

Universidad Andina Simón Bolívar

Sede Ecuador

Área de Ambiente y Sustentabilidad

Maestría de Investigación en Cambio Climático, Sustentabilidad y Desarrollo

**Cambio de usos de suelo en la cuenca del río Guayllabamba en el
período 1980-2015 y su correlación en los caudales**

Miguel Angel Rosero Clavijo

Tutor: Manuel Bayón Jiménez

Quito, 2025



Cláusula de cesión de derecho de publicación

Yo, Miguel Angel Rosero Clavijo, autor de la tesis intitulada “Cambio de usos de suelo en la cuenca del río Guayllabamba en el período 1980-2015 y su correlación en los caudales”, mediante el presente documento dejo constancia de que la obra es de mi exclusiva autoría y producción, que la he elaborado para cumplir con uno de los requisitos previos para la obtención del título de Magíster en Cambio Climático, Sustentabilidad y Desarrollo en la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador.

1. Cedo a la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador, los derechos exclusivos de reproducción, comunicación pública, distribución y divulgación, durante 36 meses a partir de mi graduación, pudiendo por lo tanto la Universidad, utilizar y usar esta obra por cualquier medio conocido o por conocer, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico. Esta autorización incluye la reproducción total o parcial en los formatos virtual, electrónico, digital, óptico, como usos en red local y en internet.
2. Declaro que en caso de presentarse cualquier reclamación de parte de terceros respecto de los derechos de autor/a de la obra antes referida, yo asumiré toda responsabilidad frente a terceros y a la Universidad.
3. En esta fecha entrego a la Secretaría General, el ejemplar respectivo y sus anexos en formato impreso y digital o electrónico.

28 de septiembre de 2025

Firma: _____

Resumen

La agricultura y el crecimiento de zonas urbanas compiten por espacio con los territorios de bosques y otras áreas naturales, afectando entre otras cosas a los servicios ecosistémicos relacionados con el recurso hídrico, tales como la provisión de agua y la generación de energía hidroeléctrica. A nivel nacional, este último es un tema que ha ganado importancia debido a la problemática climática que se presenta con la escasez de lluvias en ciertas temporadas del año y la consiguiente falta de agua en los embalses de las plantas hidroeléctricas del país. Este trabajo parte desde la hipótesis de la posible correlación entre las variaciones de coberturas y usos del suelo y las tendencias hidrológicas de los cuerpos de agua en el área de estudio. El objetivo es analizar el cambio de coberturas y usos del suelo en una porción de la cuenca del río Guayllabamba mediante el análisis temporal de superficies de la cuenca y de manera paralela revisar registros históricos de datos hidrológicos del río Guayllabamba en el mismo período de tiempo (1980-2015). Asimismo, se busca evaluar las consecuencias de la variabilidad de los regímenes hidrológicos en la producción de energía hidroeléctrica de la central Manduriacu que se encuentra en el cierre de la cuenca a ser estudiada. Los análisis realizados permiten tener una visión de la dinámica de estos elementos, dentro de estos 28 años se tiene un total de 888,02 km² de terrenos degradados, contra 159,21 km² de terrenos recuperados. Se observa una tendencia general de reducción de bosques mientras las superficies agroproductivas van en aumento. Por otro lado, la información hidrológica presenta variaciones leves con pendientes de la línea de tendencia de los datos con valores menores al 1%, por lo que se consideran como poco significativas estadísticamente hablando. En conclusión, se logró establecer las tendencias de la variación de coberturas y usos del suelo, demostrando mayor degradación que recuperación en la cuenca; mientras que en cuanto al nivel del río no se pudo establecer una tendencia representativa debido principalmente a la información con la que se pudo trabajar. Por lo tanto, no se puede establecer una correlación entre los dos fenómenos estudiados para este tiempo y para esta zona.

Palabras clave: cobertura y usos del suelo, nivel hidrológico, degradación de suelos, recuperación de suelos, correlación, tendencias

A mi abuelita Beatriz, porque todo lo que haga siempre va a ser gracias a su amor y a su inspiración.

A mis hermanos Diana y Gabriel, porque todos los días sigo intentando ser la persona que ellos ya creen que soy.

Tabla de contenidos

Figuras y tablas.....	11
Introducción.....	13
Capítulo primero Marco teórico-conceptual.....	17
1. Enfoque y marco conceptual	17
2. Justificación teórica e importancia	18
Capítulo segundo Descripción del área de estudio	21
Capítulo tercero Metodología.....	27
1. Metodología para el análisis de CUS	29
2. Metodología para el análisis hidrológico.....	33
3. Comparación de información geográfica con información hidrológica	34
Capítulo cuarto Análisis de la cobertura y uso del suelo.....	37
1. Información de CUS para cada año de estudio.....	37
2. Análisis de la variación y degradación de CUS entre años	45
3. Variación de CUS en total (1986-2014).....	52
Capítulo quinto Análisis temporal de niveles.....	55
1. Análisis hidrológico por período de estudio.....	56
Capítulo sexto Resultados y discusión	61
1. Comparación de degradación vs variación de nivel por períodos	61
2. Comparación de la degradación CUS acumulada vs nivel medio del río	64
Conclusiones.....	67
Obras citadas.....	71

Figuras y tablas

Figura 1. Área de estudio.....	21
Figura 2. Precipitación media anual	22
Figura 3. Temperatura media anual.....	23
Figura 4. Cobertura y uso del suelo 2018.....	24
Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología de tesis	28
Figura 6. Cobertura y uso de suelo 1986.....	38
Figura 7. Cobertura y uso del suelo 1990.....	39
Figura 8. Cobertura y uso del suelo 1996.....	40
Figura 9. Cobertura y uso del suelo 2000.....	41
Figura 10. Cobertura y uso del suelo 2008.....	42
Figura 11. Cobertura y us del suelo 2014.....	43
Figura 12. Variación de CUS por años.....	44
Figura 13. Mapa de degradación 1986-1990	46
Figura 14. Mapa de degradación 1990-1996	47
Figura 15. Mapa de degradación 1996-2000	48
Figura 16. Mapa de degradación 2000-2008.....	50
Figura 17. Mapa de degradación 2008-2014.....	51
Figura 18. Mapa de degradación 1986-2014.....	53
Figura 19. Red hídrica e información hidrológica disponible	55
Figura 20. Datos de nivel 1986-1990	57
Figura 21. Datos de nivel 1990-1996	57
Figura 22. Datos de nivel 1996-2000	58
Figura 23. Datos de nivel 2000-2008	58
Figura 24. Datos de nivel 2008-2014	59
Figura 25. Datos de nivel 1986-2014	59
Figura 26. Degradación CUS acumulada	65
Figura 27. Nivel medio del río.....	66
Tabla 1 Detalle de Coberturas y usos del suelo en la subcuenca	29
Tabla 2 Análisis de sensibilidad por tipo de CUS	31
Tabla 3 Matriz de degradación por cambio de CUS	32

Tabla 4 Estaciones hidrológicas en el área de estudio.....	33
Tabla 5 Resumen de cambios de CUS 1986-2014	44
Tabla 6 Matriz de degradación 1986-1990.....	45
Tabla 7 Matriz de degradación 1990-1996.....	46
Tabla 8 Matriz de degradación 1996-2000.....	48
Tabla 9 Matriz de degradación 2000-2008.....	49
Tabla 10 Matriz de degradación 2008-2014.....	51
Tabla 11 Matriz de degradación 1986-2014.....	52
Tabla 12 Análisis de datos de estaciones hidrológicas.....	56
Tabla 13 Comparación Variación CUS vs Variación datos hidrológicos	61
Tabla 14 Comparación Degradación CUS acumulada vs Nivel medio de agua	65

Introducción

La pérdida de cobertura vegetal asociada a la agricultura, la ganadería, la tala indiscriminada de árboles y la explotación de recursos naturales en general; con el consiguiente desgaste del suelo y la pérdida de sus capacidades de retención de agua, afecta directa e indirectamente a los cauces de los ríos (Galeana Pizaña, Corona Romero y Ordóñez Díaz 2009, Bosch y Hewlett 1982). La conexión entre los servicios ecosistémicos y las sociedades es directa y es tan antigua como las sociedades mismas. En la época actual tanto individuos, familias y empresas han sabido sustentar su crecimiento económico y productivo en los beneficios que obtienen de la naturaleza, sean estos recursos o servicios como tal (Kosmus, Renner y Ullrich 2012).

La actividad agrícola en el Ecuador representa un alto porcentaje del PIB real nacional, cerrando en el año 2023 con un valor de aproximadamente ocho mil trescientos millones de dólares que equivale al 7% del total anual (EC Ministerio de Producción, Comercio Exterior, Inversiones y Pesca 2024). Por ello, es una actividad que se mantiene en constante crecimiento en todas las regiones del país. Este crecimiento continuo de la actividad agrícola junto con la actividad forestal representa un peligro para las áreas naturales del país cuya importancia ambiental, social y cultural es incommensurable y reconocida internacionalmente (EC Ministerio del Ambiente de Ecuador 2013).

Aterrizando en la problemática de la deforestación y los cambios de uso del suelo (CUS) en la región interandina, Sierra (2013) explica que los cambios asociados al desarrollo social y económico del país vienen acompañados de cambios en los patrones de uso del suelo. Consecuencia de ello, se suscita un incremento en las tasas de deforestación, principalmente por la presión de la frontera agrícola y el crecimiento de las zonas urbanas. Bajocco (2012) explica que los cambios de CUS representan uno de los más importantes generadores de procesos degradantes en el ambiente y es un resultado de la creciente presión humana.

Esto lleva a pensar que es necesario encontrar formas más prácticas para satisfacer las demandas de las sociedades y al mismo tiempo provocar que se conserven y protejan las áreas naturales a nivel de producción y paisaje; áreas que a su vez funcionan como proveedores de recursos naturales y servicios ecosistémicos (Torres et al. 2020). Ha sido ampliamente estudiado y demostrado que los cambios de CUS afectan el nivel de sensibilidad de la tierra hacia la degradación, acelerando regularmente estos procesos.

Entre algunos ejemplos que se puede mencionar en esta correlación están la intensificación de cultivos, produciendo contaminación de los suelos por el incremento del uso de fertilizantes, otro causal es la deforestación causando pérdida de hábitats y biodiversidad. Adicionalmente, se puede considerar el abandono de tierras que pasan a tener vegetación sin manejo alguno y terminan siendo más propensas a incendios y a procesos erosivos del suelo. Asimismo, se tiene el incremento de áreas urbanas que alteran las características de suelos de drenaje para ocasionar alteraciones en el ciclo hidrológico (Bajocco 2012).

Otra consecuencia de estas tendencias de cambio de CUS es la afectación a los servicios ecosistémicos asociados a los bosques. Uno de los servicios ecosistémicos a considerar es la regulación de los caudales en las cuencas hidrográficas, los cuales son de primordial interés para diversas actividades económicas como por ejemplo la hidroelectricidad y la agricultura (Lopez Fabara 2016). Las técnicas deficientes e insostenibles de manejo de la tierra, exceso de cultivos, sobrepastoreo y deforestación someten a una gran tensión a los recursos del agua y del suelo (FAO 2015). Esto se complementa con lo estudiado por Galicia (2014), quien explica que el ciclo hidrológico en bosques y selvas depende de la interacción suelo-planta-atmósfera.

La presencia de cobertura vegetal reduce la energía de la precipitación, favoreciendo así a los procesos de infiltración y escorrentía (Galicia 2014). Por lo tanto, se reconoce que cambios de CUS tienen efectos negativos sobre el ciclo hidrológico, además que puede alterar patrones regionales del clima. Variaciones de la cobertura vegetal en una cuenca tienen un impacto considerable en la generación de caudales; principalmente la pérdida de vegetación boscosa cuyo dosel tiene una alta capacidad de retención de la humedad proveniente de la precipitación, así como retención de la humedad del suelo por su entramado sistema de raíces (Bernal y Prado 2015). Como consecuencia, se tienen incrementos en el corto plazo de los valores de escorrentía superficial y subsuperficial, suficiente para que se presenten mayores caudales de crecida (Valdivieso 2011 y Mendoza 2002).

Por último, Dueñas y Acosta (2018) presentan un estudio de características similares al actual, en el que se evidenciaron pérdidas de cobertura boscosa y herbácea, que fue sustituida por zonas de uso agrícola. Este hecho se equipara a lo desarrollado por Hernández y Salamanca (2019), quienes también constataron en su respectivo estudio, variaciones de algunas coberturas del suelo reemplazadas por zonas urbanas y agrícolas. La conclusión a la que llegan los autores de estos estudios es que sí se puede establecer

que la variación de CUS influye directamente en la generación de escorrentía en la cuenca.

En base a las evidencias previas, el área de estudio dentro de la cuenca del río Guayllabamba fue seleccionada por dos razones principalmente; la primera es que, a nivel hidrológico la parte alta de esta zona provee de agua a poblaciones rurales ubicadas al norte de Quito, así como a la misma ciudad. A su vez, la creciente actividad agrícola que en este espacio ocurre, requiere una gestión del recurso hídrico responsable. Por lo tanto, es importante conocer el estado previo de los ríos, así como las tendencias que manejan, para poder establecer estrategias de manejo y planes a futuro. Esta cuenca hidrográfica es de interés hidroenergético para el país, por lo que toda afectación que ocurra en sus cuerpos de agua afectará directa o indirectamente a la generación de hidroelectricidad. En segundo lugar, como ya se explicó, diversas investigaciones en la cuenca demuestran cambios significativos en las coberturas vegetales y la utilidad de los suelos, por lo que es relevante analizar los patrones de cambio que se están suscitando.

Tras estos antecedentes, se plantean las siguientes preguntas: ¿Cómo se han dado los cambios de cobertura y uso de suelo en el área de estudio? ¿Qué tendencias presentan los valores de caudales en los distintos ríos que se va a analizar por medio de sus registros históricos de estaciones hidrológicas? ¿Qué relaciones se pueden establecer entre los cambios de CUS y la variación de caudal de los ríos? ¿Qué impactos a corto, mediano y largo plazo sobre la central hidroeléctrica Manduriacu, puede tener la alteración de los regímenes de caudales debida a la pérdida de las coberturas vegetales de la cuenca hidrológica?

Este estudio propone como objetivo general analizar el cambio de CUS en una porción de la cuenca del río Guayllabamba mediante el análisis de coberturas y usos del suelo y de manera paralela, revisar registros históricos de nivel de ríos en la cuenca para determinar cómo se interrelacionan ambos fenómenos.

Los objetivos específicos de esta investigación son los siguientes:

- 1) Identificar los patrones de cambio de CUS en el área de estudio para los años a estudiarse.
- 2) Estudiar los registros históricos de niveles del río Guayllabamba.
- 3) Examinar la potencial correlación entre eventos de pérdidas significativas de cobertura vegetal en la cuenca con la variabilidad de los regímenes hidrológicos dentro del período de estudio.

- 4) Evaluar las consecuencias de la variabilidad de los regímenes hidrológicos en la producción de energía hidroeléctrica de la Central de Manduriacu.

El presente trabajo consta de seis capítulos. El primero describe el enfoque cuantitativo del presente estudio, así como la descripción de los temas y conceptos a tratarse. Se presenta también la justificación teórica e importancia de este trabajo en función de la problemática medioambiental, energética y social.

El capítulo segundo explica los detalles geográficos, meteorológicos y sociales de la subcuenca del río Guayllabamba. Se muestra también la información reciente de las características hidrológicas de la subcuenca, así como el estado más cercano a la actualidad de las coberturas y usos que tiene el suelo en el área de estudio.

El capítulo tercero presenta la metodología de trabajo que se manejó en todo el proyecto. La metodología se dividió en dos etapas que están ampliamente explicadas en este capítulo, el análisis de CUS y el análisis hidrológico. Para cada análisis se describen los procesos y fundamentos que se utilizaron.

El capítulo cuarto revisa un estado previo de las coberturas y usos del suelo en la cuenca y el estado más reciente de las mismas. Por medio de este análisis se establecieron tasas de cambio y tendencias.

El capítulo quinto enfatiza en la importancia del recurso hídrico y su presencia en los ecosistemas para mantener un estado saludable de los mismos. Se realiza un diagnóstico sobre el estado del recurso agua en la cuenca por medio del análisis cronológico de datos de niveles del río principal, datos obtenidos de la estación hidrológica correspondiente al río Guayllabamba cerca al cierre de cuenca.

El capítulo sexto evalúa los resultados obtenidos en los dos capítulos anteriores. Se realizó la revisión conjunta de información de cambios de CUS y de los regímenes hidrológicos para el establecimiento de correlaciones entre estos eventos. Complementariamente, se contextualizan los resultados con las repercusiones que podría tener para los intereses de generación hidroeléctrica en la cuenca.

Capítulo primero

Marco teórico-conceptual

1. Enfoque y marco conceptual

Este trabajo presenta una investigación con enfoque cuantitativo en la cual se realiza el análisis geoespacial de una subcuenca hidrográfica y a la vez se hace el análisis temporal de la información hidrológica de la misma subcuenca. El trabajo parte desde la hipótesis de la posible correlación entre las variaciones de superficies de CUS y las tendencias hidrológicas de la red hídrica en el área de estudio.

La revisión bibliográfica previa se puede subdividir en tres grandes grupos que son: Primeramente, estudios previos realizados en la misma cuenca hidrográfica, relacionados a cambios de CUS, variabilidad de caudales, contaminación, percepción social, etc., que permiten manejar un mayor conocimiento del área de estudio. Al mismo tiempo, las experiencias de los autores, plasmadas en sus respectivas investigaciones permiten establecer una metodología más acorde a la realidad de la zona.

En segundo lugar, se manejan diversos estudios acerca de los cambios de uso del suelo y su relación con incrementos en valores de escorrentía y consecuentemente en los caudales de los ríos. La relevancia de estas investigaciones y reportes radica en que permite formar una idea sobre el problema y lo que se puede esperar en una zona de estudio que aparentemente cumpliría con los mismos patrones de cambio de CUS. La intención de este proyecto de investigación se enfoca en el análisis y comprensión de este fenómeno por lo cual es necesario manejar toda la información posible.

Por último, se cuenta con documentos e investigaciones que contienen metodologías de análisis ya establecidas que serán el fundamento técnico del presente estudio. Para esta investigación se realizará una gran cantidad de trabajo con sistemas de información geográfica (SIG), por lo que es importante poder basarse en otros estudios de casos en los que se manejaron objetivos similares.

Entre los conceptos fundamentales para este proyecto de investigación se tienen definiciones hidrológicas como el ciclo del agua y regulación de caudales. Por otra parte, se tratan conceptos ecológicos referentes a los cambios de cobertura de los suelos, esto es necesario conocer para entender las complejas relaciones que se dan en estos sistemas

naturales. Otros aspectos socioambientales relacionados con el cambio climático y las necesidades de las sociedades por explotar los recursos naturales que tienen a disposición, también se deben considerar como relevantes pues son las actividades antropogénicas las que promueven la deforestación y las transformaciones del suelo hacia la agricultura.

2. Justificación teórica e importancia

En la actualidad el Ecuador vive una fuerte crisis energética que representa grandes pérdidas económicas debido al perjuicio sobre los distintos sectores productivos. Esta crisis no es algo que se suscita de la noche a la mañana, es el resultado de malas decisiones tomadas por los gobiernos de turno, la presión sobre los recursos naturales de la creciente población, así como la alta demanda de energía y los problemas que derivan del cambio climático con las variaciones de la temporalidad de las estaciones de lluvia.

En los últimos años se han dado problemas de operación respecto a las plantas hidroeléctricas del país, con casos como los de Coca Codo Sinclair, con la erosión regresiva en el río Quijos y sus daños estructurales. Complementariamente, también están los problemas de dependencia del país en la generación de energía, existiendo una ausencia significativa de otras fuentes de producción que no sea la hidroeléctrica. Esto se potencia con la falta de mantenimiento del parque termoeléctrico y la reducción de la inversión en el sector eléctrico de aproximadamente el 84% en los últimos 6 años según lo establecido en el Plan Maestro de Electricidad (Reyes 2024, párr. 6).

Todo lo mencionado ha puesto al descubierto lo que puede ocurrir en una época de sequías como la que se dio en el mes de abril de 2024, donde gracias a este fenómeno natural las autoridades decidieron realizar racionamientos en la distribución del recurso energético a nivel nacional durante varios días. Para el mes de octubre de 2024 el problema persiste y los racionamientos han alcanzado tiempos de hasta 14 horas por día.

Estudios de esta índole pueden ayudar a realizar una mejor planificación antes de la construcción de obras de infraestructura tan grandes y de tanta relevancia nacional, pues se convierten en una herramienta que brinda un soporte técnico. La regulación de caudales en los cuerpos de agua que alimentan a una hidroeléctrica, así como las tendencias de cambio de coberturas y usos del suelo en la cuenca que comprende a dicho cuerpo de agua son temas que no se pueden dejar de lado antes de la implementación de este tipo de proyectos, así como durante el tiempo en que estas plantas estén operativas.

La importancia dentro del ámbito social del presente estudio radica en que puede convertirse en una herramienta para la gestión social, política y ambiental del recurso hídrico. El área que comprende a la cuenca hidrográfica estudiada sufre la presión de los problemas actuales del cambio climático, así como la sobreexplotación del recurso hídrico para satisfacer las necesidades tanto de generación hidroeléctrica como las propias de las poblaciones aledañas en cuanto a consumo y riego agrícola; por ello es importante analizarla desde la concepción de los territorios hidrosociales. Dentro de esta temática, la cuenca de estudio se puede considerar como una configuración especial de instituciones, flujos de agua, tecnología hidráulica y entorno biofísico que se interrelacionan en torno al control del recurso hídrico (Silva Rodríguez de San Miguel 2019). Dentro de esta superficie convergen actores políticos y sociales, con diversos intereses espaciales, políticos y geográficos. Actualmente, los mayores intereses del recurso hídrico que se encontraron en esta subcuenca son los de generación de energía, riego para agricultura y abastecimiento para poblaciones cercanas. Entre los principales problemas que se pueden encontrar en este territorio hidrosocial están la contaminación del recurso, pérdida de hábitats/especies y también el acaparamiento del agua (Sanchis Ibor y Boelens 2018). Por lo que, entre las soluciones aplicables a este estudio se puede plantear el manejo o control compartido entre instituciones del estado y sociedad, procurando no dejar de lado el aspecto cultural del consumo del agua y buscando una participación más activa y consciente por parte de los habitantes, pues son finalmente los principales beneficiados o perjudicados de la gestión del agua que se pueda tener en la cuenca hidrográfica (Hommes et al. 2019). Proyectos de este tipo permiten que la sociedad pueda empoderarse al ser capaz de manejar la información, sobre todo desde la parte técnica.

Capítulo segundo

Descripción del área de estudio

Para el presente estudio se ha definido como área de influencia a una microcuenca de la subcuenca del río Guayllabamba, la cual pertenece a la cuenca del río Esmeraldas. Esta microcuenca se encuentra al noroccidente de Quito y tiene como punto de cierre la central hidroeléctrica Manduriacu. Cuenta con un área de drenaje de 3103,7 km² y una red hídrica de 567,69 km de longitud. La altitud varía desde los 482 metros sobre el nivel del mar (en adelante, m s. n. m.) al occidente en el cierre de la subcuenca y alcanza los 4633 m s. n. m. en los páramos de la serranía ecuatoriana. En la Figura 1 se presenta un mapa en el que se aprecian el área de estudio, su red hídrica principal, las estaciones hidrológicas que en su interior se encuentran y su ubicación espacial dentro del territorio del Ecuador.

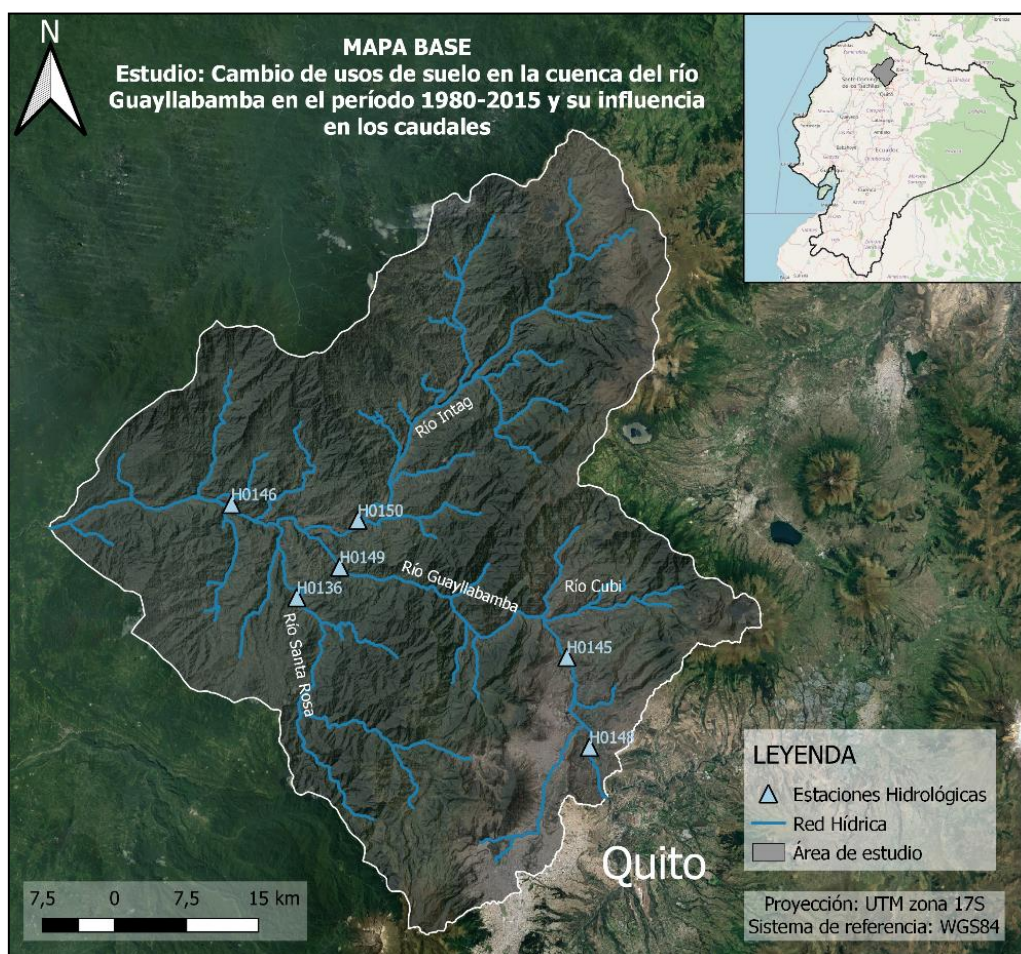


Figura 1. Área de estudio
Fuente y elaboración propias

Continuando con la descripción del área de estudio, en cuanto a características climáticas se puede mencionar que los valores de precipitación en las zonas menos lluviosas varían entre 0 y 500 mm. Esto corresponde a las partes más altas de la cuenca de estudio y los alrededores de la ciudad de Quito. Los valores más altos de precipitación que pueden alcanzar hasta 4000 mm corresponden a la zona occidental de la cuenca, que a su vez es la más baja respecto al nivel del mar, con casi 500 m s. n. m. En la Figura 2, se presenta un mapa de isoyetas correspondiente a la precipitación media anual.

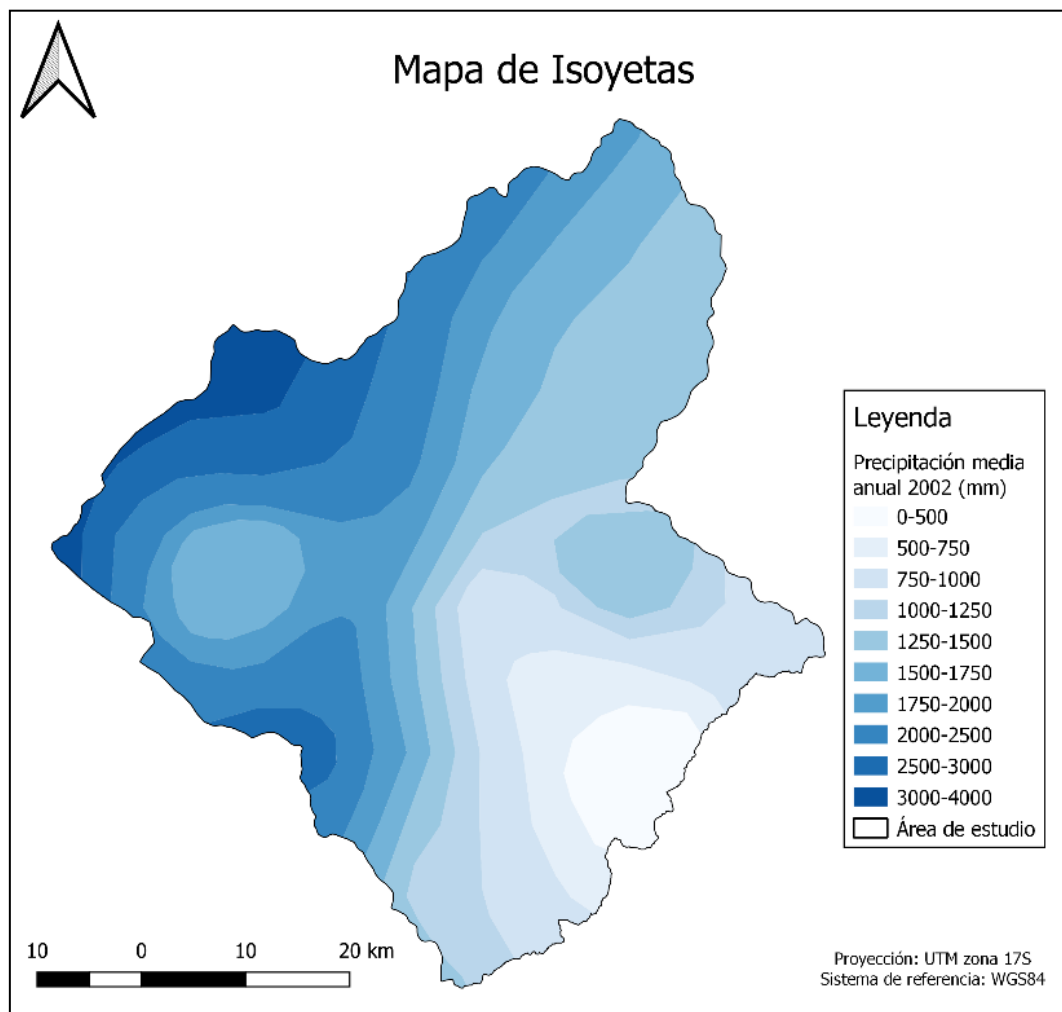


Figura 2. Precipitación media anual
Fuente: EC MAG, 2002. Elaboración propia

A continuación, se presenta la Figura 3 con los rangos de temperatura media anual que se pueden encontrar en la cuenca. Estos rangos se encuentran entre 4 °C y 6 °C para las zonas de montaña al oriente de la cuenca. Se pueden encontrar temperaturas que superan los 22 °C en las partes más bajas y lluviosas de la cuenca, ubicadas al occidente de esta.

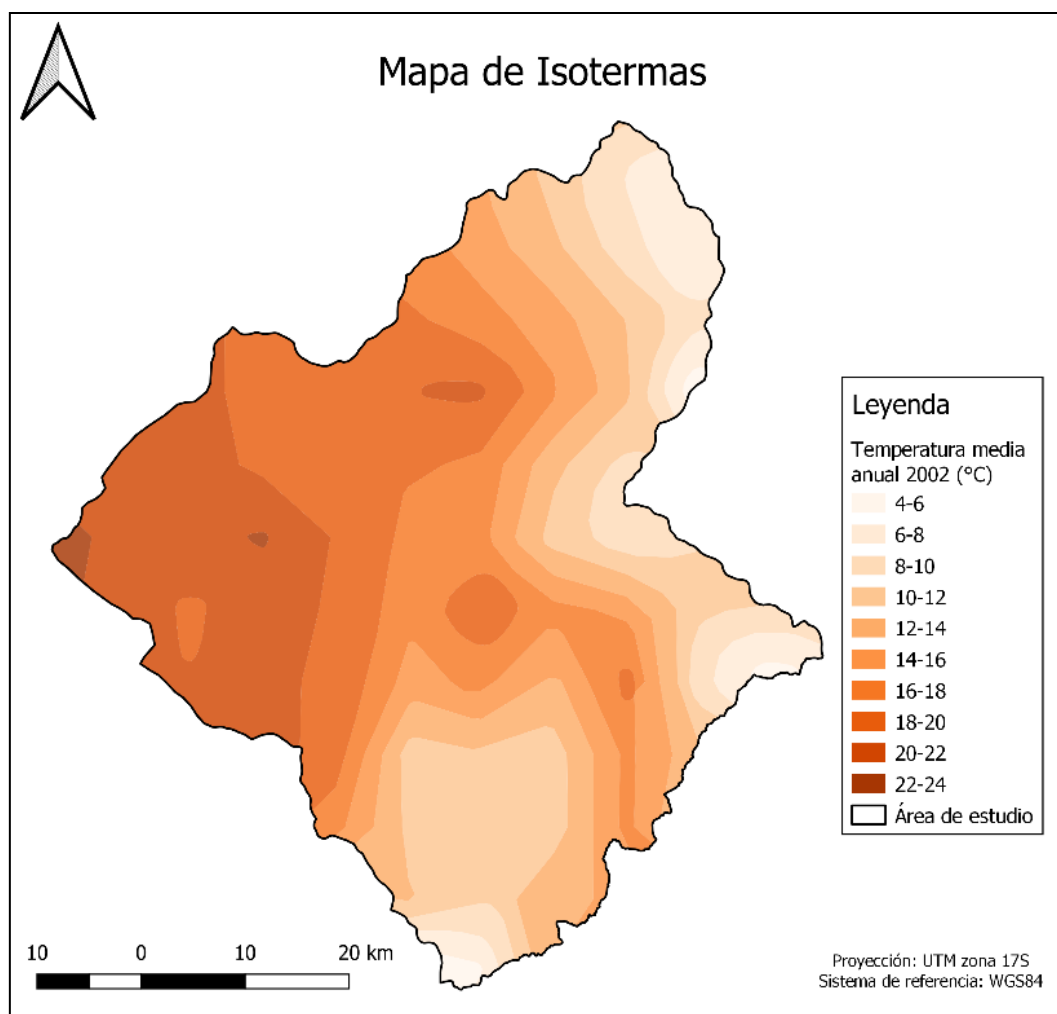


Figura 3. Temperatura media anual
Fuente: EC MAG (2002). Elaboración propia

En cuanto al aspecto social, las actividades económicas principales en la zona son la agricultura, ganadería, silvicultura, pesca y comercio (Logroño Logroño 2018). Dentro de su estudio este autor explica que existirá un aumento de temperatura media anual en la cuenca del río Guayllabamba de entre 0,4 °C y 0,6 °C. Adicionalmente, la precipitación media anual también evidenciará un aumento. Estas variaciones climáticas tendrán como una de sus causantes estas variaciones de cobertura vegetal en la zona, que ineludiblemente afectarán a las localidades cercanas. Esto provocará un aumento de la vulnerabilidad social frente a impactos del cambio climático.

En la cuenca del río Guayllabamba se han realizado una diversidad de estudios referentes a los cambios de cobertura y usos del suelo desde la década del 1980 en adelante. En estos estudios se puede observar el detalle de superficies de CUS que se manejaba en el momento que dicha investigación se realizó; sin embargo, Abad-Auquilla (2020) resume mucha de esta información histórica comparando datos de los años 1987,

2011 y 2017. La autora comenta que se evidencia un crecimiento de casi el 200% de zonas urbanas; por otro lado, bosques y áreas seminaturales presentan una disminución de 64,92% a un 44,34% del total de la cuenca y por último las áreas agrícolas se mantienen en superficie, aunque presentan cambios en su localización o distribución. Por su parte, Buenaño (2007) modelando el cambio de CUS en la cuenca alta del Guayllabamba también advierte que para los períodos estudiados de 1986-2001 y 2001-2010 el ecosistema con mayor área deforestada es el bosque con aproximadamente 30% de pérdida de la cobertura original. En este mismo estudio el autor resalta la importancia de la determinación de tendencias de cambio de las CUS como una herramienta de planificación.

A manera de refuerzo de la información antes mencionada se presenta el mapa de cobertura y uso del suelo del área de estudio para el año 2018 (Figura 4). La información más reciente se la encontró para este año, por lo que se decidió sea la que exponga las características de la cuenca más cercanas a la actualidad.

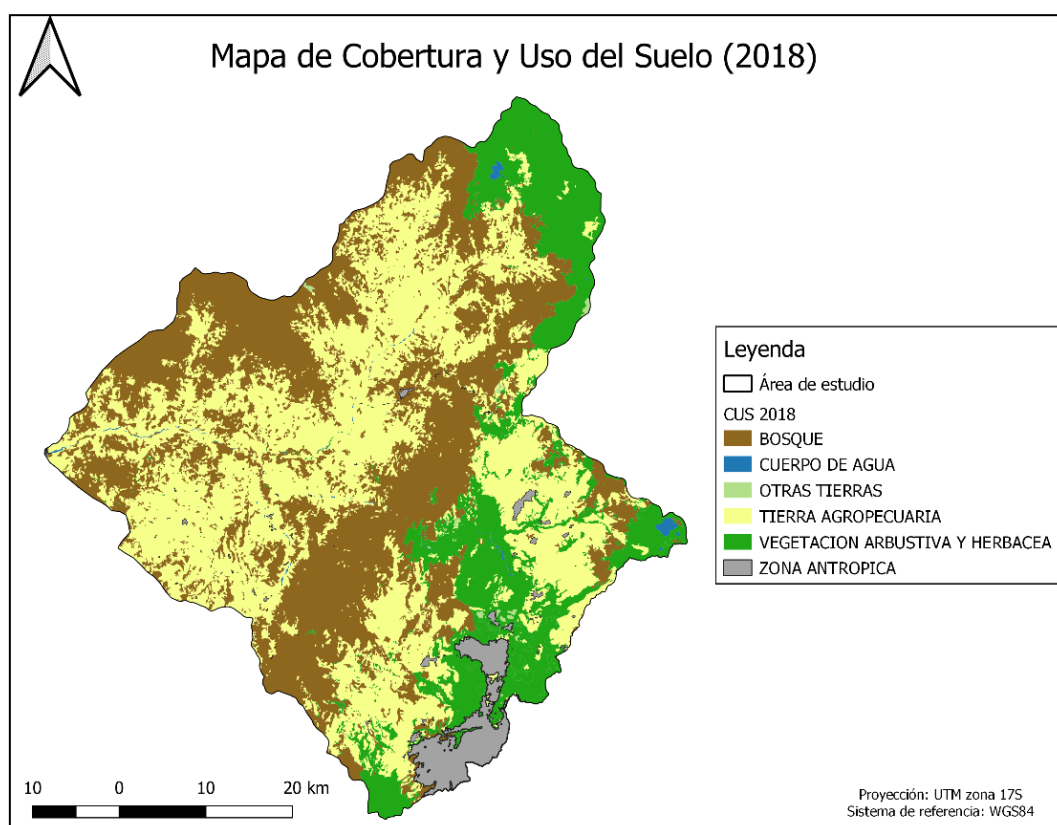


Figura 4. Cobertura y uso del suelo 2018

Fuente: EC MAATE (2019). Elaboración propia

La cobertura predominante para el año 2018 es la de tierras con fines agropecuarios. Este uso del suelo cuenta con una superficie de 1273,61 km², que

representa el 41,06%. El segundo uso del suelo con mayor extensión es el bosque con 1180,77 km², cubriendo el 38,07%. La tercera CUS con mayor superficie son los terrenos con vegetación arbustiva y herbácea con 531,89 km² y un 17,15% de la cobertura total del área de estudio. Esta vegetación se la ubica mayoritariamente en áreas de páramos y bosques montano altos, con especies vegetales tales como arbustos y árboles pequeños. Finalmente, la cobertura de infraestructura de áreas urbanas posee 98,77 km² (3,18%), cubriendo mayormente el norte de la capital ecuatoriana y áreas urbanas en crecimiento como San Antonio de Pichincha.

El análisis social que realiza Logroño Logroño (2018) en su estudio incluye encuestas donde la población muestra su percepción en cuanto a las alteraciones de CUS y también cambios en el clima respecto a décadas pasadas. La población expresa estar consciente de estos cambios en el paisaje, la disminución de bosques, el incremento de áreas agrícolas y alteraciones en el clima que antes no se veían; sin embargo, también expresan que no asocian estos cambios de CUS como causales del clima cambiante.

Capítulo tercero

Metodología

Para dar cumplimiento a los objetivos específicos propuestos este trabajo se dividió en dos etapas. En una primera etapa se realizó el análisis de la información geográfica para poder determinar las variaciones de las coberturas y usos del suelo en el tiempo. Se establecieron períodos de tiempo en base a la información disponible y se obtuvieron las zonas que se degradaron con los años, así como los territorios que se recuperaron.

Para la segunda etapa se estudió la información hidrológica del área de estudio. Se determinó la red hídrica existente, así como sus estaciones hidrológicas en funcionamiento y con información apta para su análisis y procesamiento. Posteriormente, se comparó la información de caudales en los mismos rangos de tiempo que se trabajó la información geográfica, de manera que se pudieran establecer comparaciones de ambos tipos de información y buscar correlaciones entre un fenómeno y otro.

El presente estudio busca ser un refuerzo a la bibliografía ya existente, para conectar la información que se ha trabajado por separado en estudios anteriores. Pues, como se ha expuesto inicialmente, se han realizado estudios solo de cambios de coberturas y usos del terreno o solo de las variaciones en las mediciones hidrológicas en la cuenca del Guayllabamba o en sus subcuencas.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo que expone los diferentes procesos de la presente investigación:

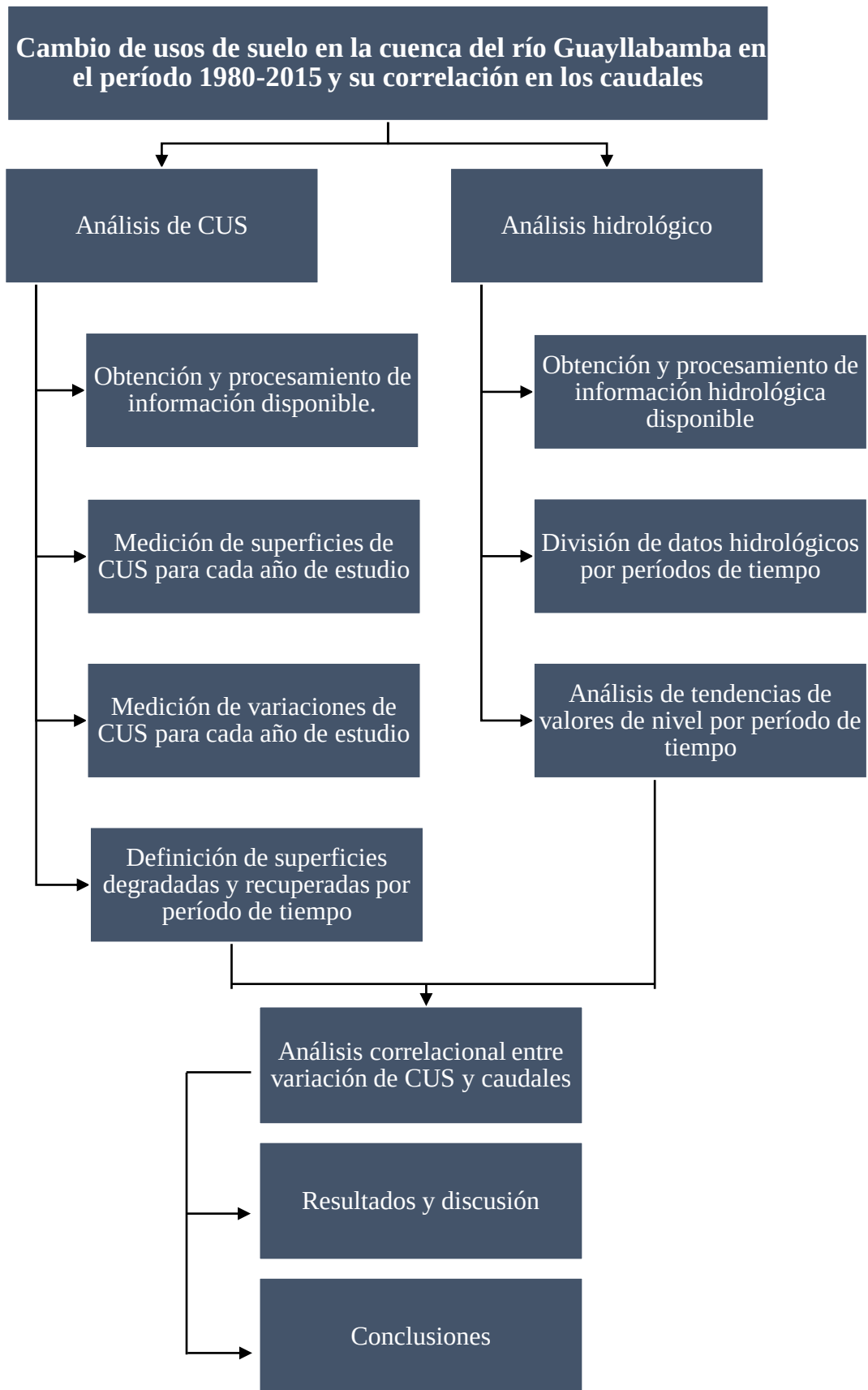


Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología de tesis
Fuente y elaboración propias

1. Metodología para el análisis de CUS

Obtención y procesamiento de información disponible:

El análisis de coberturas y usos del suelo inició con la búsqueda de información disponible en fuentes de información satelital de libre acceso y geoportales de las diferentes entidades que generan información geográfica en el país. Dentro de esta búsqueda cabe mencionar que las imágenes satelitales que se obtuvieron en la zona contenían demasiada nubosidad en los tiempos que se buscó, por lo que no se podía trabajar con esas fotografías. Únicamente se consiguió información de calidad para el año 1996, por lo que la capa de coberturas y uso del suelo de este año se obtuvo de información satelital. El resto de los datos con los cuales partió el análisis de coberturas se obtuvo del geoportal del actual Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (EC MAATE).

En la página web de dicha entidad se obtuvieron archivos en formato vectorial de cobertura y uso del suelo a nivel nacional para los años 1986, 1990, 2000, 2008 y 2014. Esto considerando los años que se encontraban dentro del período a estudiarse. No se pudo realizar el análisis para otros años dentro del tiempo que este trabajo propone; sin embargo, la distancia de tiempo entre un año y otro permite que se realice el análisis por períodos. Por medio de SIG, se obtuvieron las áreas de las diferentes coberturas y usos del suelo de la subcuenca, aplicando procesos de corte de capas vectoriales.

De esta manera, ya se contaba con la información de superficies de las diferentes CUS para todos los años con información disponible.

A continuación, se presentan las coberturas y usos de suelo trabajadas en el área de estudio. Se trabajó con la misma clasificación de coberturas disponible por la fuente EC MAATE):

Tabla 1
Detalle de Coberturas y usos del suelo en la subcuenca

CUS	Descripción
Bosque	Superficies con vegetación arbórea, sin fines productivos. Ecosistemas montanos y bajo-montanos.
Cuerpo de agua	Ríos, riachuelos, lagunas.
Otras tierras	Tierras no productivas pero no poseen vegetación arbórea, arbustiva ni herbácea.
Tierra agropecuaria	Superficies de producción agrícola y ganadera.
Vegetación arbustiva y herbácea	Superficies de ecosistemas montano-altos, climas fríos, mayormente páramos. Áreas mayormente protegidas no productivas.
Zona urbana	Áreas de infraestructura urbana. Ciudades, pueblos, caseríos, carreteras. Vegetación poca o nula.

Fuente: EC MAATE. Elaboración propia

Medición de la variación de CUS para cada año de estudio

Para poder tener la contabilidad de las superficies degradadas en la subcuenca seleccionada, se requería primero cuantificar la variación de una cobertura a otra. Para la obtención de esta información se utilizó el software Quantum GIS (QGIS) para poder transformar los datos de coberturas de cada año inicialmente en formato vectorial a un formato raster que permita la cuantificación por píxeles.

Utilizando la herramienta Semiautomatic Classification Plugin (SCP) del programa QGIS, se pudo contabilizar directamente la cantidad de píxeles que pasaban de una clase de CUS a otra. Lo importante de utilizar esta herramienta es que permite comparar las coberturas de los dos años que conformaban un período de estudio y como resultante entregaba un mapa que representa los píxeles que variaron su CUS. Complementariamente, se obtiene una tabla de resultados con el conteo de los píxeles que se transformaron de una cobertura a otra. Conociendo la resolución del archivo raster se puede multiplicar la superficie de cada píxel por la cantidad de píxeles en una nueva cobertura y uso del suelo para obtener el dato en metros cuadrados o kilómetros cuadrados de la variación de áreas.

Definición de superficies degradadas

Una vez que se conoce la superficie de cambio de las diferentes CUS dentro de cada período, se puede calcular las superficies que se consideran degradadas. Para la determinación de degradación de áreas se trabajó con el Índice Ambiental de Sensibilidad de Áreas (ESAI por sus siglas en inglés). Este índice se basa en los conceptos de sensibilidad ambiental y de degradación, donde el primero se define como la respuesta de un ambiente o parte del mismo, al cambio de uno o más de sus factores externos (Basso 2000). En este caso, la variación de una cobertura de suelo a otra presenta diferentes escalas de sensibilidad en los ambientes afectados. Cuando esta sensibilidad demuestra un perjuicio o deterioro para el estado de salud del ambiente, se lo considera como degradación (Basso 2000).

El ESAI ofrece un análisis en función de muchas variables para poder establecer si existen procesos de degradación en una superficie. Estos análisis engloban cuatro parámetros principales de medición: calidad del suelo, calidad de la vegetación, calidad del clima y calidad en cuanto a manejo y administración de los espacios (Bajocco 2012). Cada uno de estos parámetros de medición se sustenta en el análisis de varios indicadores individuales que posteriormente son procesados matemáticamente para asignar una

valoración de entre 1 y 2 con lo que se puede determinar los procesos de degradación de los suelos. Mientras más cercana es la calificación a 1, representa una menor contribución a la sensibilidad de degradación de un suelo. Por otro lado, el número 2 representa la más alta contribución a la sensibilidad a la degradación (Bajocco 2012).

Para este estudio se ha tomado como referencia el ESAI pero se ha determinado la degradación únicamente tomando como referencia los indicadores individuales que basan su calificación en el tipo de cobertura y uso de suelo que un terreno posee. Meza Mori et al. (2022) en su análisis espacial de la sensibilidad ambiental de áreas y degradación del suelo realizado en Perú presenta un trabajo donde obtiene el ESAI con todos sus parámetros. Dentro de sus parámetros se encuentran los resultados de sus indicadores individuales, los cuales se consideraron como referencia para el análisis actual de degradación según la sensibilidad ambiental de las áreas.

La Tabla 2 detalla la sensibilidad de las diferentes CUS a los cambios de cobertura.

Tabla 2
Análisis de sensibilidad por tipo de CUS

CUS	Sensibilidad a la degradación del suelo según parámetros de ESAI				
	Cobertura de vegetación	Intensidad de agricultura	Protección a la erosión	Resistencia a la sequía	Valoración ESAI
Bosque	Bajo (1)	Bajo (1)	Muy bajo (1)	Muy bajo (1)	1
Cuerpo de agua	Bajo (1)	Bajo (1)	Muy bajo (1)	Muy bajo (1)	1
Otras tierras	Alto (2)	Alto (2)	Alto (2)	Muy alto (2)	2
Tierras agropecuarias	Medio (1,8)	Medio (1,5)	Bajo (1,3)	Alto (1,7)	1,6 → 2
Vegetación Arbustiva y herbácea	Bajo (1)	Medio (1,5)	Medio (1,6)	Medio (1,4)	1,4 → 1
Zona Urbana	Alto (2)	Alto (2)	Alto (2)	Alto (2)	2

Fuente y elaboración propias

Esta información indica que la sensibilidad a la degradación varía directamente en función de la cobertura y uso que tenga una superficie. En este caso, terrenos poco intervenidos o no destinados a la producción, son menos sensibles a la degradación. Por otro lado, tierras intervenidas y dedicadas a ser trabajadas son más propensas a sufrir procesos de degradación en general.

De esta manera, se definió que los cambios de CUS que van de una calificación menor a una mayor de ESAI serán considerados como cambios favorables o recuperados

y los cambios de vayan de una calificación mayor a una menor se considerarán como desfavorables o directamente como degradación.

Un ejemplo de una variación positiva puede ser la conversión de un área antes destinada a tierra agropecuaria hacia una superficie de bosque que se está reforestando. Por su parte, un ejemplo de una variación negativa puede ser el cambio de CUS de vegetación arbustiva a zona urbana. Por lo tanto, se ha manejado la variación de los cambios de CUS en función de su sensibilidad a la degradación del suelo en casos de intervención antropogénica. Se puede resumir el análisis de variaciones favorables y desfavorables de CUS en el siguiente cuadro (Tabla 3). Donde una variación favorable se ha coloreado de verde y una variación desfavorable se ha coloreado de rojo. Para entender el esquema, se debe realizar la lectura de izquierda a derecha.

Tabla 3
Matriz de degradación por cambio de CUS

CUS original	CUS nueva					
	Bosque	Cuerpo de agua	Otras tierras	Tierras agropecuarias	Vegetación Arbustiva	Zona Urbana
Bosque	0	2	2	2	2	2
Cuerpo de agua	2	0	2	2	2	2
Otras tierras	1	2	0	1	1	2
Tierras agropecuarias	1	2	2	0	1	2
Vegetación Arbustiva	1	2	2	2	0	2
Zona Urbana	1	1	1	1	1	0

Fuente y elaboración propias

De igual forma, manejando una calificación similar a los ESAI se han asignado valores entre 0 y 2 a los cambios de CUS. Representando el número 1 los cambios favorables pintados en verde. El número cero representa la no variabilidad de CUS. Dicho de otra forma, el total de píxeles que se mantuvieron en un mismo tipo de cobertura dentro del período de estudio correspondiente. Finalmente, se han representado con el número 2 las superficies ahora consideradas como degradadas dentro de un período de años.

La finalidad de la asignación de estos valores numéricos a las variaciones de CUS, permite reclasificar los píxeles de un archivo raster para que en el mismo se representen en un solo color todos los píxeles que muestran degradación dentro de un período de análisis. Así, se puede elaborar una capa cuya única información son las superficies degradadas, que al colocarla sobre la superficie del primer año del período a ser analizado permite visualizar la degradación entre un año y otro.

2. Metodología para el análisis hidrológico

Obtención de información hidrológica disponible:

La segunda etapa de la presente investigación consistía en analizar información hidrológica del área de estudio. Gracias a información disponible en anuarios hidrológicos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (EC INAMHI) se pudo tabular datos de niveles de las diferentes estaciones hidrológicas que se encontraban dentro de la subcuenca estudiada en este proyecto. La información de datos hidrológicos está disponible inicialmente como valores de nivel de los diferentes ríos de la red hídrica.

De manera general, la relación entre datos de nivel y de caudal en un río es de proporcionalidad directa. Pues cuando el nivel del río baja, representa una menor cantidad de agua que circula por su cauce por lo que se tiene un menor caudal y viceversa. Dentro del cálculo de caudal de un río se utiliza la información de nivel del mismo por lo que para los fines que este estudio requiere, se trabajó directamente con niveles de ríos sin necesidad de calcular los caudales que estos cuerpos de agua puedan tener.

En la Tabla 4 se presenta el listado de las estaciones hidrológicas ubicadas dentro de la subcuenca.

Tabla 4
Estaciones hidrológicas en el área de estudio
Listado de Estaciones Hidrológicas en la subcuenca

Código	Nombre	Río
H0136	Alambi en Churubamba	Alambi
H0145	Guayllabamba aj Cubi	Guayllabamba
H0146	Guayllabamba dj Alambi	Guayllabamba
H0148	Guayllabamba dj Pisque	Guayllabamba
H0149	Guayllabamba en Pte. Chacapata	Guayllabamba
H0150	Intag dj Pamplona	Intag

Fuente: INAMHI Anuarios hidrológicos 1965-2015

Elaboración propia

Como primer resultado de la tabulación y transcripción de datos de nivel de los diferentes ríos de la cuenca, se pudo conocer que estas estaciones poseen demasiados vacíos de información, datos inconsistentes en el tiempo y adicionalmente no se cuenta con una red de estaciones hidrológicas muy amplia en la zona. Para compensar estas falencias de información y evitar perder precisión en los análisis, se trabajó con la información de la estación que tenía la mejor calidad y cantidad de información disponible para el período de estudio.

Las alteraciones hídricas sufridas en los tributarios aguas arriba de una cuenca hidrológica se verán reflejadas en la confluencia de los ríos principales que reciben estas aguas conforme se acercan al cierre de la cuenca. Por lo tanto, se pueden apreciar las tendencias hidrológicas de la cuenca a ser estudiada con la información de la estación hidrológica más cercana al cierre de la cuenca. En este caso se trabajó con la estación H0146 ubicada en el río Guayllabamba, que es afluente de los ríos Junín, Blanco, Intag, y Cubi; por lo que puede reflejar las tendencias de los ríos aportantes en sus datos.

Elaboración de períodos de estudio

Una vez definidos los datos que serán procesados para el análisis temporal hidrológico, se procedió a dividir todo el paquete de datos de nivel en los mismos períodos de tiempo en que se trabajó la información cartográfica. Al dividir los datos hidrológicos en los mismos rangos de tiempo, con los mismos años que las variaciones de CUS, se tiene ya un primer acercamiento a la comparación de ambos fenómenos.

Cálculo de tendencias de valores de niveles de agua por período

Posterior a la clasificación de la información por períodos de estudio, se procedió a calcular la regresión lineal en cada rango. Este cálculo se trabajó con la recta como línea de tendencia, para comprender la tendencia de las variaciones de datos hidrológicos en cada período se tomó como referencia la pendiente de la recta en cada regresión lineal. Al tenerse una pendiente positiva en la fórmula de la recta, se puede apreciar que hay un aumento en las lecturas de datos de nivel conforme avanza el tiempo. Por el contrario, una pendiente con valor negativo expresa un decrecimiento en los valores de nivel en los diferentes cuerpos de agua.

3. Comparación de información geográfica con información hidrológica

Posterior al análisis de cada una de las variables de este estudio, se realizó la comparación de ambos fenómenos en los mismos períodos de tiempo. Por una parte, la variación neta de coberturas y usos del suelo y por otro lado, la variación de la pendiente de la recta de las regresiones lineales en las mediciones de nivel del río.

Para obtener la información de cambios de CUS, se realizó la suma algebraica entre suelos recuperados y suelos degradados. De esta manera, se pudo encontrar si en un período de tiempo estudiado, hubo más degradación de los suelos o si hubo más

superficies recuperadas. Como resultado de la suma algebraica, en cada período quedarían representados con valores negativos los resultados de degradación y con números positivos los resultados de recuperación. Por último, se obtuvo la variación de CUS acumulada. En esta se realizó la adición de los valores de variación de CUS con el del siguiente período, conforme avanza el tiempo (Tabla 13). En función de los datos de variación de CUS, se analizó si la degradación aumentaba o disminuía respecto al período anterior.

La información hidrológica se trabajó de manera similar. Inicialmente, se detalló los valores de las pendientes de la recta para los diferentes períodos. Luego de este primer paso, se procedió a comparar la tendencia de la pendiente respecto al período anterior. Así se pudo conocer si la pendiente aumentaba o disminuía de un período a otro. Por último, se comparó la variación de CUS respecto al período anterior y la pendiente de datos hidrológicos respecto al período anterior. De esta forma, se pudo encontrar si existieron coincidencias en las tendencias de cambio de ambos fenómenos.

Capítulo cuarto

Análisis de la cobertura y uso del suelo

Para realizar el análisis geográfico en el período de tiempo propuesto (1980-2015), se trabajó en función de la información geográfica disponible, con datos de los años 1986, 1990, 1996, 2000, 2008 y 2014. Con estos años se establecieron rangos de tiempo en los cuales se realizaron las comparaciones de cambio de CUS. Por lo tanto, fue posible comparar las superficies de las diferentes coberturas entre un año y el siguiente, y finalmente entre el primer año de información disponible (1986) y el último (2014). Toda la información cartográfica presentada en el presente proyecto se manejó en el Sistema de Referencia de Coordenadas WGS 84 UTM Zona 17s.

Dentro del análisis de CUS, se determinaron las variaciones de superficies entre cada año estudiado. De esta manera se identificaron las tendencias de cambio de las CUS. Asimismo, se pudo determinar las zonas que se consideraron degradadas y se contabilizaron sus áreas para cada período, comparando el deterioro de los suelos entre cada año que compone un período de análisis.

1. Información de CUS para cada año de estudio

A continuación, se presenta la información correspondiente a superficies de CUS para cada año de información disponible:

CUS 1986

En la Figura 5 se puede apreciar el mapa con la distribución de coberturas y usos del suelo para el año 1986. Se observa que el área predominante es el bosque con el 60,46% del total de la subcuenca. Por su parte, la zona urbana ocupa el 0,64% de la superficie del área de estudio. Se puede observar que la segunda superficie con mayor presencia corresponde a la vegetación arbustiva y herbácea, que dentro de este análisis cubre en su mayoría ecosistemas de páramo en las zonas más altas de la subcuenca estudiada.

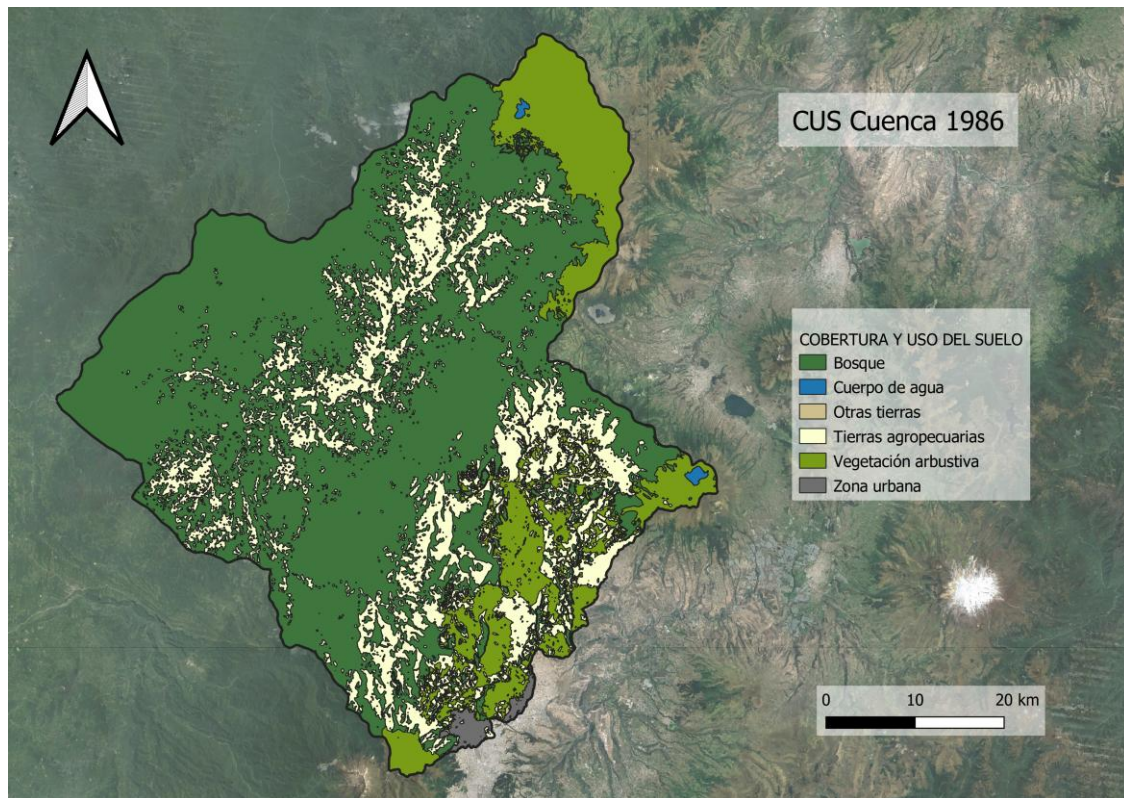


Figura 6. Cobertura y uso de suelo 1986
Fuente y elaboración propias

CUS 1990

La distribución de CUS cambia significativamente luego de cuatro años en la subcuenca (Figura 6). La superficie que adquiere mayor relevancia es la de tierras agrícolas, ya que presenta un incremento del 168,31%. Anteriormente cubría una superficie de 726,77 km² en el año 1986, para el año 1990 abarca un área de 1223,23 km². La cobertura de bosque presenta una pérdida de 469,25 km², de manera similar las superficies de vegetación arbustiva y herbácea presentan una reducción de 36,55 km². Por último, el resto de las coberturas muestran áreas semejantes a las del año 1986.

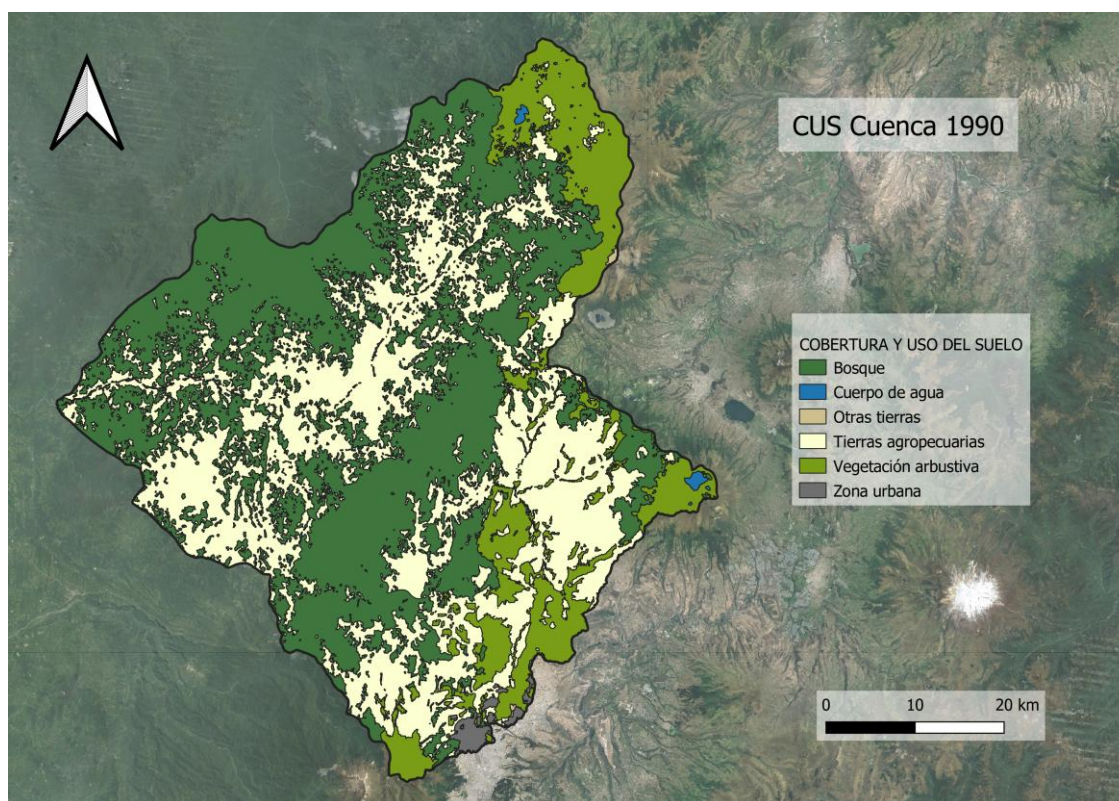


Figura 7. Cobertura y uso del suelo 1990
Fuente y elaboración propias

Al comparar los dos mapas se puede observar que el incremento de tierras agrícolas se da alrededor de los cuerpos de agua, sobretodo de los ríos Intag, Santa Rosa y Cubi. La tendencia de crecimiento de tierras agrícolas se da en mayor proporción en las zonas bajas de la cuenca, que poseen un clima más cálido. Sin embargo, no deja de ser evidente el incremento de áreas de producción agrícola en la zona norte de la capital ecuatoriana.

CUS 1996

Para este año de análisis se observa un proceso contrario a lo esperado, con una ligera recuperación de la superficie de bosques de 50,77 km². Las tierras agropecuarias muestran un decrecimiento de cerca del 2%, pero la zona urbana muestra un incremento de casi el 100%. Para el año 1990 existían 19,93 km² de tierras urbanas y para el año de 1996 se tienen 38,66%. El resto de las superficies se mantienen relativamente constantes, sin cambios significativos de un año a otro. La representación de coberturas y usos del suelo del año 1996 se observa en la Figura 7.

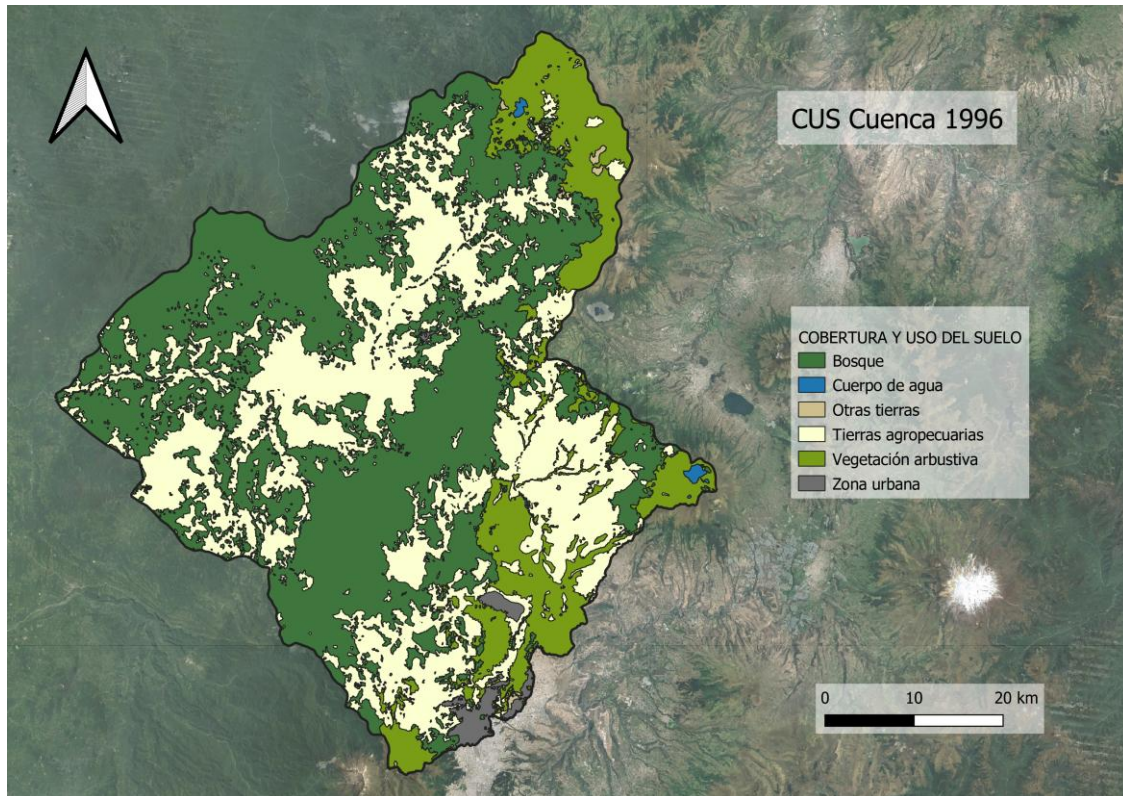


Figura 8. Cobertura y uso del suelo 1996
Fuente y elaboración propias

En cuanto a la distribución de superficies, se mantienen las áreas agrícolas cercanas a los cauces principales de la subcuenca. Las superficies de vegetación arbustiva y herbácea van quedando envueltas por zonas agrícolas y pecuarias en los sectores al norte de Quito.

CUS 2000

Se puede apreciar en la Figura 8, la redistribución de coberturas para el año 2000. La tendencia esperada de decrecimiento de bosques se vuelve a observar para este año. La cobertura de bosques presenta una reducción del 2,37%. Por otro lado, las tierras de producción agrícola y pecuaria muestran un incremento del 1,83%. Otro evento a destacar es el crecimiento constante de las zonas urbanas en la parte más austral del mapa (Figura 8), pasando de 38,66 km² a 50,78 km².

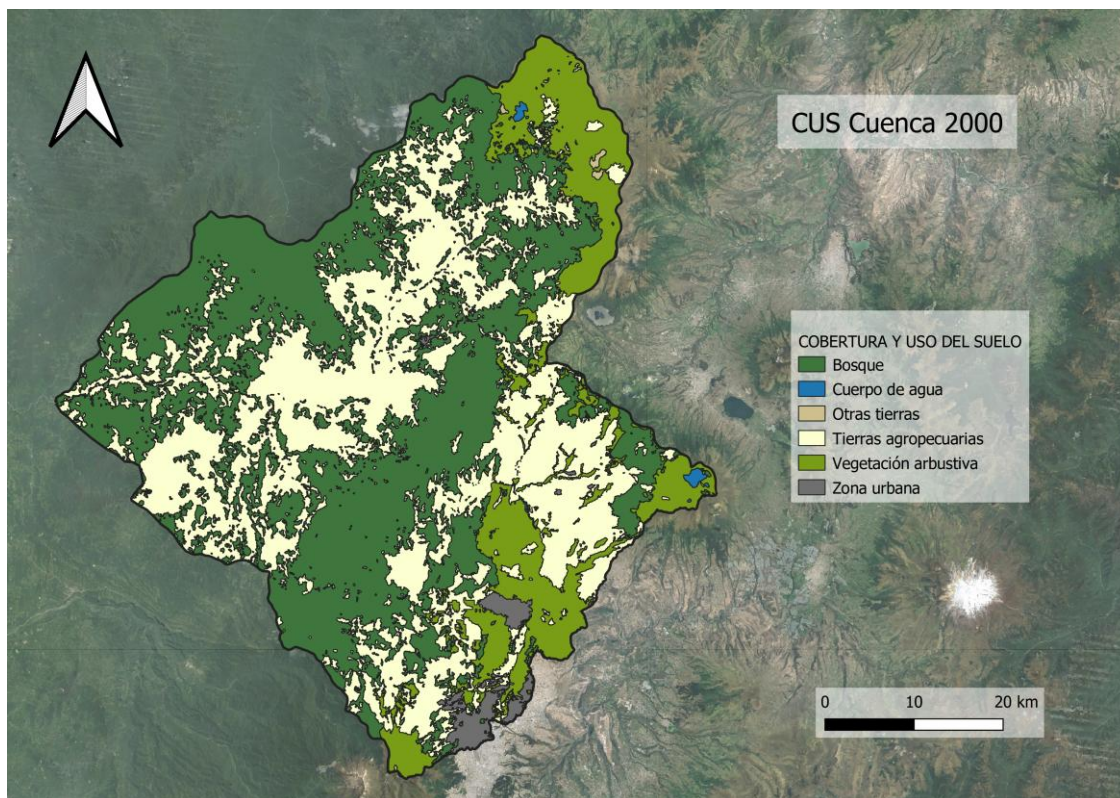


Figura 9. Cobertura y uso del suelo 2000
Fuente y elaboración propias

CUS 2008

En el año 2008 la superficie de bosques mantiene su tendencia de pérdida de superficies, cubriendo para este año el 39,14 % del total de la subcuenca (Figura 9). Contrario a lo ocurrido con los bosques, las tierras agrícolas cubren el 44,49 %. De igual manera, la cobertura de zonas urbanas se mantiene en crecimiento. Para el año 2000 cubrían el 1,64 % y para el año 2008 poseen el 2,34 %, evidenciándose el mayor crecimiento en el norte de Quito y sus alrededores.

A partir de este año ya se observa la predominancia de las coberturas de tierras agropecuarias por encima de las superficies de bosques.

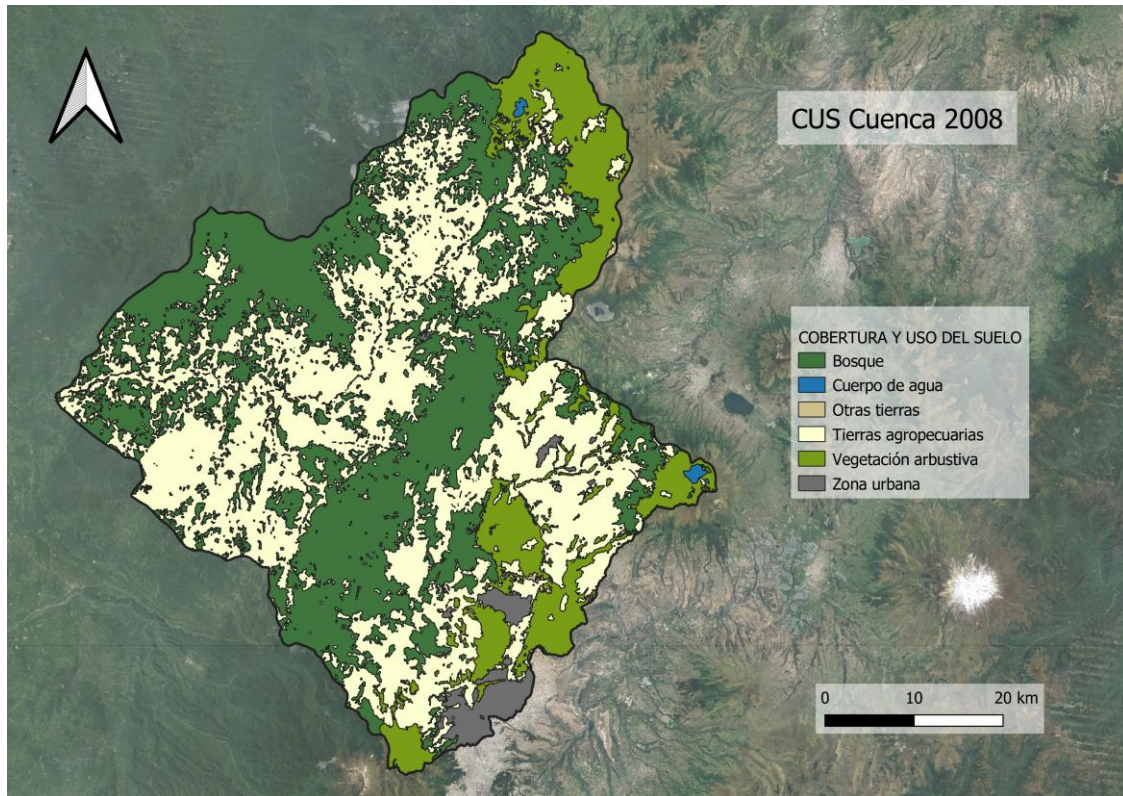


Figura 10. Cobertura y uso del suelo 2008
Fuente y elaboración propias

CUS 2014

El último año de información de CUS fue el 2014, representando la realidad más cercana al final del período de estudio (Figura 10). Para este año, las áreas boscosas cierran con una superficie de 1202,40 km², que representan el 38,73% del total de superficie de la subcuenca. Cabe mencionar que 28 años antes los bosques poseían el 60,46% del área total. El incremento de la frontera agrícola es el responsable de la pérdida de bosques, pues para este último año de información disponible presenta una superficie del 40,73%, incluso mayor que la superficie de bosques. Las CUS de cuerpos de agua, otras tierras y vegetación arbustiva y herbácea se mantienen muy semejantes en superficie durante todo el período de estudio. Sin embargo, la cobertura de zonas urbanas sí evidencia un incremento individual total del 489,10%, pasando de cubrir en el año 1986 un área de 19,82 km² a cubrir 96,94 km² para este 2014.

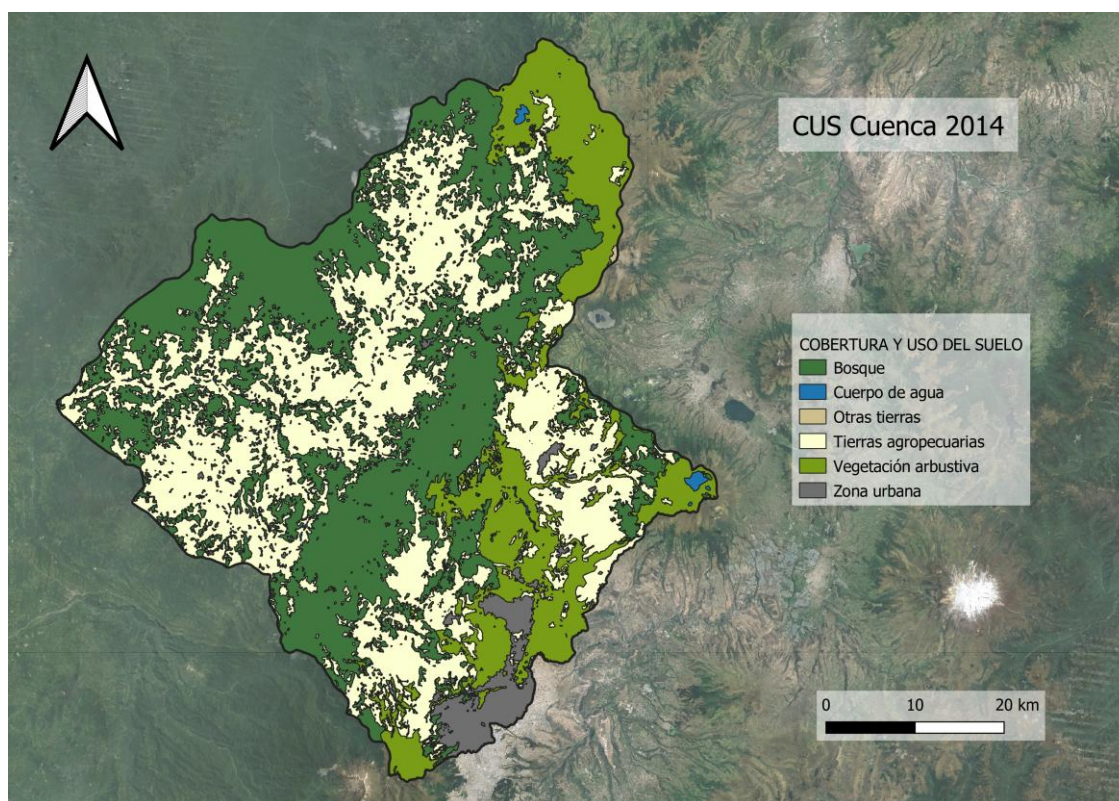


Figura 11. Cobertura y us del suelo 2014
Fuente y elaboración propias

A continuación, se presenta la Tabla 5 como un resumen de las áreas de las diferentes coberturas y usos del suelo en cada año estudiado. Se puede observar que para el final del período de estudio la superficie de bosque fue la que más pérdidas sufrió, mientras que la que más aumentó en área es la de tierra agropecuaria. En cuanto a las coberturas de cuerpos de agua y otras tierras, se puede mencionar que tuvieron un incremento mínimo. Las coberturas de vegetación arbustiva y herbácea igualmente manifestaron un aumento de casi un 1% para el año 2014. Por último, la cobertura de zona urbana es la que más incremento presentó, prácticamente quintuplicando su superficie inicial del año 1986.

Tabla 5
Resumen de cambios de CUS 1986-2014

Año	Área km ² (%)					
	Bosque	Cuerpo de agua	Otras tierras	Tierra agropecuaria	Vegetación arbustiva y herbácea	Zona urbana
1986	1876,46	5,08	0,42	726,77	475,11	19,82
	60,46%	0,16%	0,01%	23,42%	15,31%	0,64%
1990	1407,21	11,18	3,54	1223,23	438,56	19,93
	45,34%	0,36%	0,11%	39,41%	14,13%	0,64%
1996	1457,98	11,18	7,07	1150,55	439,35	38,66
	46,96%	0,36%	0,23%	37,06%	14,15%	1,25%
2000	1384,52	11,18	5,86	1207,42	445,03	50,78
	44,59%	0,36%	0,19%	38,89%	14,33%	1,64%
2008	1215,07	11,18	2,80	1381,47	421,50	72,77
	39,14%	0,36%	0,09%	44,49%	13,58%	2,34%
2014	1202,40	10,93	3,07	1264,50	526,95	96,94
	38,73%	0,35%	0,10%	40,73%	16,97%	3,12%

Fuente y elaboración propias

En el Gráfico 2 se representa la variación de cada CUS por año de estudio. Tal como se indicaba en la Tabla 5, las coberturas que presentan cambios más significativos son la de bosque y la de tierra agropecuaria. De hecho, se evidencia que las curvas de cambio de cada CUS son casi inversas una con la otra. Por su parte, las otras coberturas no presentan una variación tan marcada, aunque la vegetación arbustiva y herbácea y la zona urbana muestran una tendencia de crecimiento en superficie.

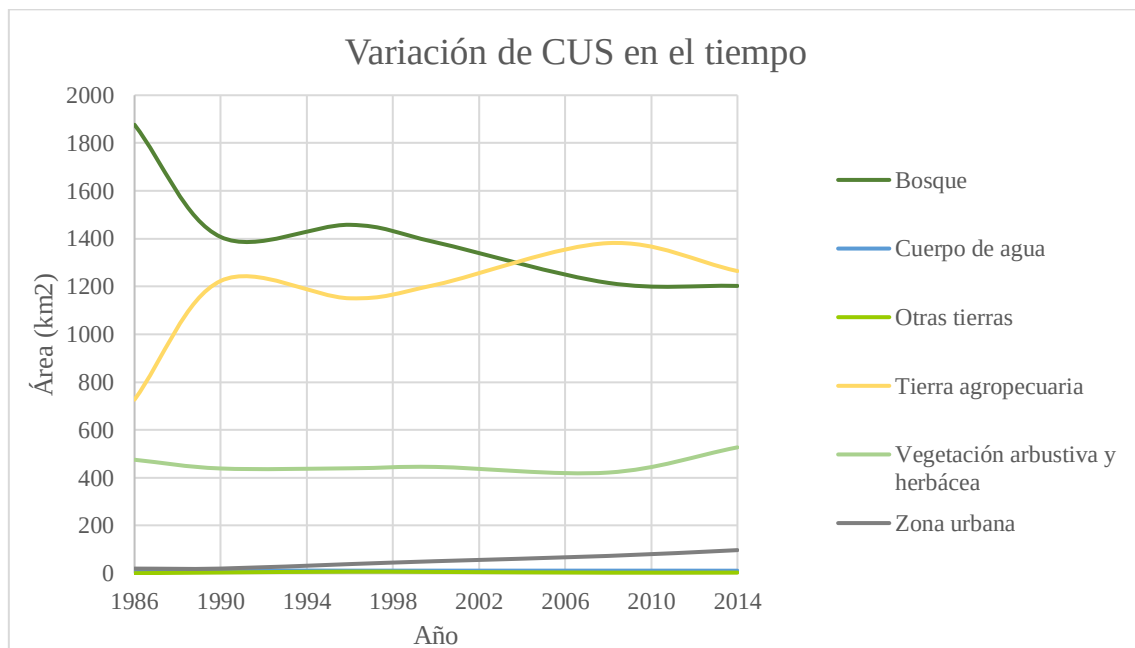


Figura 12. Variación de CUS por años

Fuente y elaboración propias

2. Análisis de la variación y degradación de CUS entre años

Para realizar este análisis se comparó las superficies de CUS de un año con el inmediato superior, determinando las superficies que pasaron a formar una cobertura diferente. De esta manera se puede identificar por ejemplo cuántos kilómetros cuadrados de bosque fueron convertidos en las diferentes CUS para dicho período de tiempo. Posteriormente, en cada matriz de cambio se realizó una reclasificación de la información raster a nivel de cada pixel. Por lo tanto, se estableció que hay cambios de CUS que se consideraron favorables y cambios que se consideraron desfavorables. Los cambios de CUS mayormente ocasionados por el mal manejo de las tierras contribuyen significativamente a la degradación de los suelos (Gebremicael et al. 2017), por lo que en este estudio se los consideró como Degradación.

Degradación 1986-1990

A continuación, se presenta la Tabla 6 en la que se visualiza en el sentido de izquierda a derecha las superficies que cambiaron de una CUS otra. Para comprender los cambios que se consideraron como degradación y los que no, se han pintado de rojo los cambios de CUS que se consideran degradación.

Tabla 6
Matriz de degradación 1986-1990

Matriz de cambio de CUS (km ²)							
	CUS (1990)						
CUS (1986)	Bosque	Cuerpo de agua	Otras tierras	Tierras agropecuarias	Vegetación Arbustiva	Zona Urbana	Total CUS (1986)
Bosque	1323,64	3,10	0,28	488,84	59,76	0,85	1876,46
Cuerpo de agua	0,04	4,83	0,00	0,00	0,22	0,00	5,08
Otras tierras	0,00	0,00	0,00	0,05	0,37	0,00	0,42
Tierras agropecuarias	68,51	1,86	0,11	597,20	58,23	0,87	726,77
Vegetación Arbustiva	14,62	1,40	2,63	134,72	317,98	3,77	475,11
Zona Urbana	0,41	0,00	0,53	2,43	2,01	14,45	19,82
Total CUS (1990)	1407,21	11,18	3,54	1223,23	438,56	19,93	3103,66

Fuente y elaboración propias

Para este período se ha contabilizado que se han degradado 698,45 km², que representa el 22,50% del total de la subcuenca. Por lo tanto, se ha degradado cerca de la quinta parte de la subcuenca en este período de estudio (Figura 11).

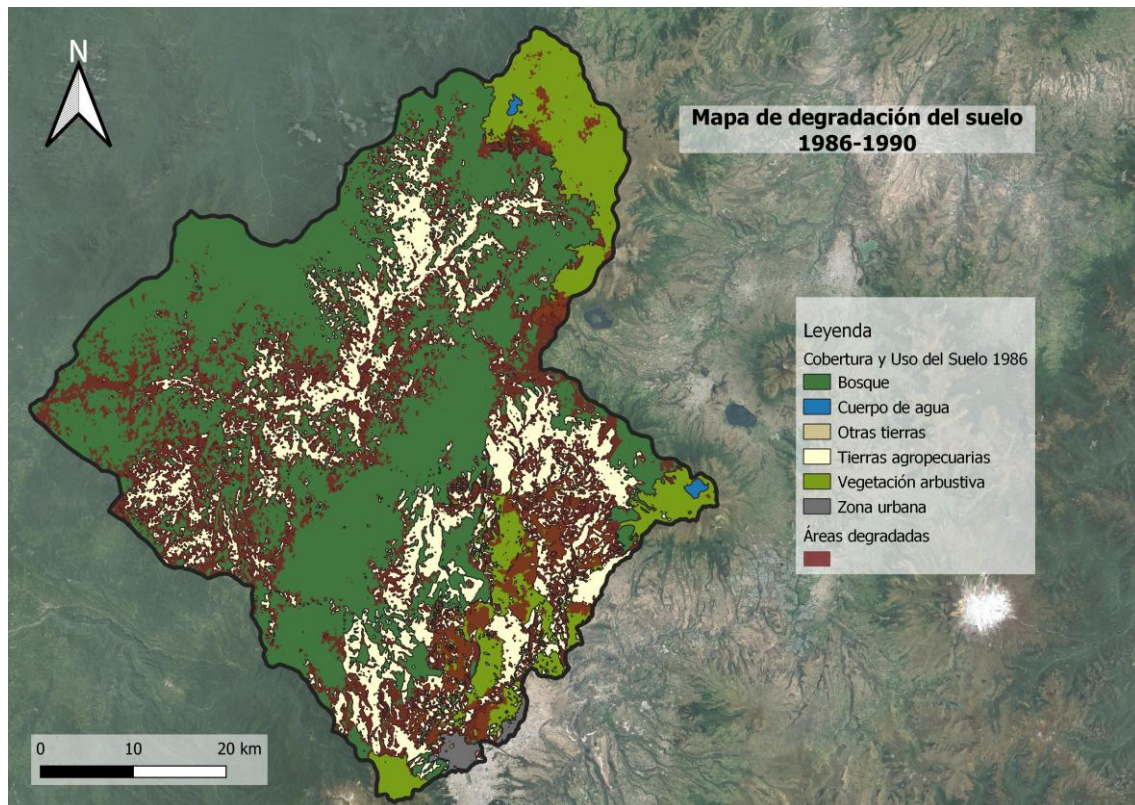


Figura 13. Mapa de degradación 1986-1990
Fuente y elaboración propias

Degradación 1990-1996

En la Tabla 7 se presentan los cambios de una CUS a otra y por consiguiente la cantidad de kilómetros cuadrados que se degradaron en este período de tiempo. Para el año 1996 se tiene un total de 224,65 km² de degradación, una superficie total menor al período anterior. Esta superficie degradada representa el 7,23% de la subcuenca.

Tabla 7
Matriz de degradación 1990-1996

Matriz de cambio de CUS (km ²)							
	CUS (1996)						
CUS (1990)	Bosque	Cuerpo de agua	Otras tierras	Tierras agropecuarias	Vegetación Arbustiva	Zona Urbana	Total CUS (1990)
Bosque	1230,44	0,00	0,92	174,71	0,66	0,74	1407,46
Cuerpo de agua	0,00	11,18	0,00	0,00	0,00	0,00	11,18
Otras tierras	0,08	0,00	0,51	0,02	2,86	0,10	3,55
Tierras agropecuarias	215,24	0,00	0,00	952,14	41,72	14,44	1223,52
Vegetación Arbustiva	11,85	0,00	5,64	23,23	394,13	4,21	439,06
Zona Urbana	0,38	0,00	0,00	0,47	0,00	19,17	20,02
Total CUS (1996)	1457,98	11,18	7,07	1150,55	439,35	38,66	3104,79

Fuente y elaboración propias

En la Figura 12 se pueden observar las áreas degradadas, así como el hecho de que en comparación con el período anterior no es tan grande la superficie afectada. Este es el período en el que se observó una ligera recuperación en la subcuenca, al tener cambios de CUS favorables como se puede ver en el Gráfico 2.

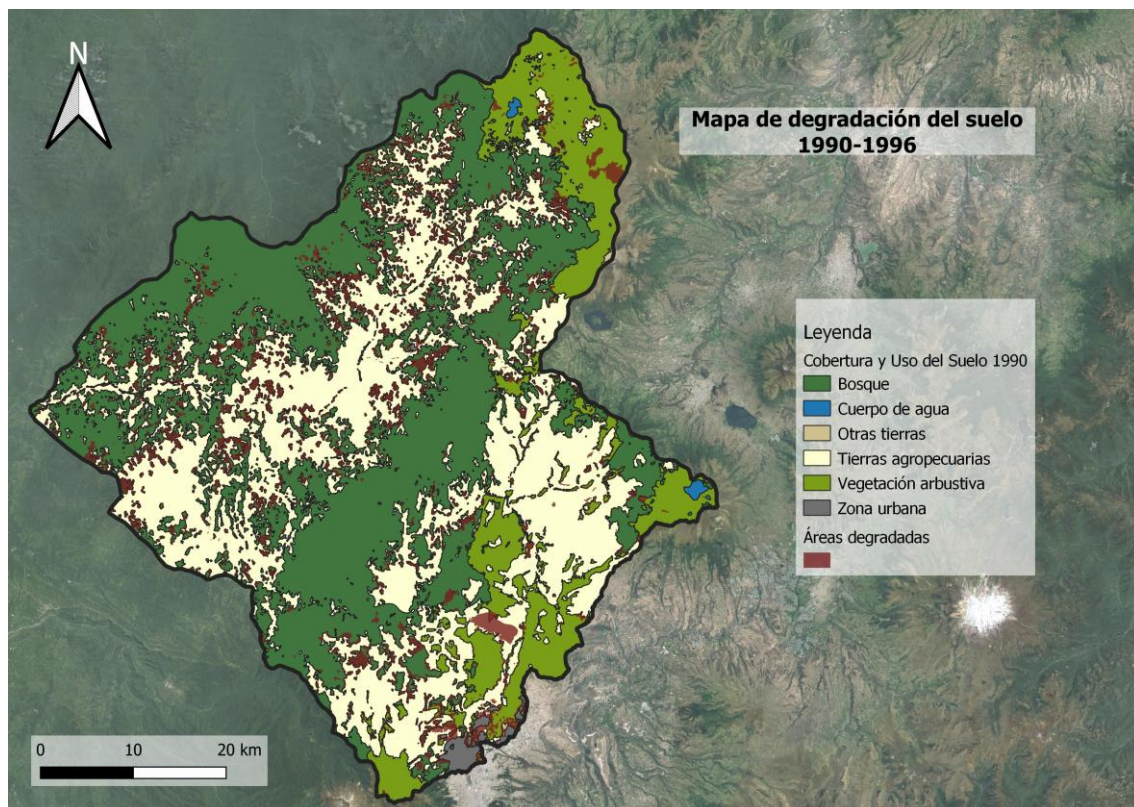


Figura 14. Mapa de degradación 1990-1996
Fuente y elaboración propias

Degradación 1996-2000

La Tabla 8 presenta la contabilidad de superficies degradadas para el período 1996-2000. Para este período se regresa a la tendencia de degradación que se observaba en el primer período de estudio. La superficie total degradada en estos años es de 120,78 km², correspondiente al 3,89%.

A pesar de que la superficie degradada tiende a ser menor, se debe considerar que la degradación de las tierras es progresiva y que se ha mantenido constante. Los indicadores más representativos son los de pérdida de bosques y el incremento de la frontera agrícola, que se han mantenido constantes en cada período de estudio.

Tabla 8
Matriz de degradación 1996-2000

Matriz de cambio de CUS (km ²)							
	CUS (2000)						
CUS (1996)	Bosque	Cuerpo de agua	Otras tierras	Tierras agropecuarias	Vegetación Arbustiva	Zona Urbana	Total CUS (1996)
Bosque	1353,23	0,00	0,00	101,77	1,99	0,98	1457,98
Cuerpo de agua	0,00	11,18	0,00	0,00	0,00	0,00	11,18
Otras tierras	0,00	0,00	5,86	0,00	0,00	1,21	7,07
Tierras agropecuarias	30,74	0,00	0,00	1100,76	9,68	9,38	1150,55
Vegetación Arbustiva	0,55	0,00	0,00	4,89	433,37	0,56	439,35
Zona Urbana	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	38,66	38,66
Total CUS (2000)	1384,52	11,18	5,86	1207,42	445,03	50,78	3104,79

Fuente y elaboración propias

En la Figura 13 se observa el mapa de degradación para el período 1996-2000. Se puede observar que las áreas degradadas son muy pequeñas en comparación con la subcuenca. De igual manera, se puede ver que la degradación mayormente se da en el paso de coberturas de bosque a tierras agrícolas.

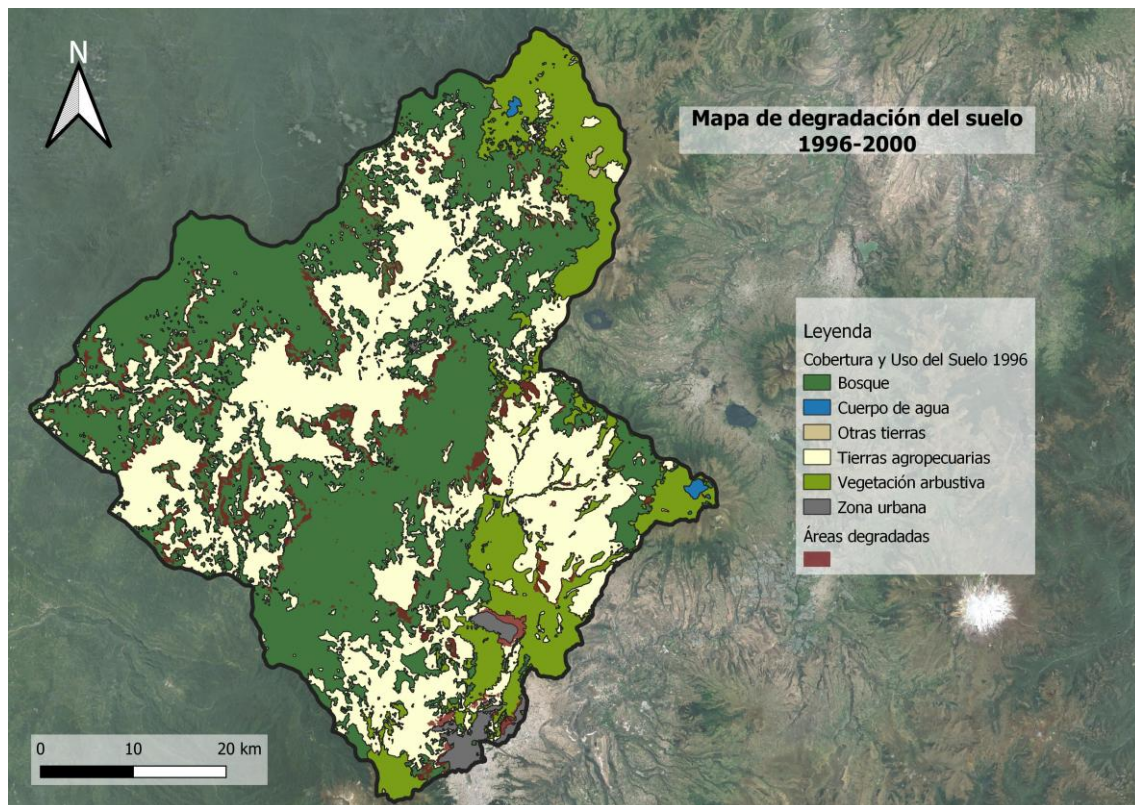


Figura 15. Mapa de degradación 1996-2000

Fuente y elaboración propias

Degradación 2000-2008

La matriz de cambios de coberturas para este período mantiene la tendencia de pérdida de coberturas de bosque y el incremento de áreas agrícolas y áreas urbanas (Tabla 9). Dentro de estos ocho años se tuvo un total de 307,04 km² de degradación, que representan el 9,89% de la superficie de la subcuenca. Las áreas degradadas han incrementado en comparación con el período anterior; a pesar de ello, la tendencia de reducción de coberturas de bosque se mantiene vigente, así como el aumento de zonas urbanas y tierras agropecuarias.

Tabla 9
Matriz de degradación 2000-2008

Matriz de cambio de CUS (km ²)							
	CUS (2008)						
CUS (2000)	Bosque	Cuerpo de agua	Otras tierras	Tierras agropecuarias	Vegetación Arbustiva	Zona Urbana	Total CUS (2000)
Bosque	1143,52	0,00	0,03	228,52	9,24	3,21	1384,52
Cuerpo de agua	0,00	11,18	0,00	0,00	0,00	0,00	11,18
Otras tierras	0,00	0,00	0,16	1,22	4,49	0,00	5,86
Tierras agropecuarias	71,25	0,00	0,00	1107,09	16,15	12,93	1207,42
Vegetación Arbustiva	0,30	0,00	2,61	44,64	391,63	5,86	445,03
Zona Urbana	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	50,78	50,78
Total CUS (2008)	1215,07	11,18	2,80	1381,47	421,50	72,77	3104,79

Fuente y elaboración propias

La Figura 14 permite visualizar las áreas degradadas para estos años, donde se las puede localizar mayoritariamente en los cambios de vegetación arbustiva y herbácea a tierras agropecuarias y a zonas urbanas. La pérdida de vegetación arbustiva se hace más evidente en la zona norte de la subcuenca, así como en los alrededores del norte de Quito y poblados cercanos. Se puede ver claramente en este mapa que las tierras de producción agrícola son mayores que las correspondientes a bosques. La tendencia de degradación de los primeros períodos de estudio se mantiene para los años 2000 al 2008.

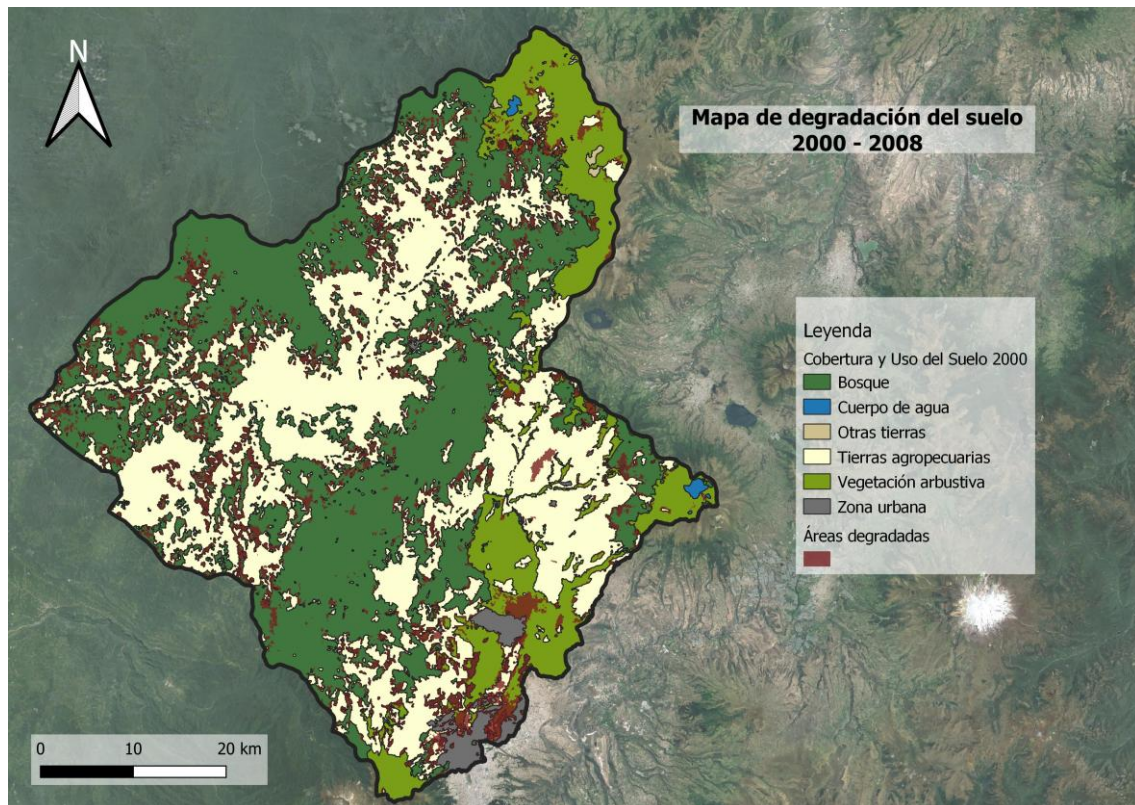


Figura 16. Mapa de degradación 2000-2008
Fuente y elaboración propias

Degradación 2008-2014

La Tabla 10 muestra los cambios de CUS que provocaron superficies degradadas para este rango de años. La degradación para este tiempo fue del 4,72%, equivalente a 146,41 km². Al comparar estos datos con el período anterior, se visualiza un decrecimiento en la degradación de coberturas. Sin embargo, las tendencias se van manteniendo constantes con el pasar de los años. Las superficies de bosque y vegetación herbácea se reducen, mientras que aumenta la frontera agrícola y las áreas de infraestructura urbana.

Tabla 10
Matriz de degradación 2008-2014

Matriz de cambio de CUS (km ²)							
	CUS (2014)						
CUS (2008)	Bosque	Cuerpo de agua	Otras tierras	Tierras agropecuarias	Vegetación Arbustiva	Zona Urbana	Total CUS (2008)
Bosque	1111,90	0,00	0,10	102,85	0,06	0,17	1215,07
Cuerpo de agua	0,00	9,99	0,00	1,19	0,00	0,00	11,18
Otras tierras	0,00	0,00	1,90	0,02	0,21	0,67	2,80
Tierras agropecuarias	89,91	0,60	0,98	1144,43	122,52	23,04	1381,47
Vegetación Arbustiva	0,60	0,34	0,11	16,01	404,16	0,29	421,50
Zona Urbana	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	72,77	72,77
Total CUS (2014)	1202,40	10,93	3,07	1264,50	526,95	96,94	3104,79

Fuente y elaboración propias

De manera que se facilite y se visualicen los cambios de CUS y las superficies degradadas, se elaboró el mapa de degradación para los años 2008-2014 (Figura 15). Las superficies degradadas se ubican principalmente en las zonas centro-sur de la subcuenca, donde se sigue dando este intercambio de superficies entre bosques y áreas agrícolas.

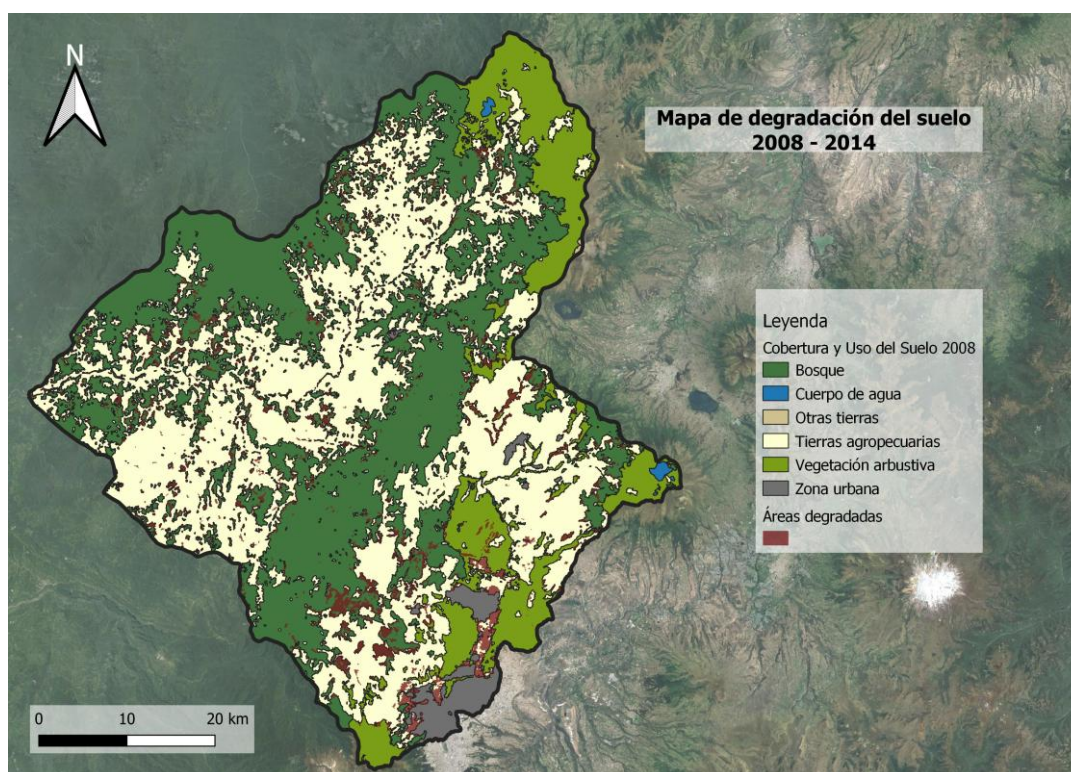


Figura 17. Mapa de degradación 2008-2014

Fuente y elaboración propias

3. Variación de CUS en total (1986-2014)

Como resumen de todos los análisis por períodos, se puede ver en la Tabla 11 la información de degradación de superficies para todo el período de tiempo estudiado (28 años). Se puede observar que en todo este tiempo más de 600 km² de bosque fueron convertidos a tierras agropecuarias, aunque en el mismo tiempo 42,50 km² de estas tierras pudieron regresar a ser bosques en recuperación. Por otro lado, la superficie de zonas urbanas es la que mayor degradación relativa presenta. Las áreas de ciudades y pueblos prácticamente se quintuplicaron, como se indicaba en el análisis de cambio de CUS.

Tabla 11
Matriz de degradación 1986-2014

Matriz de cambio de CUS (km ²)							
	CUS (2014)						
CUS (1986)	Bosque	Cuerpo de agua	Otras tierras	Tierras agropecuarias	Vegetación Arbustiva	Zona Urbana	Total CUS (1986)
Bosque	1147,18	2,80	0,23	638,00	81,94	6,31	1876,46
Cuerpo de agua	0,04	4,88	0,00	0,00	0,17	0,00	5,08
Otras tierras	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,42	0,42
Tierras agropecuarias	42,50	1,59	0,33	544,48	104,14	33,74	726,77
Vegetación Arbustiva	12,45	1,67	2,50	81,69	340,23	36,59	475,11
Zona Urbana	0,05	0,00	0,00	0,05	0,02	19,70	19,82
Total CUS (2014)	1202,21	10,93	3,05	1264,23	526,49	96,75	3103,66

Fuente y elaboración propias

La información de áreas degradadas para el total de años estudiados se puede visualizar en la Figura 16. En este mapa se puede observar con claridad que la mayor cantidad de kilómetros cuadrados de degradación se dieron en la cobertura de bosques. La tendencia de reducción de estas áreas se da alrededor de los cuerpos de agua. De igual manera, se puede ver que la segunda superficie que más sufre daños por degradación es la de vegetación arbustiva y herbácea, sufriendo mayormente cambios hacia zonas urbanas y tierras agropecuarias.

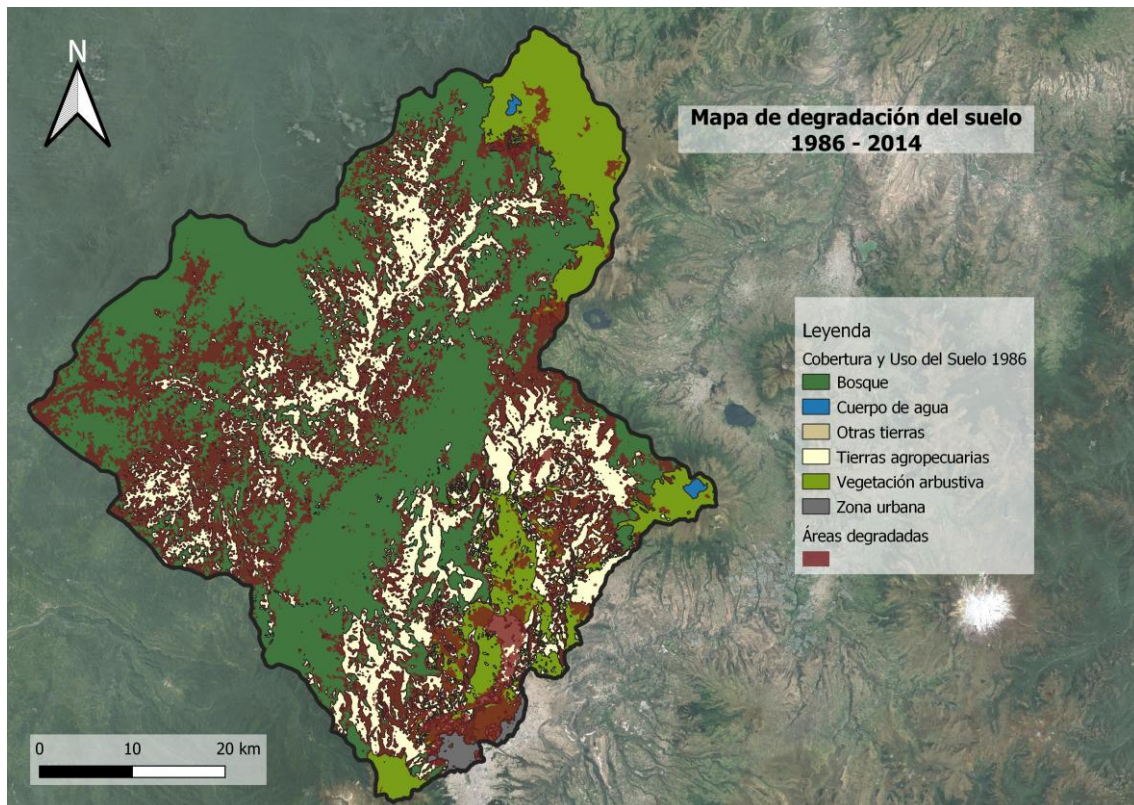


Figura 18. Mapa de degradación 1986-2014
Fuente y elaboración propias

Capítulo quinto

Análisis temporal de niveles

Para el presente capítulo se utilizó información de niveles de los ríos en los cuales se encontraban ubicadas estaciones hidrológicas dentro de la subcuenca. En la Figura 17 se puede apreciar la red hídrica del área de estudio, así como las estaciones hidrológicas con información disponible. De igual manera, se muestra el histograma del total de los datos de cada estación.

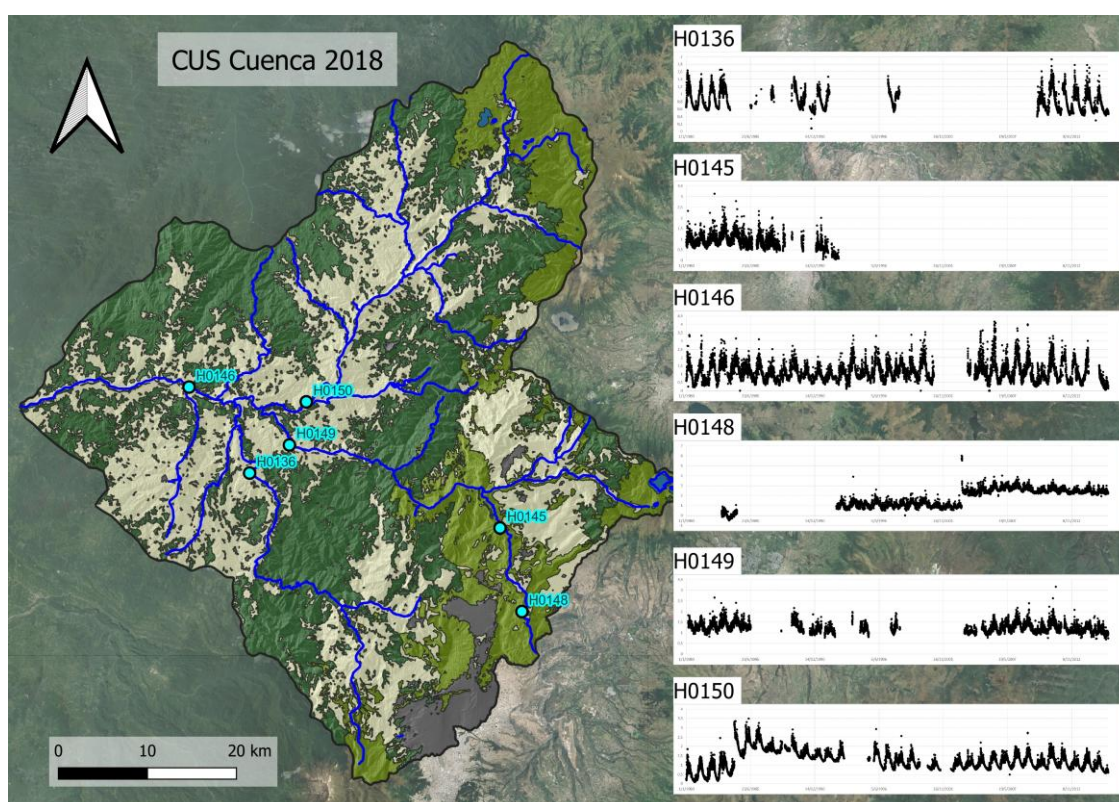


Figura 19. Red hídrica e información hidrológica disponible

Fuente: EC INAMHI Anuarios hidrológicos 1965-2015. Elaboración propia

Como se puede evidenciar, casi todas las estaciones cuentan con vacíos de información. Estos vacíos de información corresponden a años sin información registrada por las estaciones y se deben principalmente al malfuncionamiento de las mismas. En la Tabla 12 se presenta el resumen de información disponible por estación. Se calcula que para los 29 años de este análisis hidrológico deberían existir 10592 registros diarios de nivel del río. A continuación, se indican la cantidad de datos disponibles por estación, el

porcentaje que esta información representa del total, los valores máximo, mínimo y medio de nivel del río en cada estación.

Tabla 12
Análisis de datos de estaciones hidrológicas

Estación Hidrológica	Número de datos	Porcentaje de información	Nivel Máximo (m)	Nivel Mínimo (m)	Nivel Medio (m)
H0136	3486/10592	33%	1,93	0,08	0,80
H0145	1419/10592	13%	2,32	0,05	0,70
H0146	8801/10592	83%	4,17	0,00	1,12
H0148	6510/10592	61%	6,00	0,00	2,05
H0149	5345/10592	50%	3,16	0,69	1,20
H0150	9080/10592	86%	3,25	0,48	1,26

Fuente: INAMHI Anuarios hidrológicos 1965-2015

Elaboración propia

Las únicas dos estaciones que poseen una cantidad de información que supera el 80% son la H0146 y H0150. El resto de estaciones tienen muy poca información o tiempos muy prolongados donde no hay datos de nivel de los ríos.

Adicionalmente, como se explicó en el capítulo de metodología, se trabajó con la información de la estación que se encuentra más cercana al cierre de la subcuenca. En este caso corresponde a la estación H0146, que es la que mayor porcentaje de información posee, así como registros de información constantes en la mayoría del período 1986-2014.

1. Análisis hidrológico por período de estudio

Período 1986-1990

En el primer período de estudio (Gráfico 3), los valores más altos registrados alcanzan aproximadamente un nivel de 2,5 m, que se registra anualmente en los primeros meses del año. Para este período de tiempo se puede observar la regresión lineal de los registros disponibles, donde esta recta presenta una pendiente negativa con valores cercanos a 1 m.

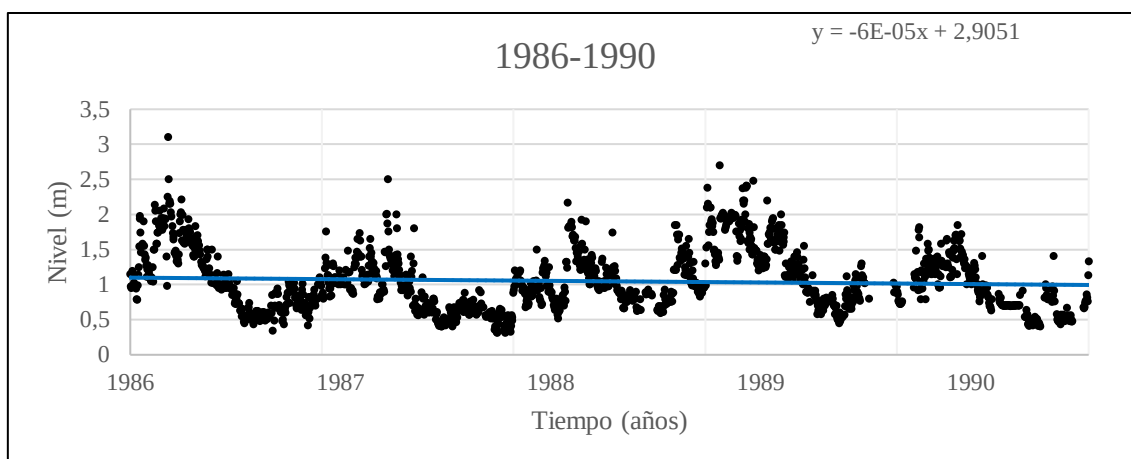


Figura 20. Datos de nivel 1986-1990

Fuente: EC INAMHI Anuarios hidrológicos 1965-2015. Elaboración propia

Período 1990-1986

Los niveles del río para los años 1990-1996 se pueden visualizar en el Gráfico 4. La distribución anual se mantiene como en el primer período, con valores altos en el primer semestre del año y valores decrecientes en el segundo semestre del año. La pendiente de la regresión lineal en este período es positiva, situándose con un nivel del río de alrededor de 1 m.

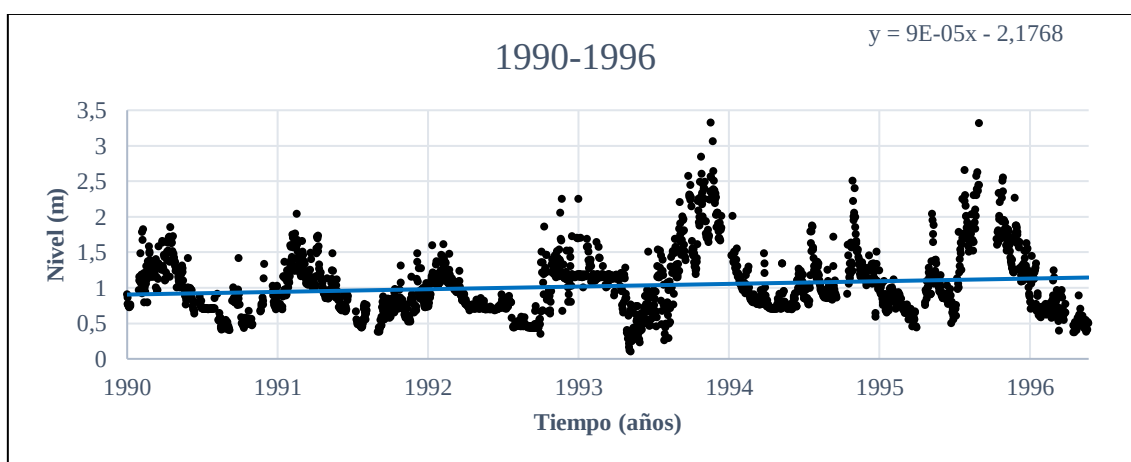


Figura 21. Datos de nivel 1990-1996

Fuente: INAMHI Anuarios hidrológicos 1965-2015. Elaboración propia

Período 1996-2000

Los niveles del río en estos años mantienen las tendencias de distribución temporal de los años anteriores. En el Gráfico 5 se observa la pendiente de la recta para este período que es negativa, presentando una disminución en la media del nivel del río.

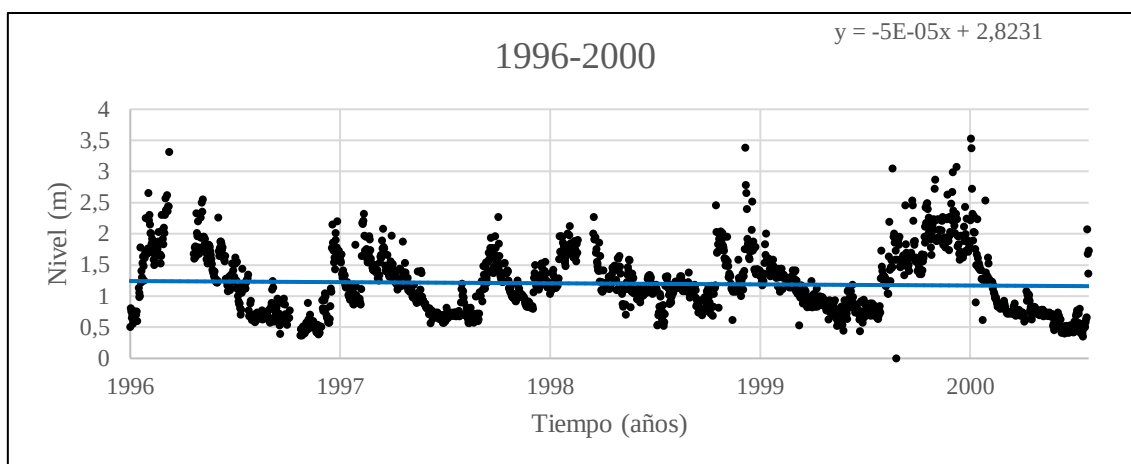


Figura 22. Datos de nivel 1996-2000

Fuente: INAMHI Anuarios hidrológicos 1965-2015. Elaboración propia

Período 2000-2008

Este período presenta un vacío de información considerable, situado entre los años 2001 y 2004 (Gráfico 6), lo cual le resta precisión al análisis de estos años. A partir del año 2004 se observa que los niveles máximos alcanzados por el río Guayllabamba en esta estación se ubican entre los 3 y 4 metros. Para esta etapa la pendiente de la recta correspondiente a la regresión lineal es negativa.

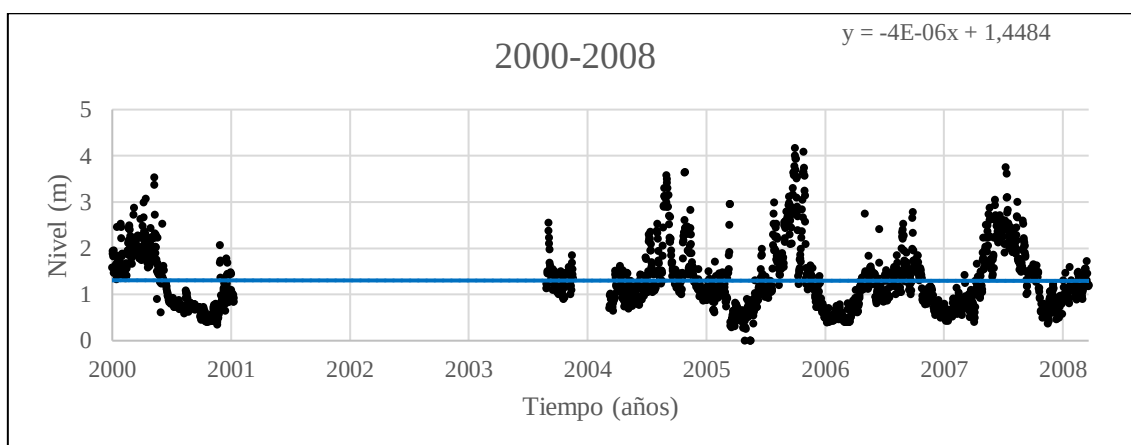


Figura 23. Datos de nivel 2000-2008

Fuente: INAMHI Anuarios hidrológicos 1965-2015. Elaboración propia

Período 2008-2014

Para representar la distribución temporal de niveles del río en los años 2008 al 2014 se presenta el Gráfico 7. Los valores máximos de altura alcanzados por el cuerpo de agua llegan a 3 m, mientras que los más bajos se acercan al cero. La pendiente de la recta en este caso es negativa y se presenta como la pendiente más pronunciada de entre todos

los períodos. Esto representa una disminución en los valores de nivel del río para estos años.

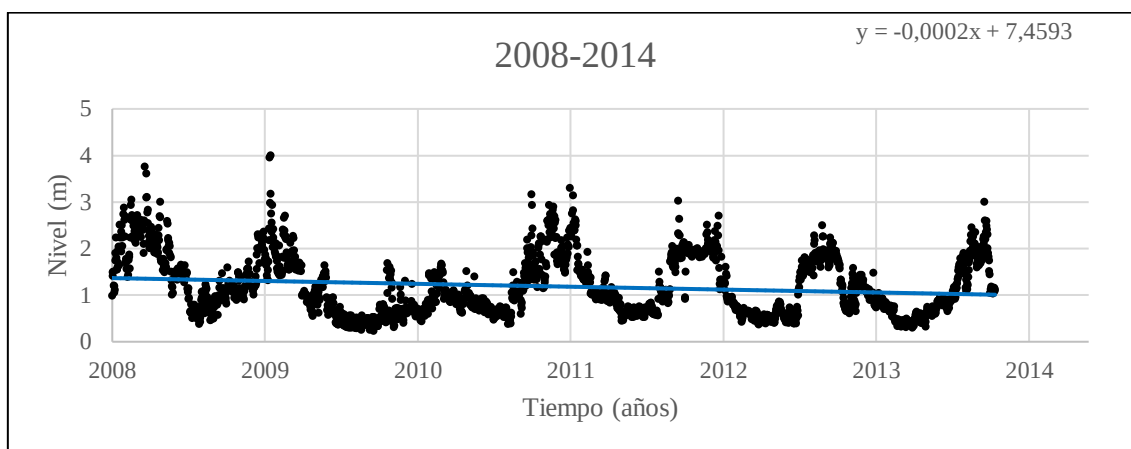


Figura 24. Datos de nivel 2008-2014

Fuente: INAMHI Anuarios hidrológicos 1965-2015. Elaboración propia

Período 1986-2014

El Gráfico 8 presenta la distribución de todos los valores de nivel del río para el total de años de estudio. Al poder comparar la información agrupada de todos los años se observa que los datos de nivel previos al vacío de información son en promedio menores. Por su parte, luego del vacío de información se tienen mediciones de nivel ligeramente más altas. Esto corresponde con el valor de pendiente positiva que presenta la ecuación de la recta en este período analizado. Sin embargo, dentro del análisis de cada período, en la mayoría de ellos se tenían pendientes negativas.

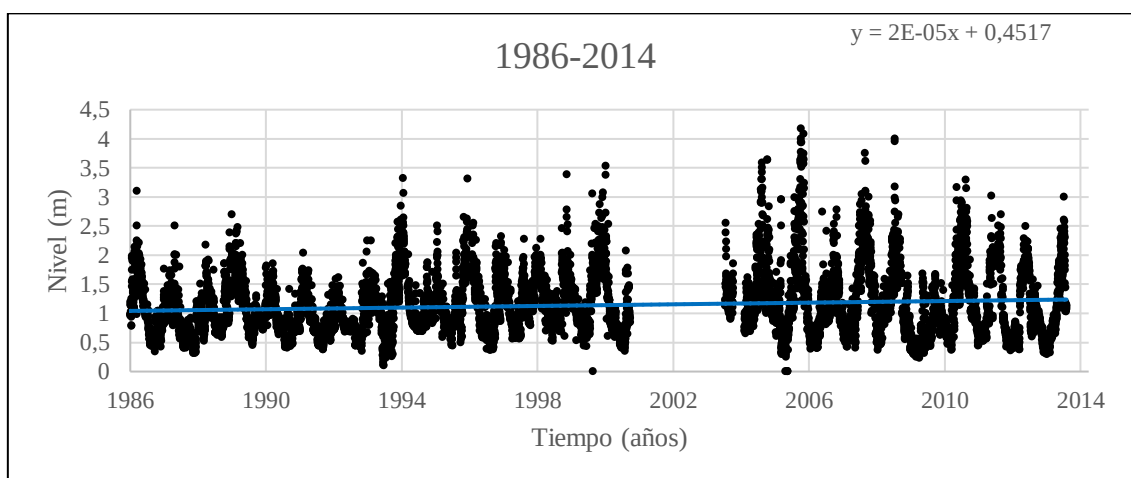


Figura 25. Datos de nivel 1986-2014

Fuente: INAMHI Anuarios hidrológicos 1965-2015. Elaboración propia

Capítulo sexto

Resultados y discusión

Los análisis realizados de manera paralela respecto a la variación de CUS y a la variación del nivel del río Guayllabamba en la estación más próxima al cierre de la subcuenca, permiten tener una visión de la dinámica de estos elementos en el período de estudio. Por un lado, la degradación de suelos gracias a la variación de sus coberturas indica una tendencia general de reducción de bosques mientras las superficies agroproductivas van en aumento.

1. Comparación de degradación vs variación de nivel por períodos

Una vez hecho el análisis por separado de las dos variables de este estudio, que son las coberturas del suelo y el nivel del río, se realiza la contrastación de una variable frente a la otra en los mismos períodos de tiempo y por último en todo el tiempo de estudio. De esta manera se pueden establecer las posibles correlaciones existentes entre un fenómeno y otro. Por otra parte, se hace la comparación respecto al período anterior para así poder entender lo que ocurre en el tiempo con cada variable.

Para realizar la comparación se elaboró la Tabla 13 en la cual se comparan los datos obtenidos en cada período y por cada variable. Igualmente, se añade la comparación respecto al período anterior para poder identificar tendencias de cambio y coincidencias en estas tendencias.

Tabla 13
Comparación Variación CUS vs Variación datos hidrológicos

Período	Análisis CUS					Análisis niveles estaciones hidrológicas		Comparación
	Degradación (km ²)	Recuperación (km ²)	Variación neta CUS (km ²)	Variación CUS acumulada (km ²)	Variación neta respecto al período anterior	Pendiente (línea de tendencia)	Pendiente respecto al período anterior	Degradación vs Pendiente (coincide)
1986-1990	-698,45	147,16	-551,29	-551,29	-	-0,00006	-	-
1990-1996	-224,65	272,62	47,97	-503,32	Aumenta	0,00009	Aumenta	SI
1996-2000	-120,78	40,97	-79,81	-583,13	Disminuye	-0,00005	Disminuye	SI
2000-2008	-307,04	93,41	-213,63	-796,76	Disminuye	-0,000004	Aumenta	NO
2008-2014	-146,41	213,26	66,85	-729,91	Aumenta	-0,0002	Disminuye	NO

1986-2014	888,02	159,21	-728,81			0,00002		
-----------	--------	--------	---------	--	--	---------	--	--

Fuente y elaboración propias

Período 1986-1990

En este primer período se obtuvo una degradación de 698,45 km² que equivalen al 22,50% del total de la subcuenca. Existió una recuperación de los suelos de 147,16 km², por lo que la variación neta resultante fue de 551,29 km². Al ser mayor la superficie degradada que la superficie recuperada, en este período la variación neta se establece como degradación. Por su parte, la pendiente de la línea de tendencia del nivel del río es negativa, indicando dentro de estos años un decrecimiento de la altura media diaria medida del río en la estación hidrológica. Por lo tanto, se tuvo una degradación de cerca del 18%, aproximadamente la quinta parte de las CUS y en el mismo tiempo hubo una reducción leve del nivel del río. Para este primer período no se realiza la comparación respecto a un período anterior por ser el primero a ser analizado.

Período 1990-1996

En los años 1990 a 1996 existió una degradación de 224,65 km². La superficie de suelos que tuvieron una variación considerada como favorable fue de 272,62 km². Por ello, en esta etapa se tuvo una variación neta positiva de 47,97 km² y una variación acumulada de 503,32 km². Esto representa que los procesos de degradación se mantienen en mayor proporción que los de recuperación.

En la comparación, el nivel del río presenta una pendiente de la recta positiva indicando que hubo aumento de la altura alcanzada por el cuerpo de agua. Cotejando la variación neta con el dato del período anterior, se tuvo mayor cantidad de suelos recuperados que de suelos degradados, pero sigue existiendo degradación en un alto porcentaje. De hecho, se está considerando que se trabaja sobre una superficie que ya se encontraba en proceso de degradación desde el período anterior. Por el contrario, el nivel del río se encuentra en ligero ascenso, respondiendo a un aumento en la cantidad de agua cuando la degradación ha disminuido.

Respecto al primer período de análisis, la variación neta de CUS tiene un valor mayor en el segundo período; por lo tanto, la tendencia aumenta. Por otro lado, la pendiente de la recta de datos hidrológicos respecto al primer período es positiva, así que la tendencia aumenta. En la comparación de ambas variables en el segundo período se encontró una coincidencia de que ambas tendencias aumentan su valor.

Período 1996-2000

Este es el período que presenta la menor degradación de todos los análisis realizados. La superficie degradada en estos años fue de 120,78 km², esto representa el 3,89% de la subcuenca. La superficie de suelos recuperados fue de 40,97 km², que equivale aproximadamente a la tercera parte de los suelos degradados. La variación neta de CUS arroja un valor negativo de 79,81 km², lo que significa que en estos años hubo mayor degradación que recuperación. La superficie total degradada hasta el año 2000 fue de 583,13 km². Por su parte, la variación neta respecto al segundo período disminuye, pues pasa de 47,97 km² recuperados a 79,81 km² degradados.

La pendiente de la línea de tendencia de los niveles del río en este período es negativa. Al contrastar la información de ambas variables con sus correspondientes datos del período anterior, se puede observar que la degradación ha disminuido y a su vez el nivel medio del río también presenta un decrecimiento. De esta manera se puede establecer que existe correspondencia entre degradación y variación de niveles del río para estos años.

Período 2000-2008

Para este período la superficie de degradación fue de 307,04 km², equivalente casi al 10% de la superficie total. En los mismos años, las áreas que presentaron procesos de recuperación debido a cambios favorables suman 93,41 km². Por ello, al año 2008 la variación neta de CUS es negativa, lo que representa degradación a final de cuentas y con una superficie degradada de 213,63 km². Para este rango de años la degradación acumulada asciende a casi 800 km², por lo que se puede considerar hasta el año 2008 una superficie total degradada de cerca del 25% del total de la subcuenca.

En el mismo tiempo la pendiente de la línea de tendencia de los valores de nivel del río es negativa, representando un decrecimiento en la altura alcanzada por el río para estos años. Sin embargo, al compararla con el período anterior se observa que a pesar de ser negativa presenta un valor mayor al de los años 1996-2000.

Cuando se comparan los datos de estas variables respecto a los datos del período pasado, se observa que la variación se mantiene negativa y decreciendo. Al momento de empatar la información de una variable frente a la otra no se encontró coincidencia entre sus tendencias para estos años.

Período 2008-2014

La degradación sucedida en estos años fue de 146,41 km², lo que constituye una superficie degradada del 4,72%. La recuperación de CUS por su parte fue de 213,26 km², resultando en una variación neta positiva de 66,85 km². Dicho de otra forma, para este año se dieron mayor cantidad de procesos de recuperación que degradación. La tendencia de la variación neta respecto al período anterior aumenta, pasan de una degradación de 213,63 km² a una recuperación total de 66,85 km².

Al revisar la pendiente de la recta para los datos hidrológicos se puede evidenciar que la pendiente es negativa una vez más, mostrando una disminución en los datos de nivel del río y por ende una menor cantidad de agua circulando en el cauce. Para este último período de estudio no se encontró coincidencia entre las tendencias de variación de CUS y las tendencias de la pendiente de la recta.

Período 1986-2014

Una vez realizado el análisis por períodos para identificar alguna correspondencia entre años, se realizó el mismo proceso para el total de datos comparando la información geográfica del primer año (1986) con la del último año de datos de CUS disponibles (2014). Dentro de estos 28 años se observa un total de 888,02 km² de terrenos degradados, contra 159,21 km² de terrenos recuperados. Esto da como resultado una degradación neta de 728,81 km². Se puede observar la similitud de los datos de variación de CUS acumulada final de 729,91 km² y la variación neta del período 1986-2014 de 728,81 km².

En cuanto a los datos hidrológicos, dentro del análisis del total de años de información disponible se obtuvo una pendiente de la recta positiva (Gráfico 8). Esta pendiente representa finalmente que a pesar de que dentro de cada período la tendencia era decreciente, para el total de años acumulados la tendencia fue creciente.

2. Comparación de la degradación CUS acumulada vs nivel medio del río

En la Tabla 14 se presenta la comparación entre la degradación acumulada del suelo en cada período contra el nivel medio del cauce principal en los mismos períodos. La finalidad de presentar este análisis es poder visualizar la respuesta que tiene el nivel del río frente a los procesos de degradación. Se puede observar que la degradación incrementa con el tiempo. En un inicio la superficie degradada se calculó por 551,29 km² y este valor creció hasta alcanzar los 729,91 km², lo que representa el 23,52%,

aproximadamente una cuarta parte del área total de la cuenca. En cuanto al otro fenómeno, se puede observar que el nivel medio del cauce principal, el río Guayllabamba se mantuvo en 1 m. La variación entre un período y otro es de apenas unos centímetros.

Tabla 14
Comparación Degradación CUS acumulada vs Nivel medio de agua

Período	Degradación CUS acumulada (km ²)	Nivel medio del río (m)
1	551,29	1,07
2	503,32	1,00
3	583,13	1,18
4	796,76	1,25
5	729,91	1,11

Fuente y elaboración propias

Al realizar la gráfica de ambos fenómenos respecto al tiempo medido en los cinco períodos estudiados, se obtuvo un hallazgo en el que las curvas de ambas gráficas tienen un alto grado de similitud en cuanto a su forma. Esto se presenta en los Gráficos 9 y 10 y demuestra que existe una correspondencia entre ambos fenómenos. Se puede observar que existe una proporcionalidad directa entre la degradación y el nivel que alcanza el río.

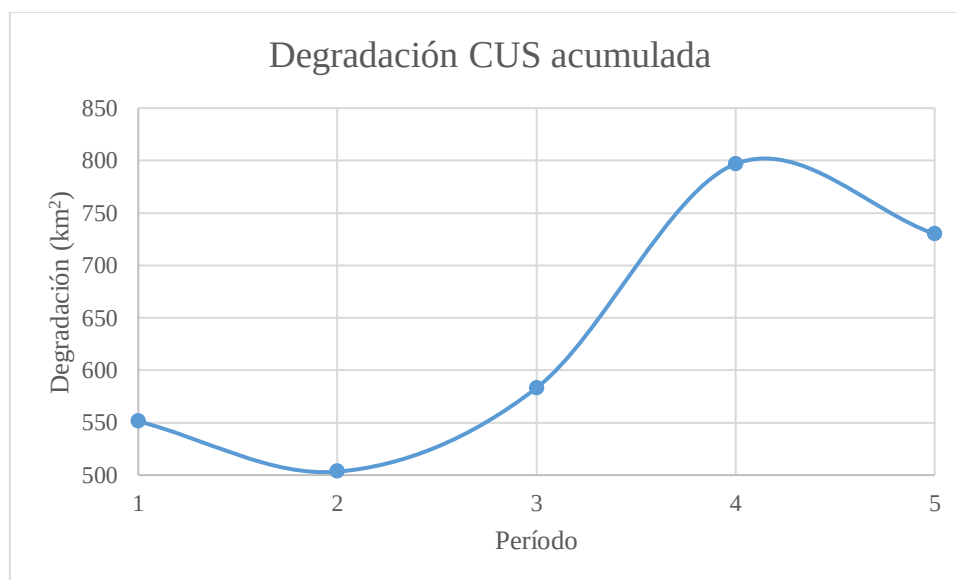


Figura 26. Degradación CUS acumulada
Fuente y elaboración propias

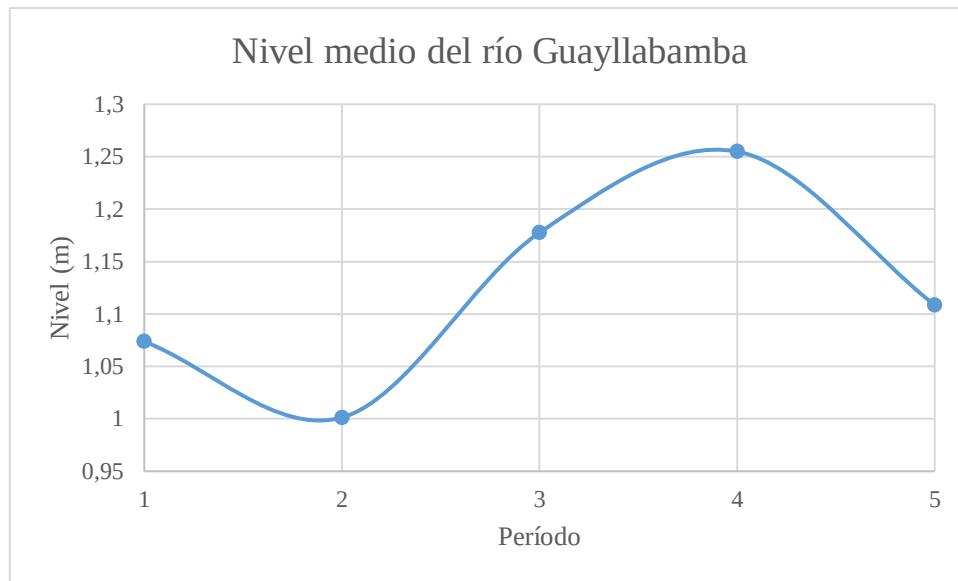


Figura 27. Nivel medio del río
Fuente y elaboración propias

A pesar de existir una coincidencia en la forma de las curvas de los Gráficos 9 y 10, que demuestra relativamente que existe la correlación entre ambos fenómenos. Debido a que la variación de nivel de unos cuantos centímetros en un río como el Guayllabamba que es aprovechado para generación hidroeléctrica, se considera este resultado como no representativo. Esto se puede complementar con los resultados obtenidos de la pendiente de la regresión lineal calculada de los datos hidrológicos en cada nivel, donde el valor de la misma en todos los casos es de cero con unas pocas diez milésimas o cien milésimas. Resultados de pendiente con valor de cero, muestran que la variación del nivel entre un período y otro no se considera significativo para poder establecer una correlación entre estos dos fenómenos.

Conclusiones

La variación de la cobertura y ocupación del suelo, tal como se presenta en el Gráfico 2, presenta dos coberturas con más alteraciones. Estas son el bosque y el suelo agrícola; el resto de las coberturas presentan variaciones, pero no son tan marcadas como las dos primeras. El bosque pierde aproximadamente 600 km² de terreno, que es la superficie que incrementa el suelo agropecuario en el mismo período de tiempo. Por su parte, una tercera cobertura a tener en consideración es la zona urbana, pues esta inicia con 19,82 km² y termina con 96,94 km² para el final del tiempo de estudio.

Las tendencias de crecimiento y decrecimiento de las dos principales coberturas se corresponden a lo descrito por la FAO en su Evaluación de los recursos forestales mundiales (2020), donde se explica que a nivel mundial se están reemplazando velozmente superficies de bosques por superficies productivas. En la cuenca confluye la presión del crecimiento poblacional, el aumento de la frontera urbana y de las áreas de producción agrícola y pecuaria. El manejo de las superficies debe plantearse desde la perspectiva de un territorio hidrosocial, donde la gestión de las mismas, así como la distribución y ocupaciones deben decidirse de manera compartida tanto entre autoridades como entes de control, productores y la población en general.

La degradación en el área de estudio es mayor a la recuperación dentro de todos los años analizados. De mantenerse esta tendencia se espera que el uso de suelo más afectado que es el de bosque termine siendo reemplazado en su mayoría por tierras agropecuarias en los próximos años. A pesar de las altas tasas de degradación que se evidencian en cada período, es importante destacar que también existen superficies que se han ido recuperando con el tiempo. En la Tabla 13 se puede comparar los resultados de degradación versus los de recuperación, donde se muestra que la degradación presenta una tendencia decreciente con el tiempo, pero siempre es mayor a la recuperación.

Los datos hidrológicos utilizados para el presente estudio no brindan confianza en cuanto a su temporalidad y continuidad. Para este trabajo se tuvo que trabajar únicamente con los datos de la estación hidrológica que se encuentra al cierre de la cuenca, limitando el análisis considerablemente. Las demás estaciones hidrológicas no presentaban información útil para el estudio planteado. Esta restricción de información provocó que se pierda mucha precisión en el análisis hidrológico, llegando a obtenerse resultados poco confiables sobre las tendencias de crecida de los cuerpos de agua. Por lo tanto, se ha

considerado como no representativa esta información para este trabajo; sin embargo, se han realizado los análisis planteados para revisar los resultados obtenidos.

Dicho lo anterior, se pudo descubrir que había una ligera variación en la pendiente de la regresión lineal de los datos de nivel del río Guayllabamba. Esta variación de la pendiente era menor al 1 %, con una mayor tendencia a acercarse al cero. Adicionalmente, se puede considerar que la variación en altura estaba en el rango de los centímetros. Mucho de este error puede deberse también al poco o nulo mantenimiento de estas estaciones hidrológicas, variaciones en la topografía del cauce, alteraciones del lecho del cuerpo de agua, etc.

Al realizar la comparación entre las variaciones de CUS y el registro histórico de datos hidrológicos en la cuenca se encontró que existe una correlación leve entre ambos fenómenos dentro de la cuenca. Esto se puede evidenciar en la Tabla 13 así como en las Gráficas 9 y 10, donde la curva de los procesos de degradación se asemeja a la curva del nivel medio del cauce principal. Sin embargo, se ha desestimado esta correlación debido a la poca fiabilidad de la variación del nivel medio del río. La principal razón por la que no se considera significativo este resultado es la variación del valor de pendiente de las rectas de los histogramas calculadas para cada período, con valores decimales muy bajos, como se explicó en la discusión de resultados.

La tendencia de degradación del suelo y sus coberturas en el área de estudio no augura un buen futuro para la central hidroeléctrica Manduriacu (65 MW de potencia) que se encuentra al cierre de la cuenca. La tentativa correlación entre los procesos de degradación del suelo y los regímenes hidrológicos es un tema que debe seguirse estudiando en esta cuenca con el fin de establecer los posibles perjuicios de estas tendencias de deforestación e incremento de la frontera agrícola y pecuaria.

Hoy en día las principales infraestructuras hidroeléctricas del país no están operando a su máxima capacidad y los problemas crecientes del cambio climático seguirán afectando a estas centrales con el pasar del tiempo. El principal recurso del que se vale esta fuente de generación de energía es el agua, recurso que escasea en épocas de estiaje tal como se lo vivió en los meses de abril y mayo de 2024. En ese entonces se vivió una gran ausencia de lluvias a nivel regional que provocó que muchos de los ríos que alimentan a las hidroeléctricas del país se vieran con niveles de caudales muy bajos. Más allá de la dependencia del país por esta fuente de producción de electricidad y de la cuestionable capacidad de respuesta ante estos eventos que han sabido tener los gobiernos de turno, se marca la importancia de estudiar estos recursos hídricos para poder establecer

las mejores estrategias de cuidado y recuperación de los cuerpos de agua y de los ecosistemas con los que se interrelaciona.

Obras citadas

- Abad-Auquilla, Katherine. 2020. "El cambio de uso el suelo y la utilidad del paisaje periurbano de la cuenca del río Guayllabamba en Ecuador". *Tropical Journal of Environmental Sciences* 54(2): 68-91. doi:10.15359/rca.54-2.4
- Bajocco, S., A. De Angelis, L. Perini, A. Ferrara y L. Salvati. 2012. "The impact of land use / land cover changes on land degradation dynamics: A mediterranean case study". *Environmental Management* 49: 980-989. doi: 0.1007/s00267-012-98318
- Basso, F, E. Bove, S. Dumontet, A. Ferrara, M. Pisante, G. Quaranta y M. Taberner. 2000. "Evaluating environmental sensitivity at the basin scale through the use of geographic information systems and remotely sensed data: an example covering the Agri basin (Southern Italy)". *Catena* 40: 19-35. doi: 10.1016/S0341-8162(99)00062-4
- Bernal Nieto, Sandra Marcela, y Camilo Augusto Prado Uscátegui. 2015. "Análisis de la influencia de la cobertura vegetal en la generación de caudales de la cuenca de la quebrada Granadillo en los años 1993 y 2009 a partir de aerofotografías y cartografía del Instituto Geográfico Agustín Codazzi". Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia. <http://hdl.handle.net/10983/2722>
- Bosch, J.M., y J.D. Hewlett. 1982. "A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration". *Journal of Hydrology*, (55): 3-23. doi:10.1016/0022-1694(82)90117-2
- Buenaño Guerra, Xavier Eduardo. 2007. "Modelamiento del cambio de la cobertura de bosques montanos en la cuenca alta del río Guayllabamba para mejorar la gestión ambiental del área". Tesis de maestría, Universidad San Francisco de Quito. https://usfq.primo.exlibrisgroup.com/permalink/593USFQ_INST/1ce83a1/alma990000305890206366
- Dueñas Poveda, Lina María, y Diego Fernando Acosta Rueda. 2018. "Análisis de la influencia de la cobertura vegetal sobre la regulación hídrica en la cuenca del río Unete en el municipio de Aguazul-Casanare". Tesis de pregrado, Universidad de La Salle. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/753
- FAO. 2015. "Los suelos almacenan y filtran agua. Estas funciones contribuyen a la seguridad alimentaria y generan resiliencia ante inundaciones y sequías". Food

- and Agriculture Organization. <https://www.fao.org/soils-2015/resources/factsheets/es/>
- Galeana Pizaña, José Mauricio, Nirani Corona Romero y José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz. 2009. “Análisis dimensional de la cobertura vegetal-uso de suelo en la Cuenca del río Magdalena”. *Revista Ciencia Forestal en México* 34 (105): 137-158. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S140535862009000100007&script=sci_abstract
- Galicia, Leopoldo. 2014. “El cambio de uso de suelo: consecuencias en el ciclo hidrológico y la disponibilidad de agua”. *Revista de Educación y Cultura en México*, 1-8. https://www.researchgate.net/publication/263845334_El_cambio_de_uso_de_suelo_consecuencias_en_el_ciclo_hidrologico_y_la_disponibilidad_de_agua
- Gebremicael, T., Y. Mohamed, P. van der Zaag, E. Hagos. 2017. "Quantifying longitudinal land use change from land degradation to rehabilitation in the headwaters of Tekeze-Atbara Basin, Ethiopia". *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.034>
- Hernández Calderón, Luisa Nathalie, y Julián Alexander Salamanca Carvajal. 2019. “Análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal y su influencia en la generación de caudales pico de la cuenca Sardinata, del departamento de Norte de Santander-Colombia”. Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia. <https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/f3513ab0-100d-4cae7a78ecc98>
- Hommes, Lena, Rutgerd Boelens, Leila M. Harris, y Gert Jan Veldwisch. 2019. “Rural-urban water struggles: urbanizing hydrosocial territories and evolving connections, discourses and identities”. *Water International* 44 (2): 81-94. doi: 10.1080/02508060.2019.1583311
- Kosmus, Marina, Isabel Renner y Silvia Ullrich. 2012. Integrating Ecosystem Services into Development Planning-A stepwise approach for practitioners based on the TEEB approach. Eschborn: GIZ. <https://www.cbd.int/cepa/cepa-fair/2018/presentations/cepa-fair-2018-giz-values-pub.pdf>
- Logroño Logroño, Iván Santiago. 2018. “Percepción social de las poblaciones localizadas en la cuenca media del río Guayllabamba con respecto al cambio climático, espacios verdes y usos del suelo en la dinámica socio-espacial”. Tesis de pregrado,

- Pontificia Universidad Católica del Ecuador. <https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/21644>
- Lopez Fabara, Carmen Elena. 2016. "Evaluación hidrológica de la cuenca del río Coca en función del cambio de uso del suelo por medio del modelo SWAT". Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16892>
- Mendoza, Manuel, Gerardo Bocco, Erna López Granados, Miguel Bravo. 2002. "Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago Cuitzeo, Michoacán". *Investigaciones Geográficas* 49: 92-117. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112002000300007&lng=es&nrm=iso
- Meza Mori, Gerson, Cristóbal Torres Guzmán, Manuel Oliva-Cruz, Rolando Salas López, Gladys Marlo y Elgar Barboza. 2022. "Spatial Analysis of Environmentally Sensitive Areas to Soil Degradation Using MEDALUS Model and GIS in Amazonas (Peru): An Alternative for Ecological Restoration. *Sustainability* 14 (14866). <https://doi.org/10.3390/su142214866>
- EC Ministerio del Ambiente de Ecuador. 2013. "Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental". Subsecretaría de Patrimonio Natural. https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/09/LEYENDA-ECOSISTEMAS_ECUADOR_2.pdf
- EC Ministerio de Producción, Comercio Exterior, Inversiones y Pesca. 2024. "Boletín de cifras del sector productivo Febrero 2024". Ministerio de Producción, Comercio Exterior, Inversiones y Pesca. 28 de febrero. https://www.produccion.gob.ec/wp-content/uploads/2024/02/VFBoletinProduccion_FEBRERO2024.pdf
- Reyes Romero, Fernando Patricio. 2024. "Crisis energética en Ecuador: Origen, actualidad y alternativas para esta problemática". Universidad Bolivariana del Ecuador. 25 de abril. <https://ube.edu.ec/Pericias/articulo/23/Crisis%20energ%C3%A9tica%20en%20Ecuador:%20Origen,%20actualidad%20y%20alternativas%20para%20esta%20problem%C3%A1tica>
- Sanchis Ibor, Carles, y Rutgerd Boelens. 2018. "Gobernanza del agua y territorios hidrosociales: Del análisis institucional a la ecología política". *Cuadernos de Geografía* 101: 13-28. doi: 10.7203/CGUV.101.13718

- Sierra, Rodrigo. 2013. Patrones y factores de deforestación en el Ecuador continental, 1990-2010. Y un acercamiento a los próximos 10 años. Quito: Conservación Internacional Ecuador / Forest Trends. https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/imported/RSierra_Deforestaci%F3nEcuador1950-2020_180313.pdf
- Silva Rodríguez de San Miguel, Jorge Alejandro. 2019. Territorios Hidrosociales: Una revisión de la literatura. Alicante: 3 ciencias. Primera edición: 23-25 doi: 10.17993/EcoOrgyCso.2019.51
- Torres, Bolier, Richard Fischer, Julio C. Vargas y Sven Günter. 2020. Deforestación en paisajes forestales tropicales del Ecuador: bases científicas para perspectivas políticas. Puyo: Universidad Estatal Amazónica / Instituto Johann Heinrich von Thünen / INABIO. http://inabio.biodiversidad.gob.ec/wp-content/uploads/2021/01/LAFORET_WEB.pdf
- Valdivieso Reyes, Pablo Andrés. 2011. "Incidencia del cambio en el uso del suelo en los caudales; casos de estudio: Cuencas de los ríos Alambi, Intag y Quijos". Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4214>