIC, Wageningen*.

Pérez, J. (2001). "Estimación del factor de la erosividad de la lluvia en Colombia". Universidad Nacional de Colombia. Tesis de maestría. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Medellín.

Posada, L. (2011). Efecto del cambio de las coberturas del suelo sobre la geomorfología costera en las cuencas de los ríos Acandí y Turbo del Golfo de Urabá. Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Medellín.

Renard, K. G. (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. United States Government Printing.

Restrepo, Juan & Kjerfve, Björn. (2004). *The Pacific and Caribbean Rivers of Colombia: Water Discharge, Sediment Transport and Dissolved Loads*. 10.1007/978-3-662-07060-4_14.

Restrepo, J. D. (2005). *Los sedimentos del río Magdalena: Reflejo de la crisis ambiental*. Medellín Fondo editorial Universidad de EAFIT.

Restrepo, J. D., & Syvitski, J. P. (2006). Assessing the effect of natural controls and land use change on sediment yield in a major Andean river: the Magdalena drainage basin, Colombia. *Ambio: a Journal of the Human Environment*, 35(2), 65-75.

Ricaurte, L. F., Olaya-Rodríguez, M. H., Cepeda-Valencia, J., Lara, D., Arroyave-Suárez, J., Finlayson, C. M., & Palomo, I. (2017). Future impacts of drivers of change on wetland ecosystem services in Colombia. *Global Environmental Change*, 44, 158-169.

Rodrigues, A. S. L. et al. *Global Gap Analysis: Priority Regions for Expanding the Global Protected-Area Network*. *Bioscience* 54, 1092–1100 (2004).

Sala OE, Chapin FS, Armesto JJ, Berlow E, Bloomfield J, et al. 2000. Biodiversity—global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science* 287:1770–74

Salas, G. (2019). *El sur de Córdoba, territorio estratégico para el conflicto armado desde mediados del siglo XX hasta la actualidad*. Tesis de Maestría, Universidad de Córdoba.

Sharples, C. (1995). *Geoconservation in forest management-principles and procedures*. *TASFORESTS-HOBART*-, 7, 37-50.

Shi, Z., Cai, C., Ding, S., Li, Z., Wang, T., & Sun, Z. (2002). "Assesment of erosion risk whit the RUSLE and GIS in the middle and lower reaches of Hanjiang river". *Proccedings of 12th International Soil Conservation*. Beijing: Tsinghua University Press. Beijing.

Simms AD, Woodroffe CD, Jone BG. Application of RUSLE for erosion management in a coastal catchment, southern NSW. <http://ro.uow.edu.au/scipapers/34/2003>.

Syvitski,

J.P.M., 2003. Supply and flux of sediment along hydrological pathways: research for the 21st century. *Glob. Planet.Change*39,1–11.

Syvitski, J. P., Vörösmarty, C. J., Kettner, A. J., & Green, P. (2005). Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *science*, 308(5720), 376-380.

Syvitski, J. P. M.; Vörösmarty, C.; Kettner, A. J.; and Green, P. 2005a. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science* 308:376–380.

Syvitski, J.P.M., Kettner, A.J., 2011. Sediment flux and the anthropocene. *Phil. Trans. R.Soc.*369,957–975.

Támara, N. S., Barrios, M. O., Arcila, H. P., Cardozo, L. M. S., & Alarcón, S. C. A. (2018). Plataforma de avistamiento para tortugas en la playa Bobalito, El lechugal, Necoclí-Antioquia, Utilizando iluminación especial y energía alternativa: propuesta de manejo y conservación. *Revista Sennova: Revista Del Sistema De Ciencia, Tecnología E Innovación*, 85-98.

Trimble SW, Crosson P. 2000. Land use—US soil erosion rates: myth and reality. *Science* 289:248–50

Valiela, I., Bowen, J. L., & York, J. K. (2001). Mangrove Forests: One of the World's Threatened Major Tropical Environments: At least 35% of the area of mangrove forests has been lost in the past two decades, losses that exceed those for tropical rain forests and coral reefs, two other well-known threatened environments. *Bioscience*, 51(10), 807-815.

Verdad abierta. (2016). La guerra que mató la esperanza en Urabá. VerdadAbierta.com.

Vörösmarty, C. J., Meybeck, M., Fekete, B., Sharma, K., Green, P., & Syvitski, J. P. (2003). Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments. *Global and planetary change*, 39(1-2), 169-190.

Vitousek PM, Mooney HA, Lubchenco J, Melillo JM. 1997. Human domination of earth's ecosystems. *Science* 277:494– 99

Walling, D.E., Fang, D., 2003. Recent Trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Glob.Planet.Change*39,111–126.

Woldemariam, G. W., Iguala, A. D., Tekalign, S., & Reddy, R. U. (2018). Spatial modeling of soil erosion risk and its implication for conservation planning: the case of the Gobebe watershed, east Hararghe zone, Ethiopia. *Land*, 7(1), 25.

**ANALISIS MULTI-TEMPORAL DE LA EROSION EN EL AREA PROTEGIDA ENSENADA
DE RIONEGRO (ANTIOQUIA) CON MIRAS A GEOCONSERVACION**

Figuras

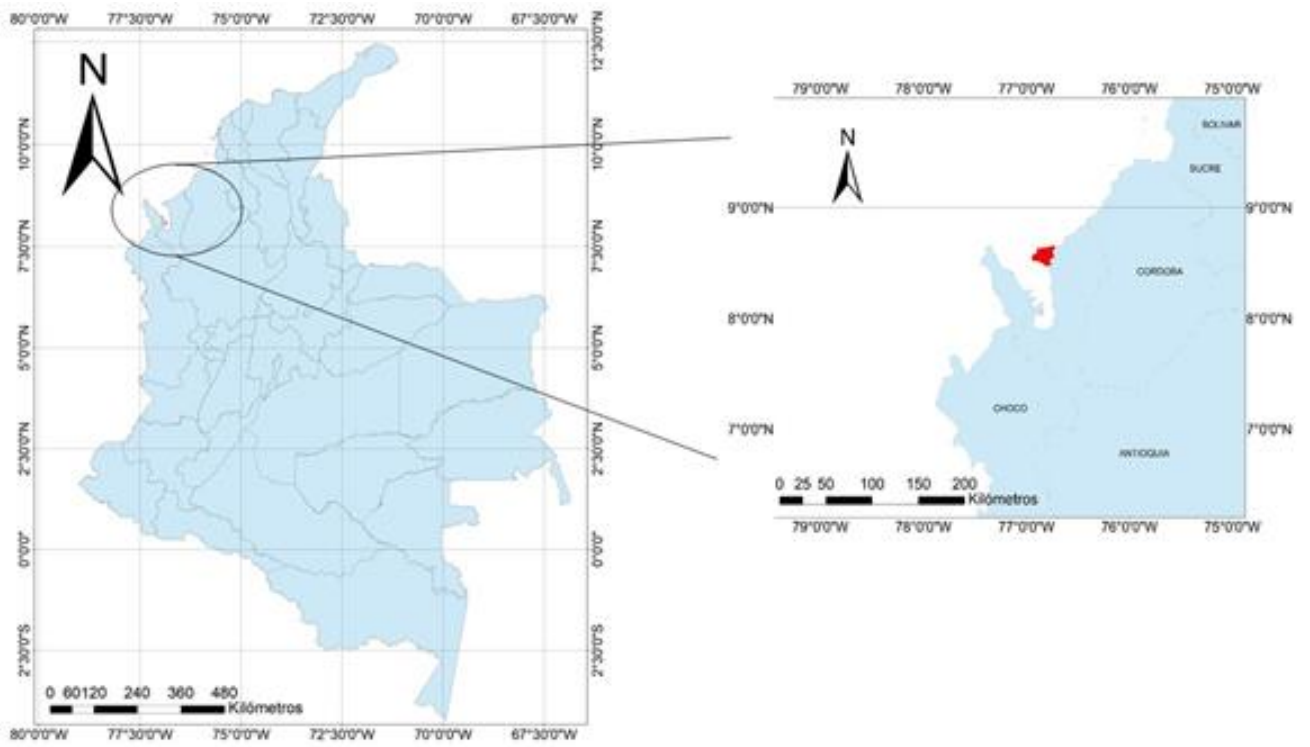


Figura 1. Mapa de ubicación de la APER

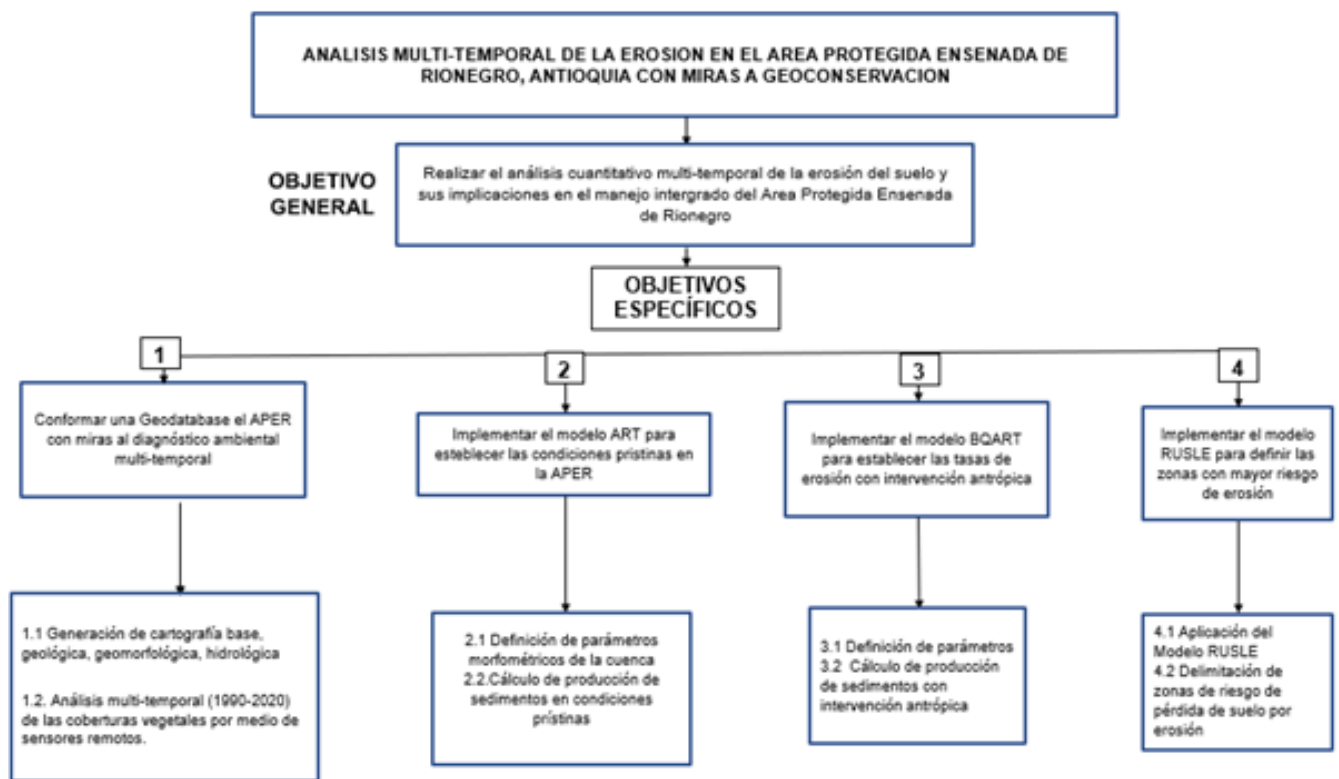


Figura 2. Conceptualización del proyecto con el objetivo general y específicos

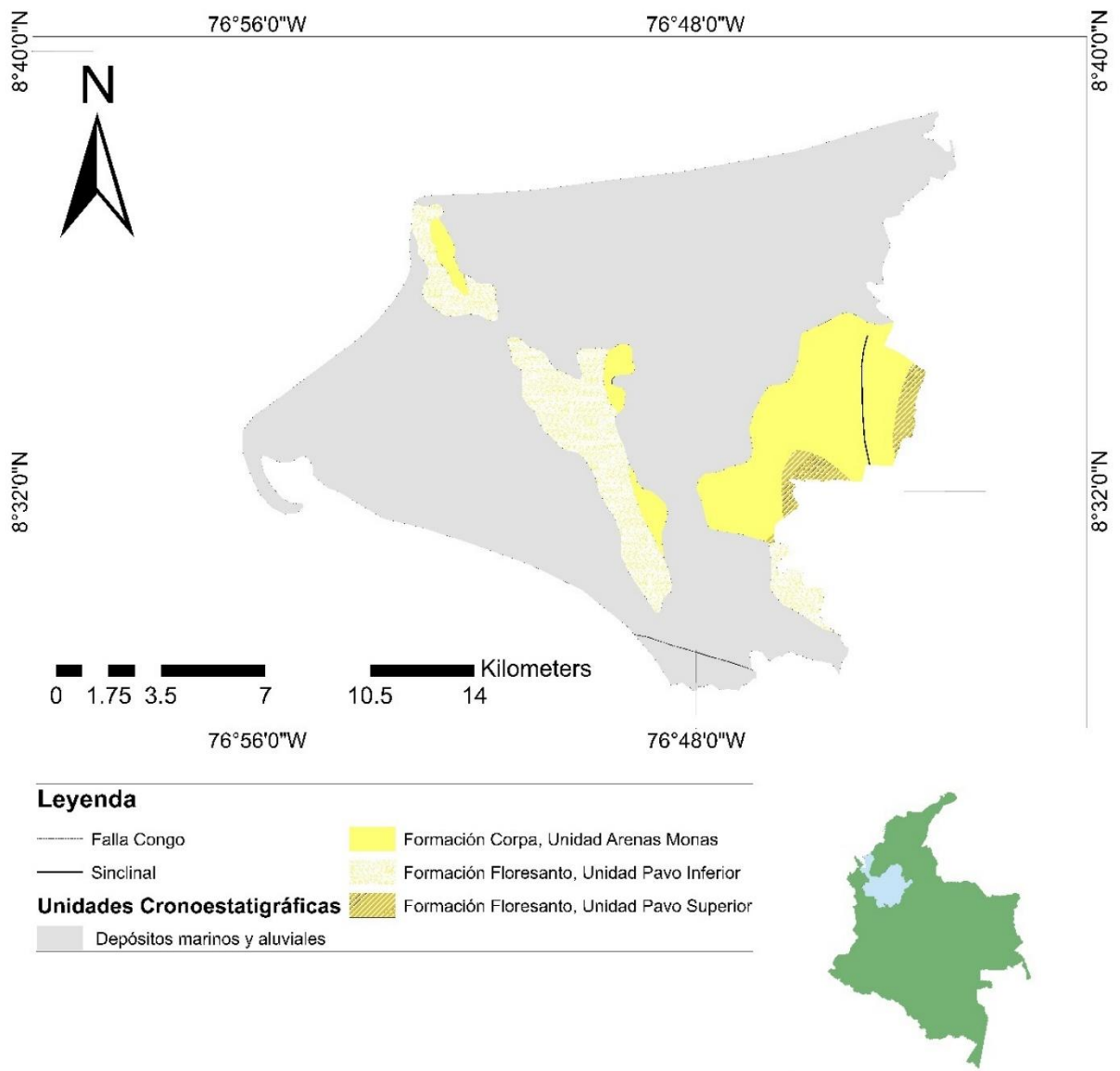


Figura 3. Mapa geológico de la APER modificado de Gómez et al. (2015)

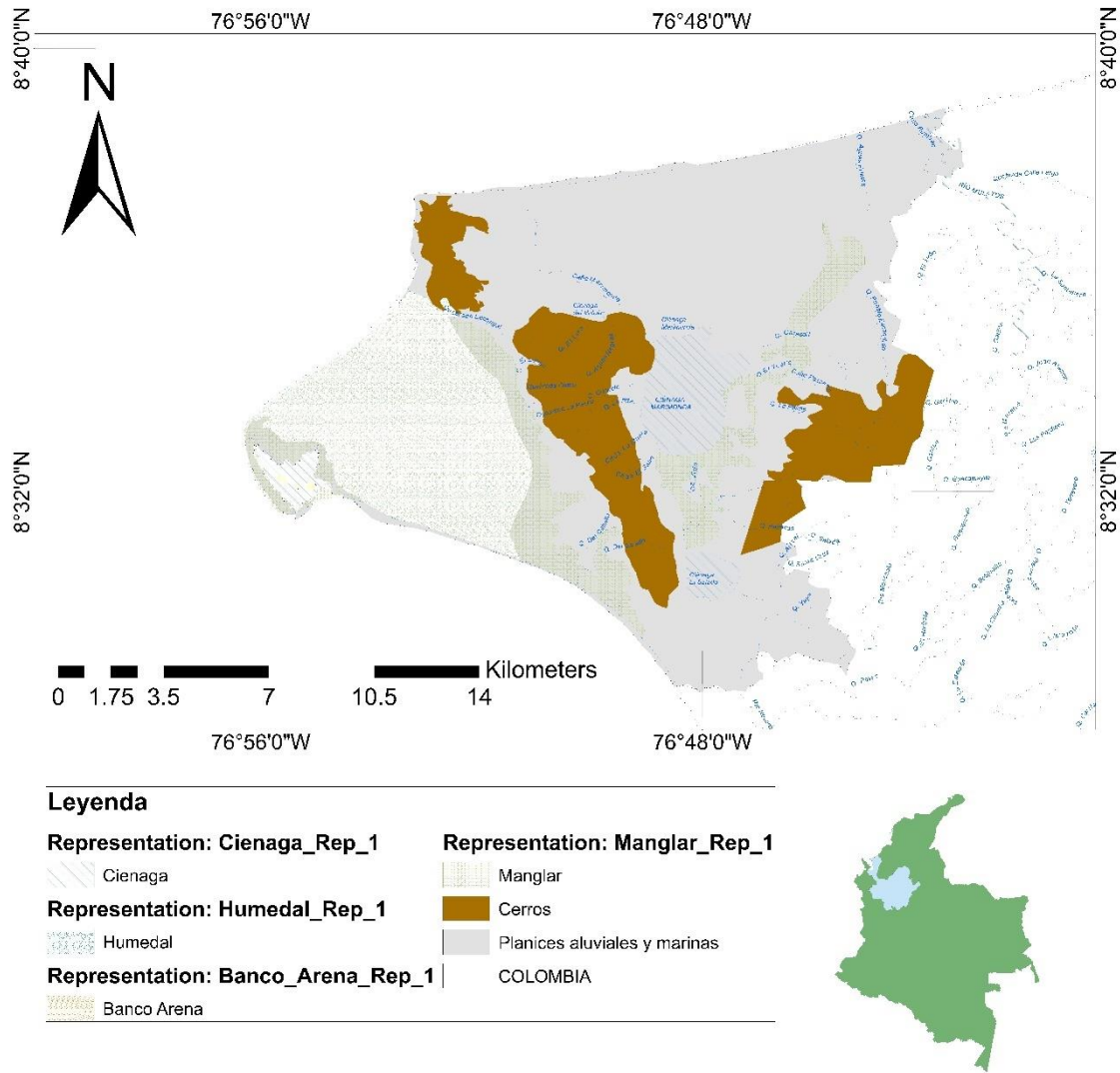
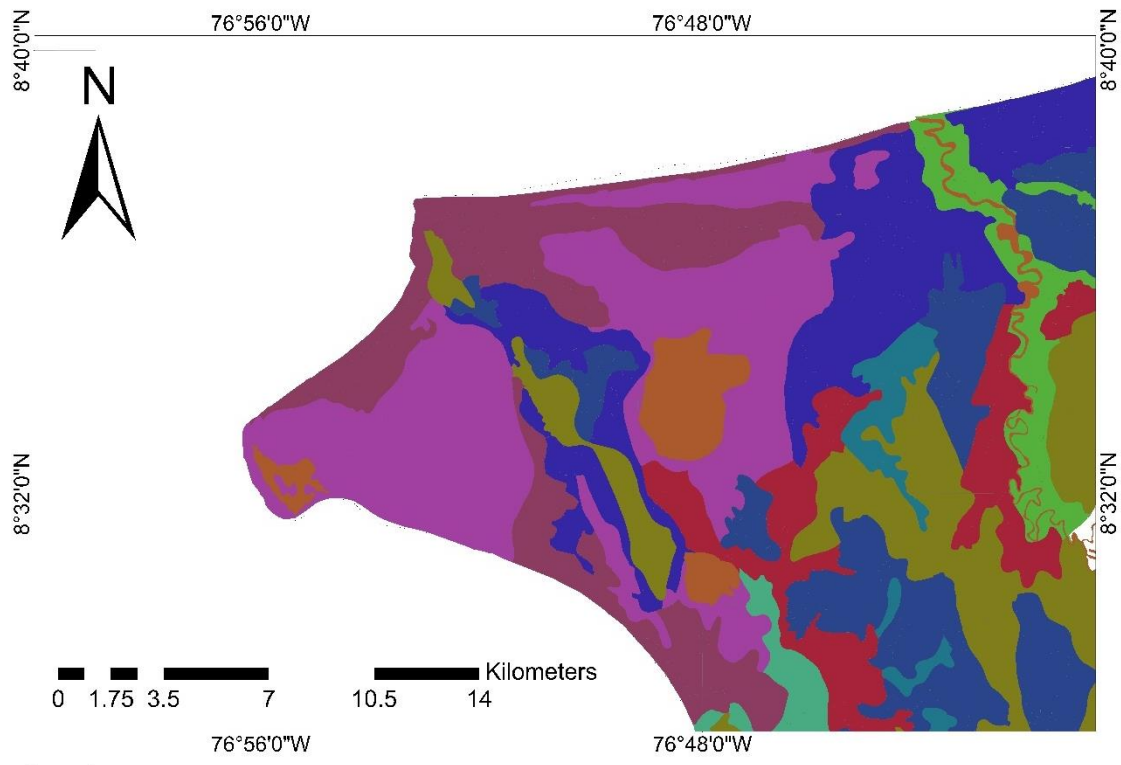


Figura 4. Mapa geomorfológico de la APER.



Leyenda

Suelos

Tipo de suelo

- Aridic Haplustepts, Fluventic Haplustolls, Fluventic Haplustepts, Typic Ustifluvents
- Aridic Ustipsamments, Typic Ustipsamments
- Chromic Haplusterts, Typic Haplusterts, Fluventic Haplustepts
- Fluvaquentic Endoaquepts, Typic Eutrudepts, Aerio Fluvaquents
- Fluventic Dystrudepts, Oxic Dystrudepts, Typic Dystrudepts
- Fluventic Eutrudepts, Typic Udifluvents
- Hemic Haplofibrists, Terric Haplohemists, Thapto Histic Fluvaquents
- N.A.
- Typic Eutrudepts, Typic Dystrudepts, Oxic Dystrudepts
- Typic Eutrudepts, Typic Udorthents, Humic Dystrudepts



Figura 5. Mapa de suelos, IDEAM 2011

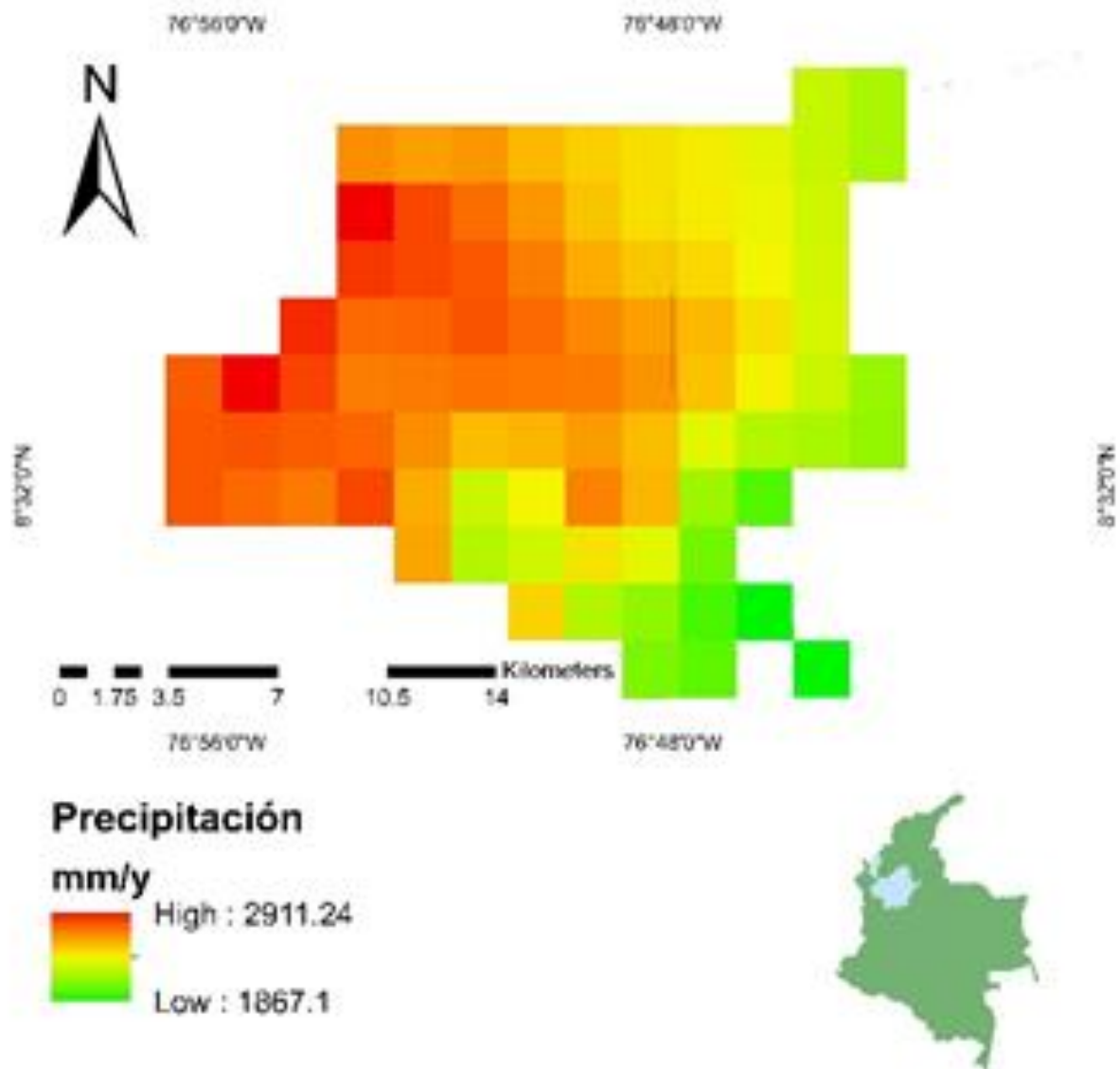


Figura 6. Mapa de precipitaciones de la APER tomado de Ceccherini et al., 2015

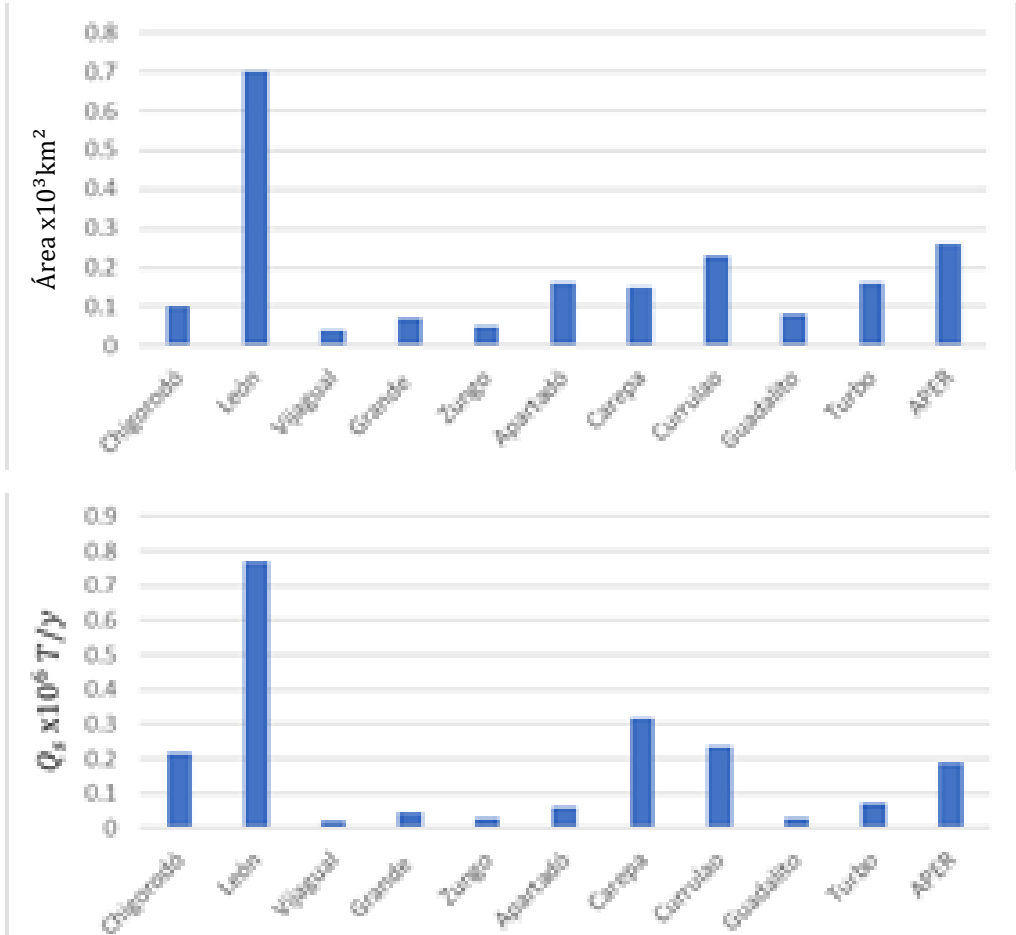


Figura 7a. (Izquierda) Comparación de áreas entre cuencas similares Figura 7b.(derecha) Comparación descarga de sedimentos entre cuencas similares.

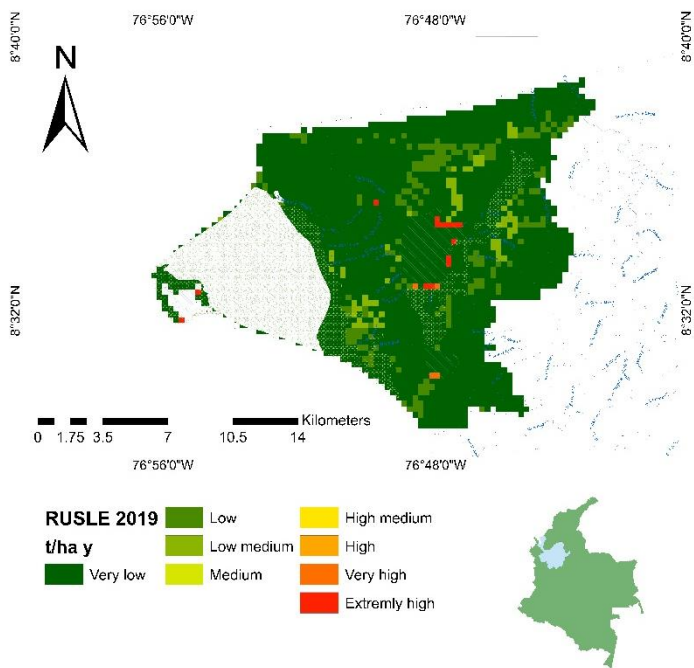
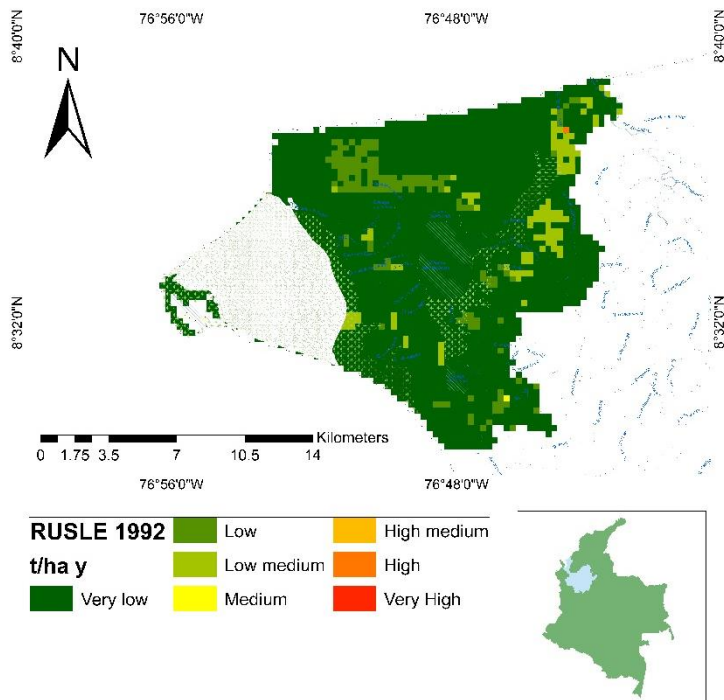


Figura 8a. (Izquierda) RUSLE 1992. Figura 8b (derecha) RUSLE 2019

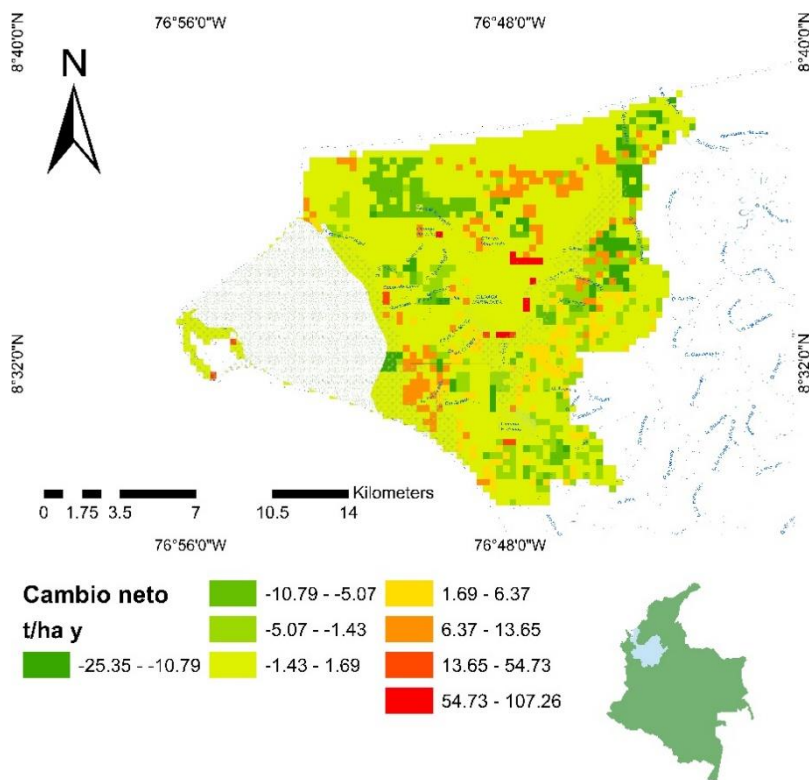
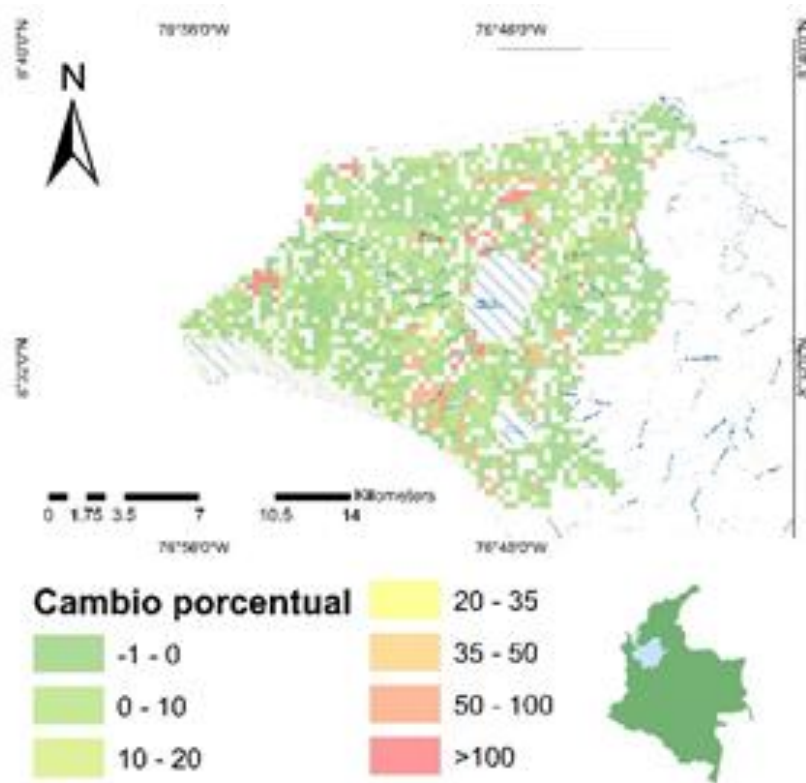


Figura 9a. Matriz de cambio porcentual entre RUSLE 1992 y 2019 Figura 9B. Matriz de cambio NETO entre RUSLE 1992 y 2019

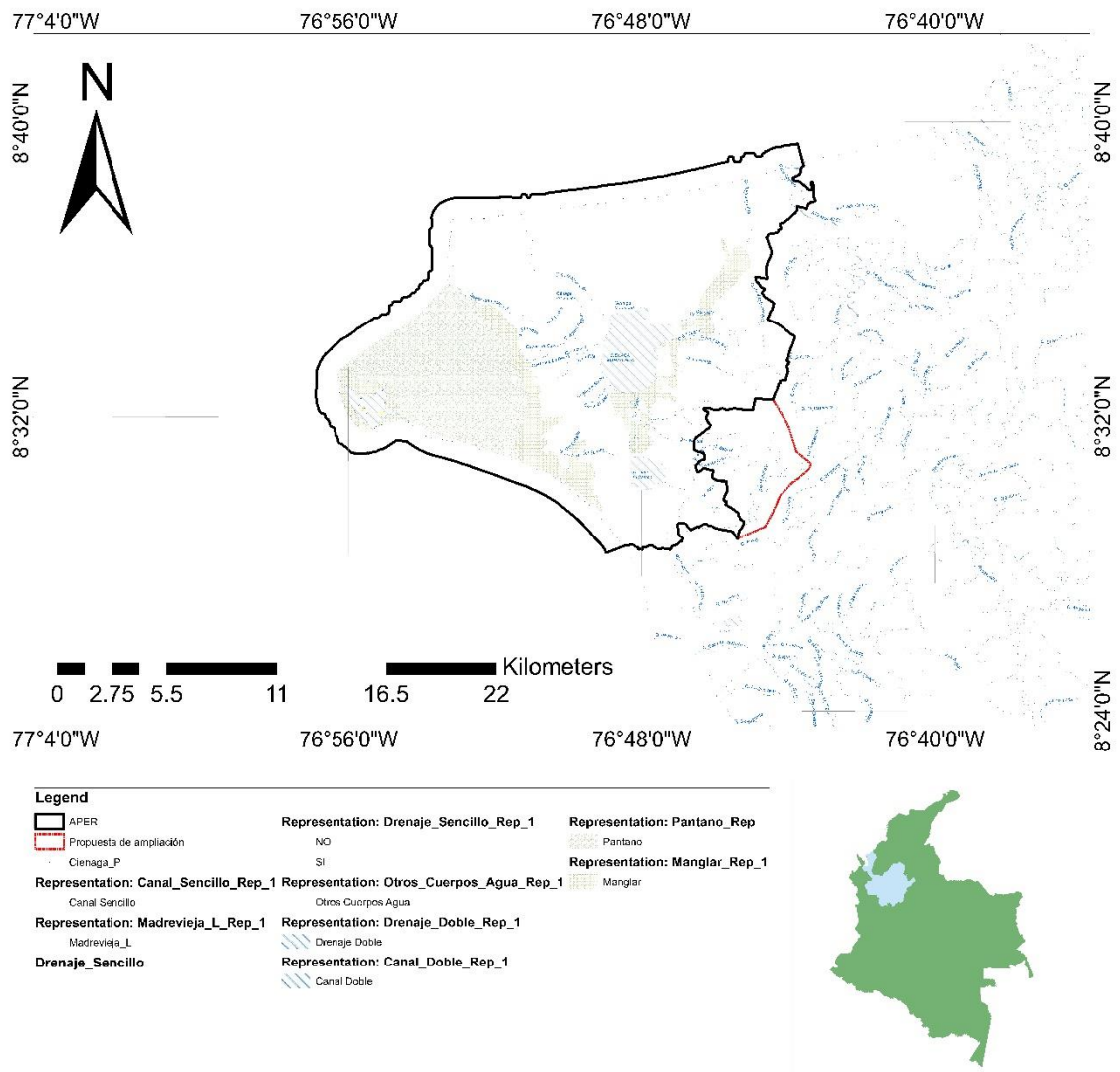


Figura 10. Propuesta de ampliación de la APER

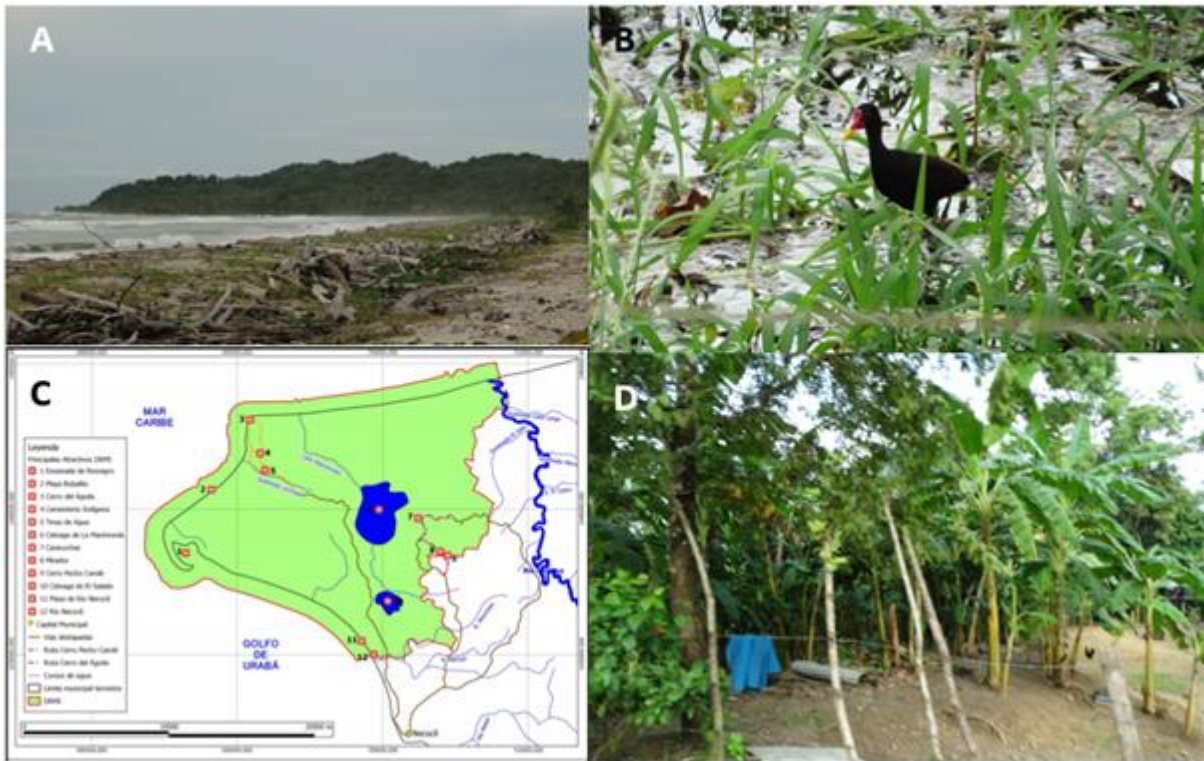


Figura 11. Ejemplo de los vínculos entre geodiversidad, biodiversidad y servicios ecosistémicos en la APER. A. Playa Bobalito, donde desovan varias especies de tortugas marinas y vista al cerro del Águila, uno de los principales atractivos turísticos de la zona, B ciénaga del Salado y una polla de agua, ecosistemas altamente sensibles a los cambios y que prestan muchos servicios ecosistémicos, C, mapa elaborado por Castro et al. (2013), muestra los diferentes puntos ecoturísticos de la APER, D cultivos de plátano en la vereda Marimonda El Cerro, las principales actividades que se llevan a cabo en esta APER son el cultivo de plátano, banano, teca, coco y ganadería extensiva, así como la pesca de diferentes especies.

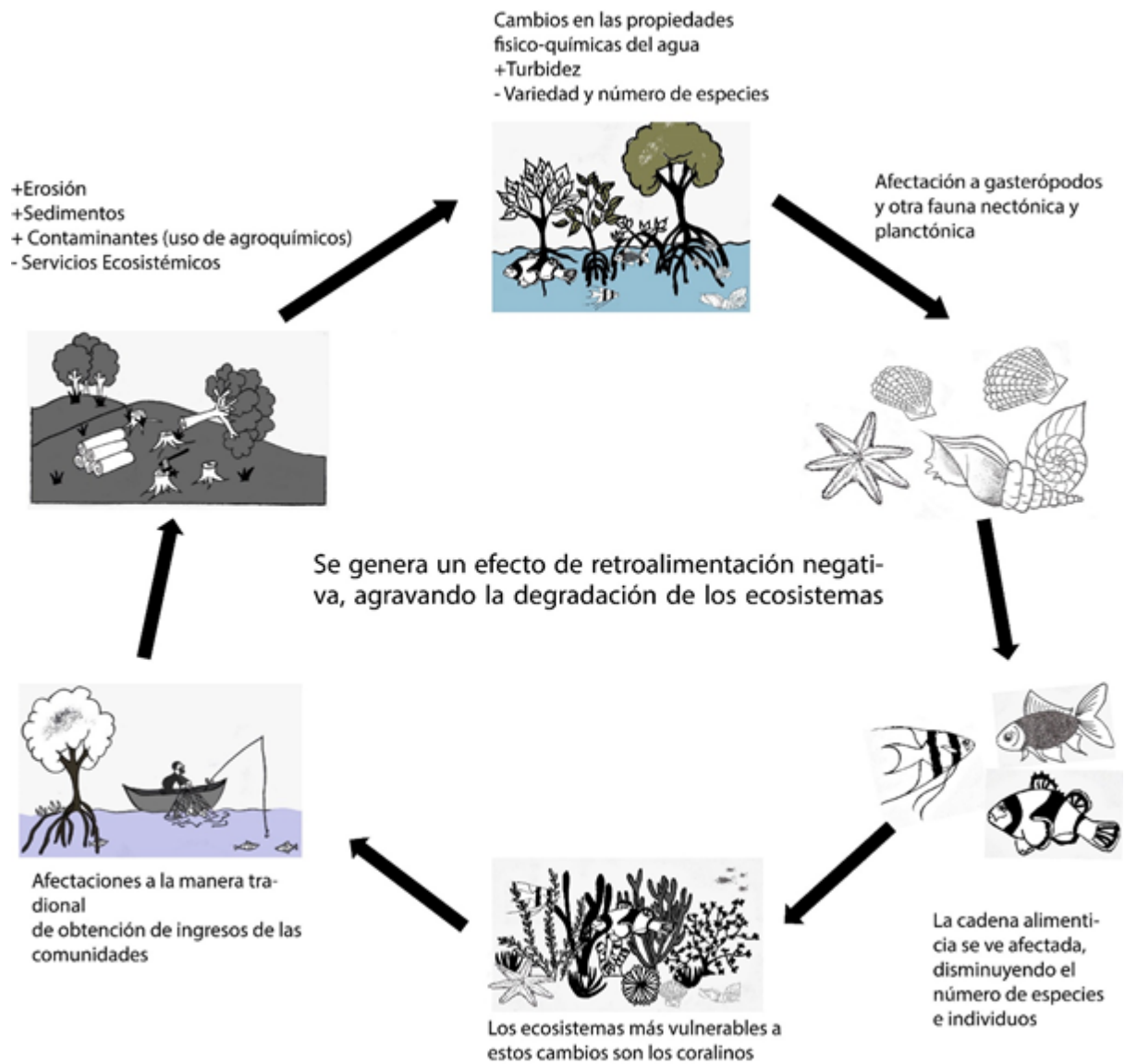


Figura 12. Sinergia entre los ecosistemas y afectaciones sobre éstos por la intervención antrópica y el inadecuado aprovechamiento de los servicios ecosistémicos.

**ANALISIS MULTI-TEMPORAL DE LA EROSION EN EL AREA PROTEGIDA ENSENADA
DE RIONEGRO (ANTIOQUIA) CON MIRAS A GEOCONSERVACION**

Tablas

1	Árboles
2	Agricultura
3	Pastizales
4	Arbustos
5	Vegetación esparcida
6	Humedales
7	Urbano
8	Suelos desnudos
9	Agua
10	Hielo

Tabla 1. Reclasificación de las LULC en nueve categorías.

Global sector	α_3	α_4	α_5	k
Tropics N lat 0-30° N	0.31	0.4	0.66	-0.1

Tabla 2. Coeficientes de regresión para la ecuación

Símbolo	Clases	Texturas	Factor K
L	Livianos a gruesos	*Arenas (excepto arena muy fina) *Arenas francas arcillosas y franco arcillosas con predominancia de agregadas estables > 3 mm de diámetro	0.016
M	Medianos a moderadamente gruesos	*Franco arenosa *Franco arcillo-arenosa	0.033
P	Pesados o finos	*Arcilla arenosa *Arena muy fina *Franco	0.056
MP	Muy pesados o muy finos	*Franco arcillosa *Arcillosa *Franco limoso *Limo *Franco arcillo-limoso *Arcillo-limoso	0.075

Tabla 3. Valores empleados para el factor K, adaptado de León 2001

Cobertura	Factor C
Bosque	0.002
Mangle	0.006
Rastrojo alto	0.006
Rastrojo bajo	0.014
Pastos	0.11
Suelo erosionado	1
Suelo urbanizado	1
Cultivos(básicamente palma, plátano)	0.11
Mosaico pastos, cultivos	0.11
Mosaico pastos, suelo natural	0.014

Tabla 4. Valores para el factor C, adaptado de Shi et al., 2002

Uso	Factor P	Pendiente (%)
Uso agrícola	0.11	0 a 5
	0.12	5 a 10
	0.14	10 a 20
	0.22	20 a 30
	0.31	30 a 50
	0.43	50 a 100
Urbano	0	Todas
Otros usos	1	Todas

Tabla 5. Valores tomados para el factor P, adaptado de Shi et al. (2002)

LULC	1992		2019		relative change
	ha	%	ha	%	ha
Árboles	13968	54.10	12912	50.01	-1056
Agricultur a	4828.8	18.70	517.8	2.01	-4311
Pastizales	19.2	0.07	5201.4	20.15	5182.2
Arbustos	4121.4	15.96	877.8	3.40	-3243.6
Humedale s	1394.4	5.40	4831.8	18.71	3437.4
Agua	1487.4	5.76	1478.4	5.73	-9

Tabla 6. Cambios relativos de coberturas entre 1992 y 2019

Year	1992							Total	Change %
	1	2	3	4	6	9			
2019	1	7236.6	2299.2	4.8	2302.2	715.8	353.4	12912	-7.6%
	2	218.4	201	0	85.2	8.4	4.8	517.8	-89.3%
	3	2737.2	1229.4	0	1033.2	136.2	65.4	5201.4	26990.6%
	4	631.2	107.4	0	40.8	14.4	84	877.8	-78.7%
	6	2265	653.4	14.4	508.2	516	874.8	4831.8	246.5%
	9	879.6	338.4	0	151.8	3.6	105	1478.4	-0.6%
	Total	13968	4828.8	19.2	4121.4	1394.4	1487.4	25819.2	

Tabla 7. Matriz de cambios de cobertura

A $\times 10^3 km^2$	R m	T °C	Pp mm/y	Q_s MT/y
0.26	179	26.99	1913	0.19

Tabla 8. Valores usados para el cálculo de la carga de sedimentos en condiciones prístinas (ART)

Tabla 9. Valores y criterio de selección para los subfactores de la influencia geológica y antropogénica (B)

Factor	Insumo	Valor	Características
I	Mapa Hidrológico	1	Ausencia de masa glaciares en la cuenca
L	Mapa Geológico	2	Cuencas fluviales cuya geología está principalmente compuesto por rocas sedimentarias (formaciones Corpa y Floresanto) o depósitos no consolidados (Depósitos aluviales y marinos)
$1 - T_E$	Mapa Hidrológico	0.1	Se tomó este valor para un escenario donde las masas de agua que se ocupan de capturar los sedimentos han sido secadas o colmatadas
E_{it}	Índice PEA	2	Se asignó debido a que es el valor asignado para un escenario de intervención total, donde existe una alta densidad poblacional pero un bajo ingreso per capita

Tabla 10. Valores usados para el cálculo del caudal y resultados

A	P	E	Θ	Q	Q
$\times 10^3 \text{ km}^2$	mm/y	mm/y	mm/y	m^3/s	km^3/y
0.26	1913	1141.2	771.8	3.01	0.09

Tabla 11. Valores usados para el cálculo de la carga de sedimentos disueltos en un escenario de intervención total y resultados

A	R	T	Omega	Erosión	Litología	$1 - T_E$	E_A	Q	Caudal Q	Q_E	Q_E
km ²	km	°C		Glaciar (I)	Litología			km ³ /y	m ³ /s	Kg/s	MT/y
256.17	0.18	26.99	0.02	1	2	0.1	2	0.09	3.01	7.84	0.25

Tabla 12. Clases de riesgo por pérdida de suelo. Tomado de Woldemariam et al., 2018

Clase de riesgo de erosión	Tasa de erosión (t/ha.y)
Muy bajo	<5
Bajo	5-10
Bajo medio	10-15
Medio	15 -20
Alto medio	20-25
Alto	25-35
Muy alto	35-50
Extremadamente alto	>50

**ANALISIS MULTI-TEMPORAL DE LA EROSION EN EL AREA PROTEGIDA ENSENADA
DE RIONEGRO (ANTIOQUIA) CON MIRAS A GEOCONSERVACION**

Anexos

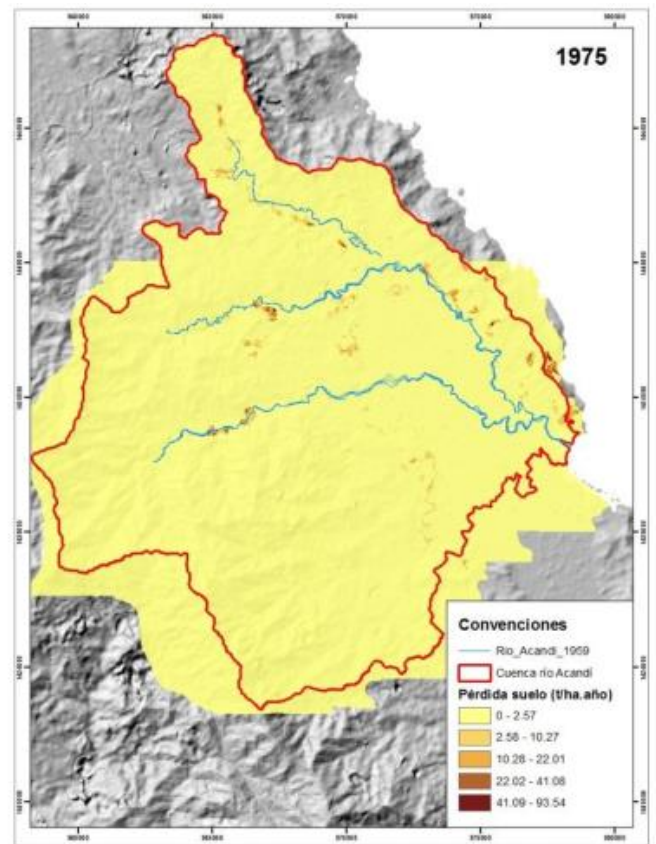
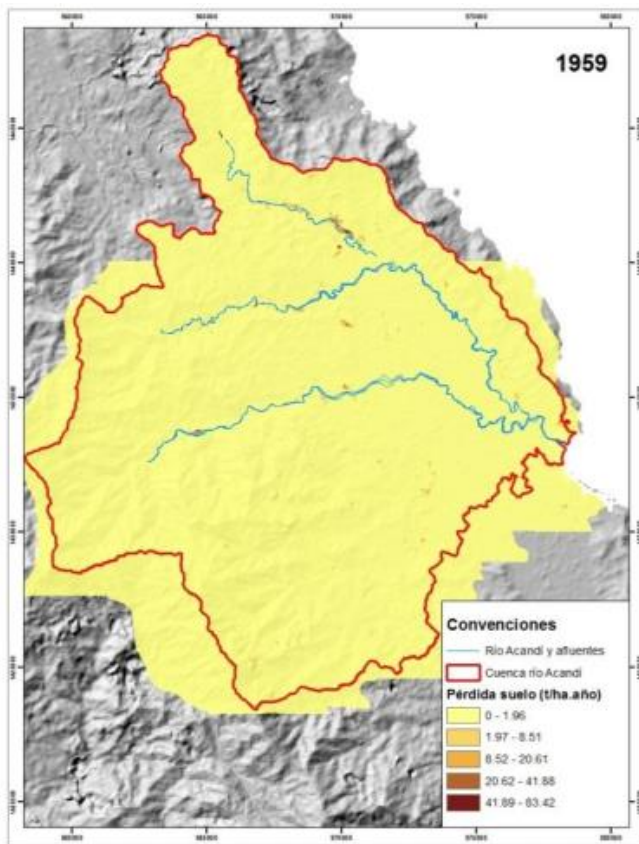


Ilustración 1. Valores de pérdida de suelo según el modelo RUSLE para la cuenca del río Acandí. Posada 2011

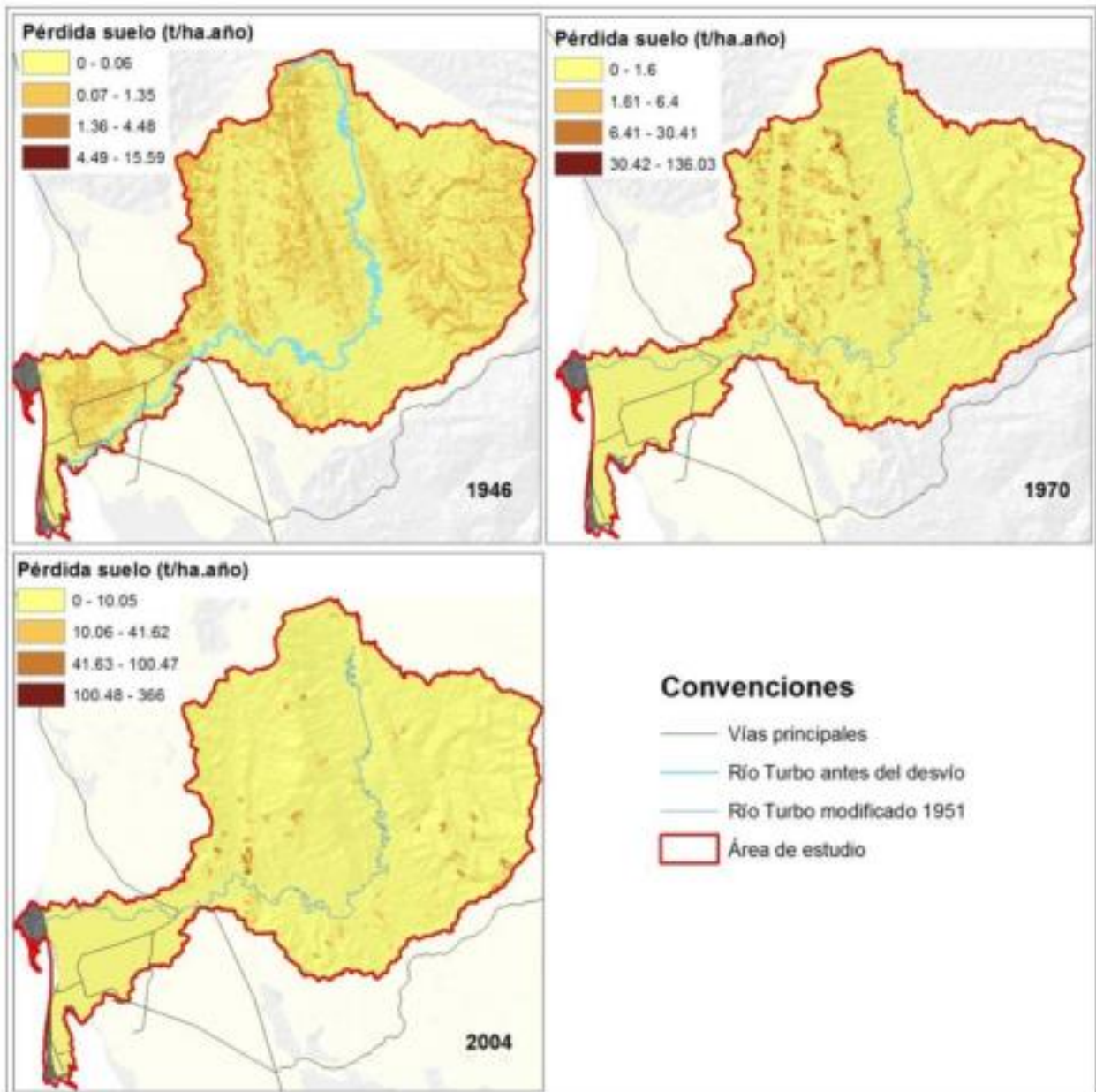


Ilustración 2. Valores de pérdida de suelo según el modelo RUSLE para la cuenca del río Turbo

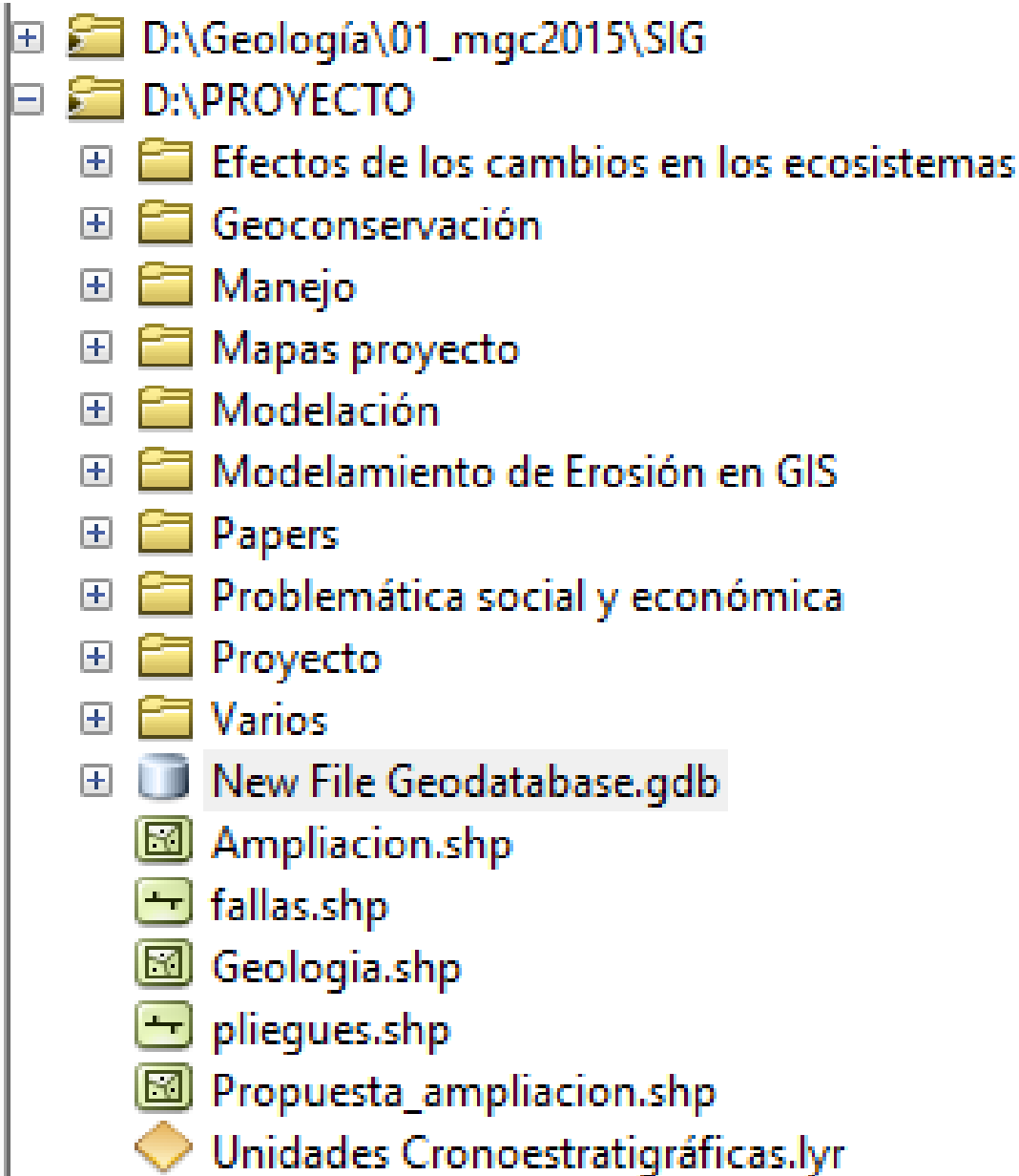


Ilustración 3. Base de datos del proyecto


```
1      %Cálculo caudal ecuaciones Syvitski et al., 2003
2      %ecuaciones 11 y 12
3      function [Q]= Caudal(esco,pp,A) ;
4 -     zeta == pp- esco %ecuacion 11
5 -     Q == zeta/A %ecuacion 12
6 -     end
```

Ilustración 4. Script de cálculo de caudal

```

1 | %2019_03_12 Juan Fernando Zapata Herrera Impacto sobre la naturaleza
2 | function [Q_s]= JFZH_BQART(omega,I,L,T_E,E_h,Q,A,R,T);
3 | %función que calcula la producción de sedimentos con base en valores
4 | %multianuales [Restrepo et al.2015 Anthropocene 10, Eq. 1A; pp 13-28]
5 | %en cuencas cuya temperatura promedio anual sea superior a 2°C.
6 | B = I.*L.*(1-T_E).*E_h
7 | % Ver también [Milliman y Sivitski 2003]
8 | Q_s = omega.*B.*Q.^0.31.*...
9 |     A.^0.5.*R.*T;
10 | end
11 |

```

Ilustración 5. Script de cálculo del BQART

```

8 function [Q_s] = Q_s_PreAntro_tribu_Magda(A,R,T,lat)
9 % Para (lat. 0 a -30 )
10 if T < 0 %región polar
11     alfa_3 = 2e-5
12     alfa_4 = 0.50
13     alfa_5 = 1.50
14     K = 0.1
15 elseif T > 0 & lat > 30 % Temperate N
16     alfa_3 = 6.1e-5
17     alfa_4 = 0.55
18     alfa_5 = 1.12
19     K = 0.07
20 elseif T > 0 & lat <=30 & lat > 0 % Tropic N
21     alfa_3 = 0.31
22     alfa_4 = 0.40
23     alfa_5 = 0.66
24     K = -0.1
25 elseif T > 0 & lat >= -30 & lat <= 0 %Tropic S
26     alfa_3 = 0.57
27     alfa_4 = 0.50
28     alfa_5 = 0.37
29     K = -0.1
30 elseif T > 0 & lat < -30 %Temperate S
31     alfa_3 = 1*e-3
32     alfa_4 = 0.43
33     alfa_5 = 0.6
34     K = 0
35 end
36 Q_s = alfa_3.*A.^(alfa_4).*R.^(alfa_5).*exp(K.*T);
37 end

```

Ilustración 6. Script de cálculo del ART

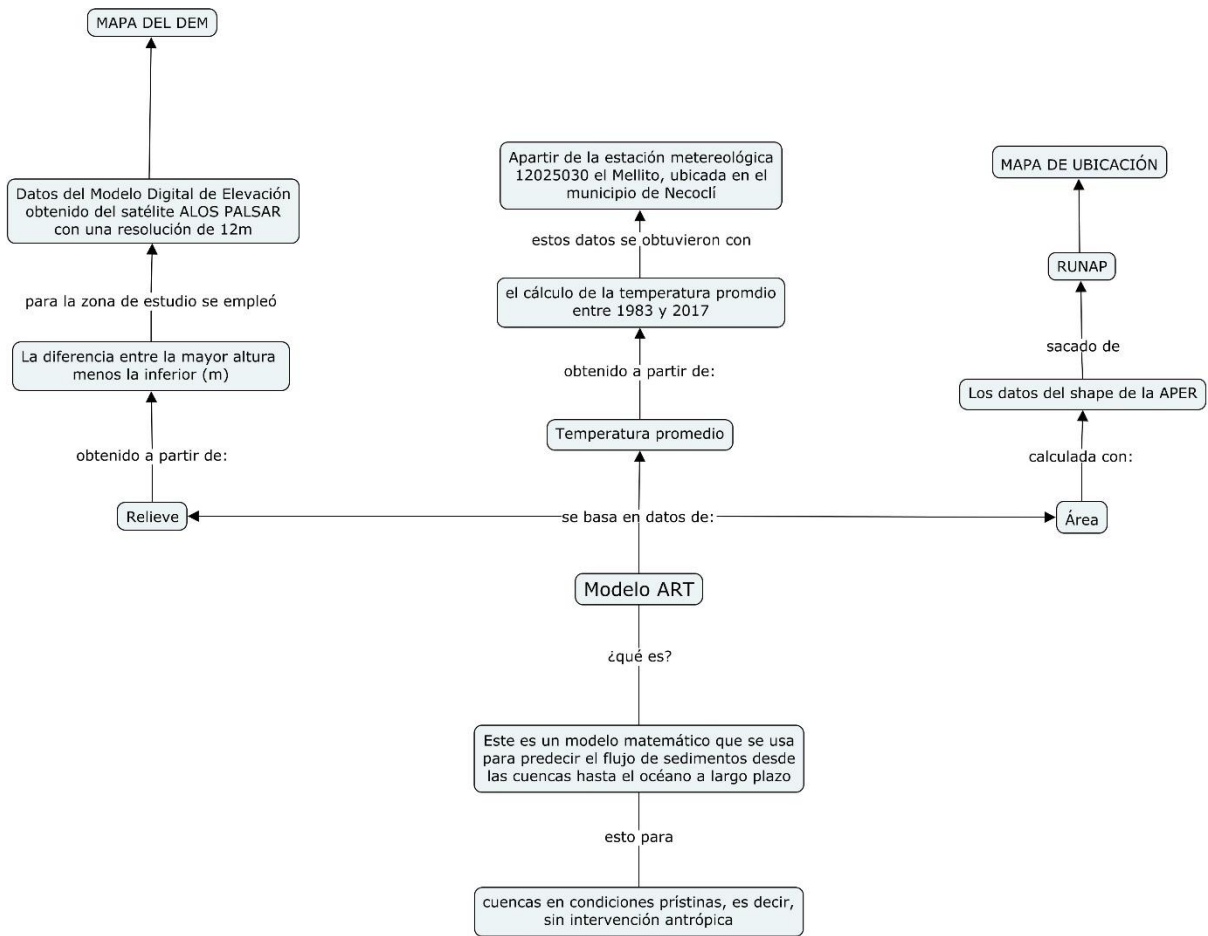


Ilustración 7. Conceptualización modelo ART

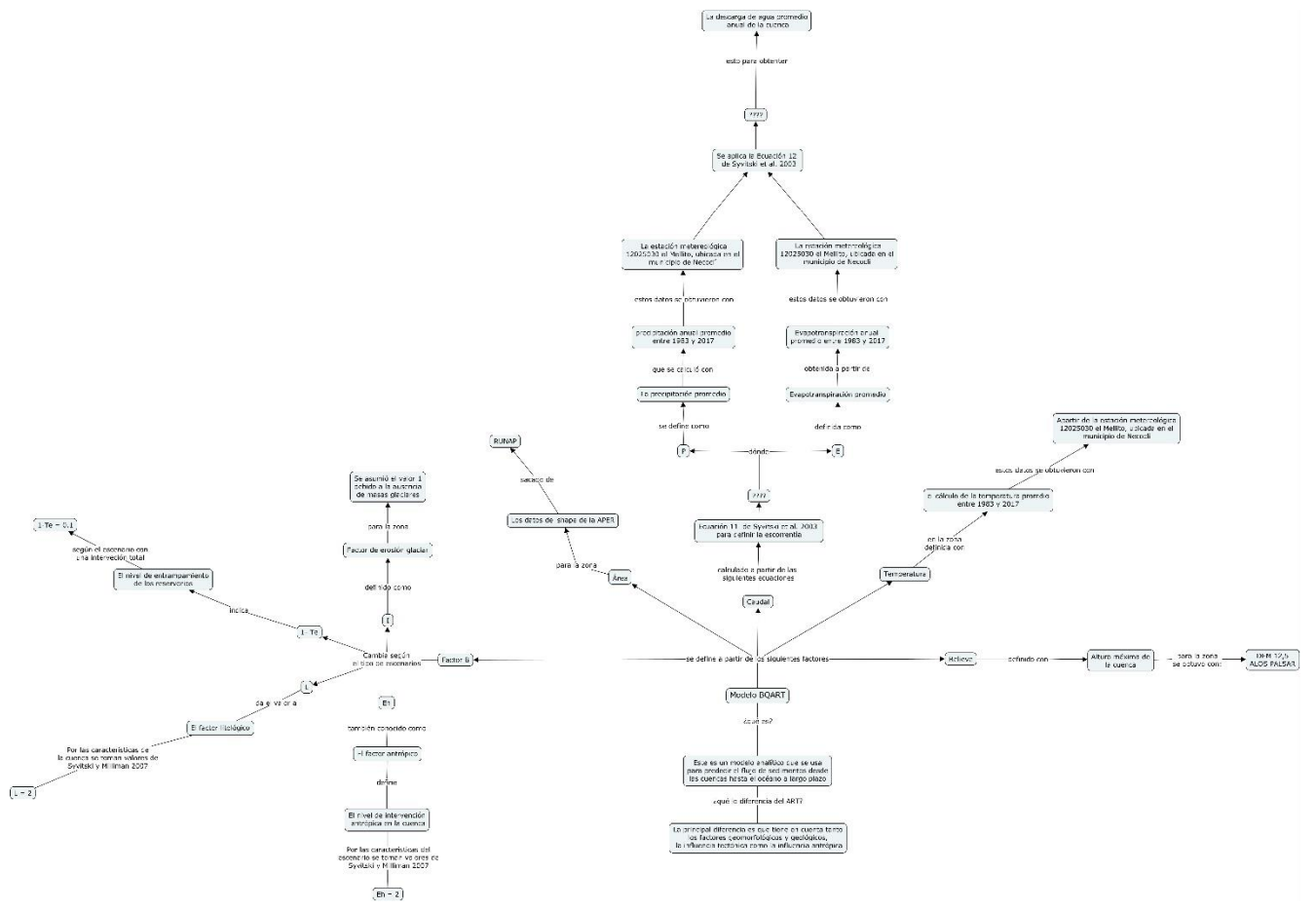


Ilustración 8. Conceptualización modelo BQART

Ilustración 9. Conceptualización modelo RUSLE

