ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

ESTUDIO COMPARATIVO DEL COSTO A LA DEFORESTACIÓN EN LA AMAZONÍA ECUATORIANA FRENTE AL BENEFICIO OBTENIDO DE LA EXPLOTACIÓN PETROLERA

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL

JORDAN ANDRES CRUZ CHICO
jordan.cruz@epn.edu.ec

Director: Dr. XAVIER EDUARDO ZAPATA RÍOS
xavier.zapata@epn.edu.ec

Codirectora: Ing. MARÍA CRISTINA TORRES GUERRÓN
maria.torresg@epn.edu.ec

Quito, Marzo 2019

DECLARACIÓN

Yo, Jordan Andres Cruz Chico, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

_____

JORDAN ANDRES CRUZ

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Jordan Andres Cruz Chico, bajo nuestra supervisión.

_____	_____
Dr. Xavier Zapata Ríos	**Ing. María Cristina Torres**
DIRECTOR DE PROYECTO	**CODIRECTORA DE PROYECTO**

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, por ser un ejemplo de disciplina y perseverancia, por darme todas las herramientas para crecer; y, por apoyarme incondicionalmente con mucho amor.

A mi hermana, por ser mi compañera de vida, con su incondicional complicidad.

A mi padre, porque a pesar de la distancia siempre sentí su apoyo y su experiencia guiándome.

A mi mejor amiga, colega, compañera y reto intelectual; por tantos buenos y malos momentos, por emocionarte al escucharme y enseñarme tantas otras cosas.

A mis hermanos y hermanas panchos, quienes me han apoyado desde siempre con sus aventuras e insuperable amistad.

Al resto de mi gran familia, por sus consejos y mejores deseos.

Al Dr. Xavier Zapata Ríos, a la Ing. María Cristina Torres, y al MSc. Marlon Calispa quienes despojados de cualquier egoísmo me han compartido su experiencia y me han permitido humildemente aprender.

A todas las amistades forjadas en la Universidad, con los cuales crecimos juntos académicamente y ansío volver a trabajar. Mi eterna admiración.

A las colegas y colaboradores del DICA, por aportar con ideas y soluciones cuando más lo necesitaba. Se han convertido en grandes amigos

A todas las instituciones: NASA, MAG, BCE y ARCH, que me brindaron información oportuna e indispensable para la consecución de este proyecto

A todos los seres con los que he tenido el gusto de coincidir durante estos años universitarios: en las aulas, en las pasantías, en los festejos más alocados, en las noches sin dormir y en las calles luchando. Por creer en mí y en el cambio que juntos podemos lograr.

Finalmente, a toda la comunidad científica. Ya que, parafraseando a Newton, si yo hoy puedo ver un poco más lejos, es porque estoy sentado sobre los hombros de gigantes; fielmente representada a través de la comunidad politécnica con mi querida alma máter, la Escuela Politécnica Nacional.

A todos y cada uno, ¡Gracias!.

DEDICATORIA

A mi madre, por su sacrificio y ejemplo. ¡Lo logramos!

CONTENIDO

DECLARACIÓN ii
CERTIFICACIÓN iii
AGRADECIMIENTOS iv
DEDICATORIA v
CONTENIDO vi
ÍNDICE DE TABLAS viii
ÍNDICE DE FIGURAS ix
SIGLAS xi
RESUMEN xiii
ABSTRACT xiv
PRESENTACIÓN xv
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN 1
1.1. ANTECEDENTES 1
1.2. OBJETIVOS 4
1.2.1. OBJETIVO GENERAL 4
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 4
1.3. ALCANCE 4
1.4. JUSTIFICACIÓN 5
1.5. ÁREA DE ESTUDIO 7
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE 14
2.1. MARCO TEÓRICO 14
2.1.1. AMAZONÍA 14
2.1.2. INDUSTRIA PETROLERA 15
2.1.3. DEFORESTACIÓN 21
2.1.4. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN LA AMAZONÍA 21
2.1.5. DETECCIÓN REMOTA 22
2.1.6. ECONOMÍA Y AMBIENTE 26
2.2. ESTADO DEL ARTE 32
2.2.1. EJE DE INVESTIGACIÓN 32

2.2.2. DOCUMENTOS REVISADOS 32
2.2.3. PRINCIPALES HALLAZGOS 34
2.2.4. DIAGNÓSTICO 36
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA 38
3.1. RECOPILACIÓN INFORMACIÓN BASE 39
3.1.1. DELIMITACIÓN GEOGRÁFICO-TEMPORAL 39
3.1.2. PRODUCCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DE PETRÓLEO 40
3.1.3. INFORMACIÓN GEOGRÁFICA 40
3.2. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN 49
3.2.1. CONSTRUCCIÓN POLÍGONO ÁREA DE INTERÉS 49
3.2.2. CUANTIFICACIÓN GANANCIAS PETROLERAS HISTÓRICAS 49
3.2.3. TRATAMIENTO IMÁGENES SATELITALES 50
3.2.4. ANÁLISIS DE AGRUPAMIENTO 77
3.2.6. ANÁLISIS COSTO – BENEFICIO SOCIAL 79
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN 84
4.1. POLÍGONO ÁREA DE ESTUDIO 84
4.2. PRECISIÓN DE LOS MAPAS OBTENIDOS 85
4.3. GANANCIAS PETROLERAS HISTÓRICAS 87
4.4. CAMBIO DE COBERTURA TERRESTRE 90
4.5. ÁREAS DEFORESTADAS 93
4.6. CONSERVACIÓN FRENTE AL DESARROLLO DE LA INDUSTRIA PETROLERA 97
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 104
5.1. CONCLUSIONES 104
5.2. RECOMENDACIONES 106
REFERENCIAS 107
ANEXOS 113

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: SERVICIOS ECOSITÉMICOS DEL BOSQUE AMAZÓNICO 22
TABLA 2: RECOPILACIÓN BIBLIOGRÁFICA 33
TABLA 3: CARACTERIZACIÓN MISIONES LANDSAT 42
TABLA 4: CARACTERÍSTICAS NIVELES DE DESCARGA 44
TABLA 5: IMÁGENES DESCARGADAS Y SATÉLITES FUENTE 46
TABLA 6: IMÁGENES SIN NUBOSIDAD EN EL ÁREA DE ESTUDIO 47
TABLA 7: COORDENADAS WGS84 UTM ZONA 18 SUR CORRESPONDIENTES AL BLOQUE 61 49
TABLA 8: IMÁGENES LANDSAT CORREGIDAS GEOMÉTRICAMENTE 53
TABLA 9: DIFERENCIAS INTERSATELITALES DE LOS DATOS DESCARGADOS SIN NUBOSIDAD 54
TABLA 10: PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN PARA LAS 4 APROXIMACIONES DOS 58
TABLA 11: COMBINACIONES RGB PARA IMÁGENES UTILIZADAS 67
TABLA 12: CONFIGURACIONES CENTRO DE BANDA EN EL JUEGO DE BANDAS DE SCP 68
TABLA 13: EJEMPLO DE UNA MATRIZ DE ERROR 77
TABLA 14: SHAPES DIBUJADOS PARA EXTRACCIÓN 78
TABLA 15: CRITERIOS DE SELECCIÓN 82
TABLA 16: MATRIZ DE ERROR DE LA CLASIFICACIÓN 2013 86
TABLA 17: APORTE DE LOS INGRESOS PETROLEROS DEL BLOQUE 61 AL PRESUPUESTO GENERAL DEL ESTADO 90
TABLA 18: CUANTIFICACIÓN ÁREAS DEFORESTADAS 94
TABLA 19: MATRIZ COSTO-BENEFICIO SOCIAL 100

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: DEFORESTACIÓN DEL ECUADOR ENTRE 1990 – 2016 2
FIGURA 2: BLOQUES PETROLEROS EN EL ECUADOR 9
FIGURA 3: LÍMITES POLÍTICOS, HIDROGRÁFICOS Y ECOLÓGICOS DE LA AMAZONÍA ECUATORIANA 11
FIGURA 4: DENSIDAD DE MAMÍFEROS, AVES Y ANFIBIOS..... 13
FIGURA 5: DELIMITACIÓN ECOLÓGICA DE LA AMAZONÍA 15
FIGURA 6: PROSPECCIÓN SÍSMICA MEDIANTE CAMIONES VIBRADORES..... 17
FIGURA 7: ESQUEMA BÁSICO DE PERFORACIÓN DE UN POZO..... 19
FIGURA 8: DIAGRAMA DE LA REFINACIÓN DEL CRUDO, CON: PROCESOS GENERALES, PROCESOS ESPECÍFICOS Y PRODUCTOS OBTENIDOS..... 20
FIGURA 9: NATURALEZA ELECTROMAGNÉTICA DE LA RADIACIÓN SOLAR 23
FIGURA 10: PRINCIPALES ELEMENTOS DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA 24
FIGURA 11: VENTANA ATMOSFÉRICA..... 25
FIGURA 12: INTERACCIÓN ATMOSFÉRICA DE LA RADIACIÓN Y RECEPCIÓN FINAL POR EL SENSOR 25
FIGURA 13: TIPOS DE VALOR Y MÉTODOS DE CÁLCULO 29
FIGURA 14: OPERACIONES PRINCIPALES Y PRODUCTOS OBTENIDOS 38
FIGURA 15: DELIMITACIÓN ÁREA DE ESTUDIO EN EL PORTAL DE DESCARGA 43
FIGURA 16: MOSAICO ÁREA DE ESTUDIO 45
FIGURA 17: LINEA TEMPORAL DEL PERIODO DE ESTUDIO Y LA INFORMACIÓN SATELITAL DISPONIBLE..... 48
FIGURA 18: RECORRIDO DE LA RADIACIÓN..... 55
FIGURA 19: CALIBRACIÓN RADIOMÉTRICA Y CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA EN QGIS CON EL PLUGIN SCP..... 60
FIGURA 20: CLASES SELECCIONADAS Y CREADAS POR DEFECTO 61
FIGURA 21: IMAGEN SATELITAL SIN CLASIFICAR Y CLASIFICADA..... 62
FIGURA 22: VECTOR CARACTERÍSTICO IMÁGENES 2-D Y 3-D 63
FIGURA 23: COMPOSICIÓN DE UNA IMAGEN SATELITAL..... 64
FIGURA 24: FCO. DE ORELLANA Y PARTE DE LA ZONA DE ESTUDIO A COLOR REAL AÑO 2013 65

FIGURA 25: FCO. DE ORELLANA Y PARTE DE LA ZONA DE ESTUDIO A FALSO COLOR AÑO 2013 65
FIGURA 26: FIRMAS ESPECTRALES PARA SUELO, VEGETACIÓN Y AGUA..... 66
FIGURA 27: PARTE DE LA ZONA DE ESTUDIO CON ÁREAS DE ENTRENAMIENTO DIBUJADAS CON POLÍGONOS (1) Y CON EL ALGORITMO DE REGIÓN INCREMENTAL (2)..... 69
FIGURA 28: GRÁFICO DE FIRMAS ESPECTRALES 71
FIGURA 29: PREVISUALIZACIÓN DE PARTE DE LA ZONA DE ESTUDIO CLASIFICADA 71
FIGURA 30: BLOQUE 61 CON PUNTOS ALEATORIOS Y ORTOFOTOGRAFÍAS DE FONDO..... 75
FIGURA 31: CORRESPONDENCIA POSITIVA PARA EL PUNTO MUESTRAL 82 CORRESPONDIENTE A LA CLASE “SUELO” 76
FIGURA 32: REPORTE DE CLASIFICACIÓN 78
FIGURA 33: PONDERACIONES FINALES PARA CASOS POSITIVO Y NEGATIVO..... 83
FIGURA 34: POLÍGONO ÁREA DE ESTUDIO 85
FIGURA 35: PRODUCCIÓN HISTÓRICA EN EL BLOQUE 61 EN MILES DE BARRILES DE PETRÓLEO 88
FIGURA 36: PRECIO HISTÓRICO DEL CRUDO ORIENTE..... 89
FIGURA 37: CAMBIOS DEL USO DE SUELO EN EL BLOQUE 61 92
FIGURA 38: VARIACIONES PORCENTUALES DEL ÁREA ÚTIL..... 95
FIGURA 39: TASAS DE CAMBIO DEL BOSQUE EN EL BLOQUE 61..... 96
FIGURA 40: ESCENARIOS Y PONDERACIONES FINALES..... 103

SIGLAS

AIHE	Asociación de Industriales Hidrocarburíferos del Ecuador
ANE	Antes de nuestra era
API	American Petroleum Institute
BCE	Banco Central del Ecuador
CALTECH	California Technology
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CEPE	Corporación Estatal Petrolera Ecuatoriana
CIUP	Centro de Investigación Universidad del Pacífico
DEM	Digital Elevation Model
DN	Digital Number
DOS	Dark Object Substraction
EP	Empresa Pública
EROS	Earth Resources Observation and Science
ESA	European Space Agency
ETM+	Enhanced Thematic Map
FCO de Orellana	Francisco de Orellana
GADPO	Gobierno Autónomo Descentralizado de Orellana
GCP	Ground Control Points
ITC	Institute for Geo-Information Science and Earth Observation
IUCN	International Union for Conservation of Nature
MAE	Ministerio del Ambiente del Ecuador
MAGAP	Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca
MSS	Multispectral Scanner
NASA	North American Space Administration
NIR	Near Infrared
OLI	Operational Land Imager
OTCA	Organización del Tratado de Cooperación Amazónica
PCD	Points Correction Data
PIB	Producto Interno Bruto
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
QGIS	Quantum Geographic Information Systems
RGB	Red Green Blue
RMSE	Root Mean Square Error
ROI	Regions of Interest
RT	Real Time

S/D	Sin Datos
SCP	Semi-automatic Classification Plugin
SENPLADES	Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo
SIG Tierras	Sistema de Información Geográfica de tierras rurales
SLC	Scan Line Corrector
SWIR	Short Wave Infrared
TIFF	Tagged Image File Format
TIRS	Thermal Infrared Sensor
TM	Thematic Map
TOA	Top of Atmosphere
USD	United States Dollars
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator
WGS84	Worl Geodetic System 1984

RESUMEN

En el Ecuador, existe una constante discusión entre los beneficios económicos que genera la extracción de recursos petrolíferos y sus impactos ambientales que deterioran los ecosistemas, y por ende los servicios ecosistémicos que éstos proveen. En este contexto, el presente estudio evalúa el cambio de cobertura vegetal del bloque petrolero 61, también conocido como activo Auca, uno de los principales campos petroleros, por su producción y antigüedad. La deforestación se cuantificó mediante la clasificación de imágenes satelitales Landsat, obteniendo para el año 1986 que el 92% de su superficie es Bosque, 67% para el año 2002, 63% para el año 2013 y finalmente 72% para el año 2017. Además se evaluaron los beneficios económicos históricos provenientes de la venta del crudo, los cuales a partir de la dolarización del Ecuador, han sido equiparables en promedio al 5,73% del presupuesto general del estado. Finalmente se ejecutó un análisis costo-beneficio social, mediante un análisis espacial. En este análisis se evaluaron 4 escenarios hipotéticos bajo determinados criterios de selección, cuya ponderación final puede ser un resultado entre -5 y 8. Se obtuvo que la deforestación durante 31 años de explotación petrolera significó una reducción del bienestar social desde un valor de 3,10 a 1,25. Además, se obtuvo aquel escenario viable en el que se maximice el beneficio social, un escenario hipotético en el que la masa forestal actual se incrementa en aproximadamente un 10% y consecuentemente el bienestar social asciende a 1,80.

ABSTRACT

In Ecuador, there is a constant discussion between the economic benefits generated by the extraction of petroleum resources and their environmental impacts that deteriorate the ecosystems, and the services they provide. In this context, the present study evaluates the change in vegetation cover of oil block 61, also known as Auca, one of the main oil fields due to its production and age. Deforestation was quantified through the classification of Landsat satellite images, obtaining a forest coverage of 92% for the year 1986, 67% for the year 2002, 63% for the year 2013 and finally 72% for the year 2017. In addition, historically the sale of crude oil has represented 5,73% for Ecuador´s budget since the year 2000. Finally, a social cost-benefit analysis was carried out through a spatial analysis. In this analysis, 4 hypothetical scenarios were evaluated under certain selection criteria, whose final weighting can be a result between -5 and 8. It was obtained that deforestation during 31 years of oil exploitation meant a reduction of social welfare from a value of 3,10 to 1,25. In addition, that viable scenario was obtained in which the social benefit is maximized, a hypothetical scenario in which the current forest mass increases by approximately 10% and consequently the social welfare amounts to 1,80.

PRESENTACIÓN

El presente estudio cuantifica la deforestación del bloque petrolero 61, mediante la clasificación de imágenes satelitales. Además, recopila la información económica vinculada a la producción petrolera en el mismo bloque. Se consideran 5 capítulos, detallados a continuación.

El Capítulo 1 es introductorio, en el cual se plantea el problema desde una recopilación de los principales impactos socioambientales de la industria petrolera, se definen los objetivos, se establece el alcance del presente estudio, así como su justificación práctica, y finalmente se describe brevemente el área de estudio.

El Capítulo 2 referente al marco teórico. Recopila información respecto a la formación y caracterización de la amazonía ecuatoriana, como se desarrolla la industria petrolera, información relevante acerca de la deforestación local, los servicios ecosistémicos que brinda el bosque tropical amazónico y un breve repaso acerca de las herramientas utilizadas. Finalmente, en este capítulo se muestra el estado del arte, donde se reseña la información bibliográfica consultada y los conocimientos de vanguardia respecto a este eje de investigación.

El Capítulo 3 se describe a detalle todos los métodos utilizados en el presente estudio, de una forma secuencial para obtener productos que satisfagan los objetivos planteados.

El Capítulo 4 expone los resultados obtenidos. Entre ellos, los beneficios económicos procedentes del área de estudio, los mapas producidos a partir de imágenes satelitales; y finalmente, el análisis costo beneficio que permite comparar el desarrollo industrial con la conservación ambiental.

Finalmente, en el capítulo 5. Se muestran las conclusiones finales generadas mediante la presente investigación y recomendaciones para posteriores investigaciones.

CAPÍTULO 1
INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

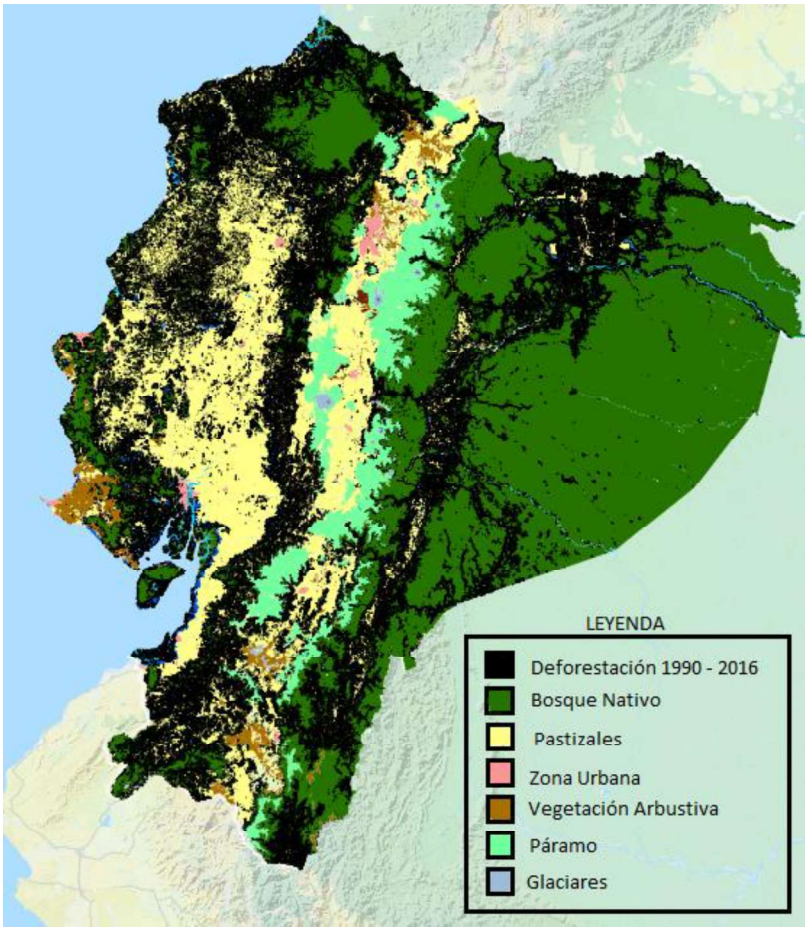
En países en vías de desarrollo, como el Ecuador las principales causas de la deforestación tropical son el crecimiento poblacional y la pobreza (Cayuela, 2006). La población creciente en determinadas zonas de la amazonía ecuatoriana, primero ejerce procesos de intensificación del suelo para obtener alimento y extraer recursos, cuando el suelo estanca su productividad en gran parte debido a la falta de agrotecnología, se da el proceso de extensificación en el cual se deforestan grandes zonas para cubrir la demanda de productos alimenticios o commodities industriales. Por otra parte, la extracción de un recurso natural como la madera a una tasa superior a la de la reforestación, produce un declive del ecosistema originado por la sobre explotación del recurso (Mena, 2010).

La cuantificación de la deforestación en la región ha sido ampliamente estudiada; Achárd et al. (2002) determinó para América Latina una tasa anual de deforestación de 0,38% en el período 1991 – 1997, Skole y Tucker (1993) determinaron para la cuenca Amazónica en su totalidad una tasa de deforestación de 21.000 km² por año para el período 1978 – 1988, Wasserstrom y Souhtgate (2013) concluyeron que en la amazonía ecuatoriana la tasa anual de deforestación es de 0,53 % para el período 1965 – 2000, López, Espíndola, Calles, y Ulloa (2013) concluyeron para la amazonía ecuatoriana una tasa anual del 0,28% para el período 2000 – 2010, CEPAL y Patrimonio Natural (2013) hallaron que la tasa de deforestación anual de selva amazónica ecuatoriana es de 0,28% para el período 1980 – 2000.

El Ministerio del Ambiente (2013) ha determinado una tasa de deforestación de 77.647 ha/año para el período 2000 – 2008, mientras que en el período 2008 – 2012 se deforestaron 65.880 ha/año (Fig. 1). A pesar de que existe una tendencia de disminución de la tasa de deforestación la magnitud de bosques deforestados continúa siendo una preocupación, establecida en el marco de los

objetivos del Plan Nacional del Buen Vivir (MAE, 2014). Además, se han identificado que los índices más altos de deforestación en el Ecuador se dan en la región Amazónica debido a la explotación petrolera y expansión de la frontera agrícola, específicamente en la provincia de Orellana en el año 2012 se autorizó el aprovechamiento legal de 12.766,28 m³ de madera que representa el 12,42% del total nacional, posicionándose así como la tercera provincia con mayor cantidad de explotaciones madereras legales, Orellana es superada por las provincias de Sucumbíos y Esmeraldas (MAE, 2013).

FIGURA 1: DEFORESTACIÓN DEL ECUADOR ENTRE 1990 – 2016



Fuente: Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2013

La amazonía ecuatoriana según Finner, Jenkins, Pimm, Keane y Ross (2008) es una de las áreas más biodiversas del planeta en términos de plantas, insectos, anfibios, aves y mamíferos. Además, esta zona aloja grandes extensiones de bosque húmedo tropical virgen. Sin embargo, debido a los impactos negativos

originados por el desarrollo de la explotación petrolera y la colonización agrícola, la disputa entre conservación y desarrollo es una problemática recurrente (Mena, 2010). La explotación petrolera origina impactos ambientales negativos directos como: la deforestación para la construcción de caminos de acceso, plataformas de perforación y tuberías, fuentes de ruido e incidentalmente la contaminación de cuerpos de agua. Además, origina impactos indirectos como: facilitar el acceso a través de las carreteras a cazadores, madereros o asentamientos humanos ilegales (Finner et al., 2008). Sin embargo, como reseñan Wasserstrom y Southgate (2013) la industria petrolera no es la única que ha originado impactos negativos en la amazonía ecuatoriana, se ha determinado que otro impulsor de la deforestación ha sido la agresiva política gubernamental de desarrollo agrícola y colonización, impulsada desde finales del siglo XIX.

Por otra parte, es indiscutible la importancia de la industria petrolera en el Ecuador la cual durante la historia contemporánea; específicamente, entre los años 2000 y 2012 ha aportado anualmente en promedio un 12,7% al PIB del país y desde los 70s hasta la actualidad se ha consolidado como el principal producto de exportación (Mateo y García, 2014). La operación de este bloque también se encuentra empañada por los conflictos sociales generados, especialmente entre las comunidades indígenas y las empresas prestadoras de servicios. Por ejemplo, durante el 2017 se registraron varias protestas por parte de trabajadores pertenecientes a las comunidades indígenas, quienes reclaman presuntas condiciones laborales precarias, lo cual ha generado cuantiosas pérdidas y un clima de desconfianza en el interior del Bloque 61 (Wilson y Jarrin, 2017).

A pesar de la gravedad de las consecuencias de la deforestación y la importancia de la industria petrolera en el país, no existe información justificada técnicamente desde una perspectiva imparcial y objetiva, que englobe a ambos aspectos y los relacione, para poder extraer conclusiones veraces que permitan tomar decisiones debidamente informadas. El objetivo del presente estudio es comparar los beneficios obtenidos de las rentas petroleras y las consecuencias asumidas por la pérdida de los servicios ecosistémicos antes brindados por el bosque deforestado. Se evaluará la dinámica de la transformación de la cobertura vegetal;

específicamente, determinando la superficie deforestada directamente por la industria petrolera para la construcción de plataformas y facilidades, mediante el uso de imágenes satelitales multitemporales. Posteriormente, se cuantificará la producción e ingresos petroleros producidos en dichas zonas deforestadas. Finalmente, con los datos obtenidos de deforestación e ingresos petroleros, mediante un análisis introductorio se compararán los costos y beneficios de la industrialización de una zona biodiversa. Estos resultados se espera que contribuyan con elementos técnicos al debate entre desarrollo petrolero y conservación de la selva tropical, en la amazonía ecuatoriana.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Estudiar comparativamente el costo asociado a la deforestación en el bloque 61, amazonía ecuatoriana, frente al beneficio obtenido de la explotación petrolera mediante análisis cartográfico y determinación de posibles escenarios que aporten al entendimiento ambiental de esta zona.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener el cambio de cobertura vegetal multitemporal, mediante el procesamiento de imágenes satelitales, para cuantificar la superficie deforestada en la zona de interés.
- Evaluar la pérdida de los servicios ecosistémicos, mediante un análisis multicriterio, para realizar un análisis Costo – Beneficio Social.
- Determinar la relación Costo – Beneficio de la explotación petrolera, mediante la comparación de los resultados económicos de la valoración del servicio ecosistémico perdido y determinar el real impacto de la explotación petrolera en la amazonía ecuatoriana.

1.3. ALCANCE

La presente investigación de tipo comparativo cuantifica la deforestación de la selva tropical amazónica, para determinar en primer lugar el impacto de esta deforestación en la Amazonía Ecuatoriana y compararlo con el impacto económico positivo histórico de la industria petrolera en el Ecuador. Para lo cual la

investigación ha sido diseñada bajo un esquema documental; es decir, utilizar información bibliográfica para valorar los servicios ecosistémicos, cuantificar la producción petrolera; estudiar el cambio de cobertura vegetal mediante datos de acceso público y finalmente, mediante herramientas de economía ambiental, identificar los costos y beneficios que permitan comparar ambas alternativas.

Fue necesario delimitar espacial y temporalmente el presente estudio, debido a la cantidad de recursos que serían necesarios para la amazonía ecuatoriana en su totalidad; para lo cual geográficamente se ha seleccionado al bloque 61 también denominado Activo Auca, operativo en la actualidad, el cual se encuentra concesionado a la empresa estatal Petroecuador EP (2014). Evidentemente los efectos indirectos de la explotación petrolera se producen dentro y fuera del área delimitada del Bloque 61; sin embargo, este estudio analiza exclusivamente los efectos directos e indirectos contenidos sólo en el espacio geográfico descrito.

La cuantificación de la deforestación en el área anteriormente descrita se da mediante la clasificación digital de imágenes satelitales generadas por un sensor óptico satelital LandSat, cuya resolución es de 30 m x 30 m de tamaño de cada píxel; por lo cual superficies menores a 900 m^2 son imperceptibles para el sensor y por tanto no son tomadas en cuenta en el análisis.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Existe un conflicto entre desarrollo de la industria petrolera y la conservación de la selva tropical en la amazonía ecuatoriana. La selva tropical influye sobre el clima local y regional, captura el carbono que origina el cambio climático y regula el caudal de los ríos (Cayuela, 2006). En la amazonía ecuatoriana uno de los lugares más biodiversos del planeta, su función más importante es justamente la de albergar esa biodiversidad (Finner et al., 2008). Esta misma selva ecuatoriana de particular importancia, se encuentra enfrentada a la deforestación para las actividades petroleras de forma directa y de forma indirecta, a la deforestación causada por los colonos que ingresan por las mismas carreteras construidas para la extracción petrolera (Bravo, 2007). Las décadas de explotación petrolera y

colonización agrícola en uno de los lugares más biodiversos del planeta, han producido graves consecuencias ambientales y sociales; como destrucción de ecosistemas y hábitats, comunidades y pueblos (Mena, 2010). Sin embargo, a pesar de los conflictos socioambientales originados, la explotación petrolera desde 1972 ha tenido un papel protagónico en la sociedad ecuatoriana, especialmente en la economía nacional (Larrea, 2006).

A pesar de que el conflicto es claro y tan antiguo como la misma explotación petrolera en el Ecuador, no existen datos fiables que comparen la conservación y la extracción petrolera. Este estudio a través de la comparación por un lado de las consecuencias originadas por la deforestación petrolera y por el otro las ganancias originadas por la extracción del crudo amazónico, representa una herramienta para la toma de decisiones en el curso a seguir de la política petrolera nacional. Se destaca la conveniencia de este estudio en la coyuntura actual debido a que uno de los objetivos más ambiciosos del anterior gobierno del expresidente Rafael Correa, cuyo período de gobierno se dio entre 2007 y 2017, fue el de cambiar la economía nacional desde la producción de bienes primarios con poca o nula tecnificación como el crudo, hacia la producción diversificada, ecoeficiente y de mayor valor agregado. Aunque se lograron importantes avances en esa dirección, con mejoras en educación básica, carreteras, telecomunicaciones y energía renovable (SENPLADES, 2012) durante el 2017 el petróleo y sus derivados representaron el 53,2% de la exportaciones nacionales (BCE, 2018). Con lo cual es evidente en el mediano plazo la dependencia económica del país en esta industria extractivista.

Por tanto, entre los múltiples beneficiarios se encuentran principalmente los habitantes de la amazonía ecuatoriana quienes luchan por mejorar su calidad de vida; mediante, el acceso a agua, salud, a un ambiente sano; entre otros servicios básicos. Los habitantes de esta región llevan a cabo su lucha con medios insuficientes a través de sus propias organizaciones y con el limitado apoyo de organizaciones ambientalistas (San Sebastián y Hurtig, 2004). Además el artículo 408 de la Constitución del Ecuador, plantea que los hidrocarburos son de propiedad estatal (Asamblea Constituyente, 2008). Por ello, para todos los

ecuatorianos este estudio representa una herramienta cuantificable y verificable con la cual los grupos ecologistas pueden defender la preservación de los bosques; o en su defecto, los nuevos proyectos de exploración petrolera escoger zonas menos sensibles ante la deforestación.

1.5. ÁREA DE ESTUDIO

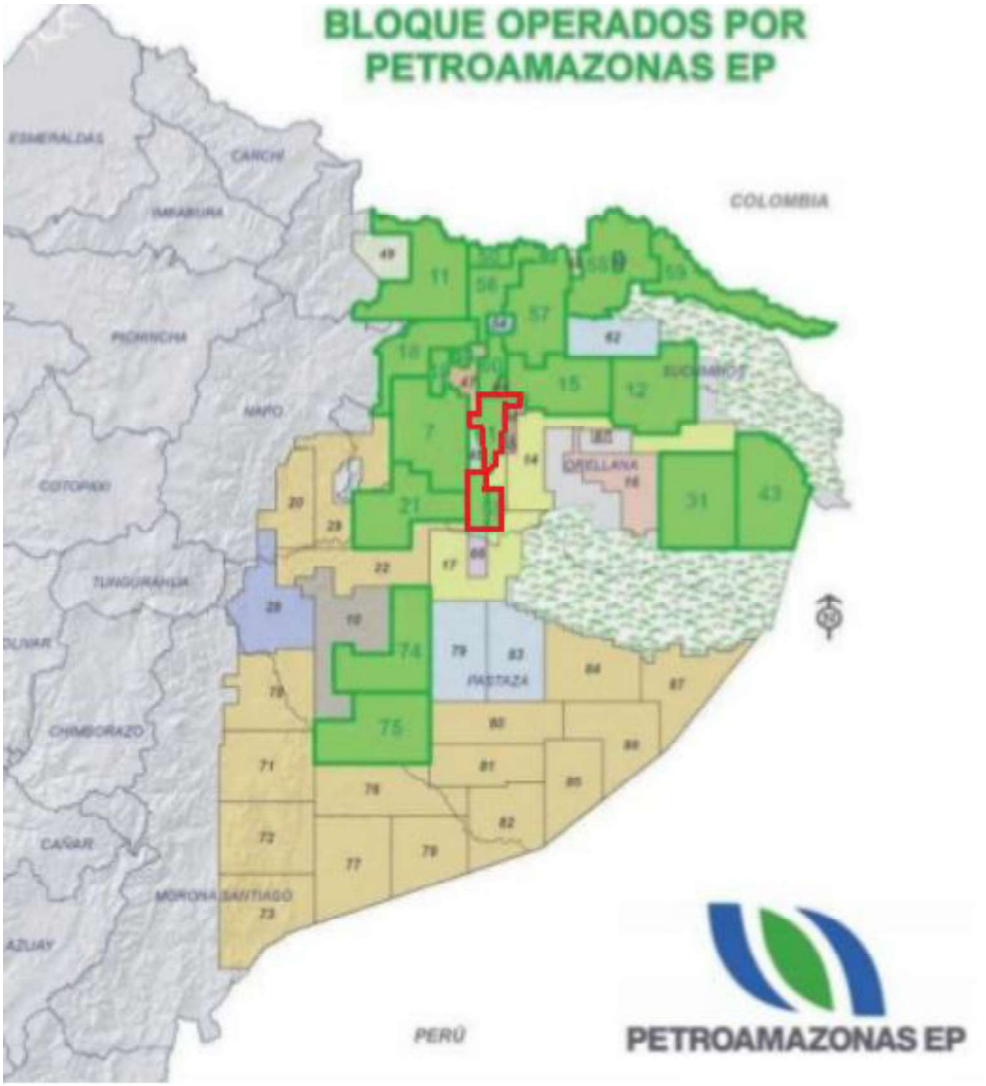
La zona geográfica por estudiarse se ubica en la provincia ecuatoriana de Orellana, en la amazonía ecuatoriana perteneciente a la Zona 2 de planificación administrativa nacional, específicamente el bloque 61 se ubica en las parroquias: El Dorado, Taracoa, García Moreno, Dayuma e Inés Arango; todas ellas pertenecientes al cantón Francisco de Orellana (ENVIROTEC, 2014). También conocido como Activo AUCA, el bloque 61 (Fig. 2) es un bloque petrolero maduro, en el año 2014 representó el 19% de la producción de todos los bloques operados por la Empresa Pública Petroamazonas Ep, solo superado por el área Shushufindi, con lo cual el Activo Auca se consolida como uno de los más productivos a nivel nacional (Araujo, 2015).

Es posible dividir la cuenca amazónica en dos vastas áreas, en función de los efectos antrópicos sobre sus ecosistemas: la amazonía oriental con una gran concentración territorial en Brasil, tiene una alta probabilidad de continuar con la deforestación masiva con fines madereros y alto riesgo de sufrir graves sequías en las próximas décadas. En contraste, la amazonía occidental ubicada en Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y el Occidente de Brasil aún conserva amplias zonas de selva tropical nativa y con alta probabilidad de mantener condiciones climáticas estables frente al cambio climático. Además, la amazonía occidental destaca por albergar etnias indígenas; entre ellas, algunos pueblos no contactados (Finner et al., 2008).

La amazonía ecuatoriana ha sido un espacio social durante miles de años en el que varias etnias han adaptado su forma de vida a la selva tropical (Mena, 2010). Existe evidencia que desde los años 3.500 y 300 ane en el Ecuador existía una transferencia cultural y comercial entre los pueblos de la costa pacífica, la

serranía y la cuenca amazónica (PNUMA, OTCA y CIUP, 2009). La región oriental ecuatoriana históricamente ha sido un territorio en disputa; durante la conquista, entre los exploradores en busca de “el dorado” o “el país de la canela” frente a la resistencia nativa. Posteriormente disputas eclesiales entre los virreinatos de Santa Fé, Lima y la Real Audiencia de Quito, y finalmente los conflictos armados entre Ecuador y Perú. Apenas en 1999 se colocaría el último hito fronterizo y la Región Amazónica Ecuatoriana quedaría completamente definida (López et al., 2013).

FIGURA 2: BLOQUES PETROLEROS EN EL ECUADOR

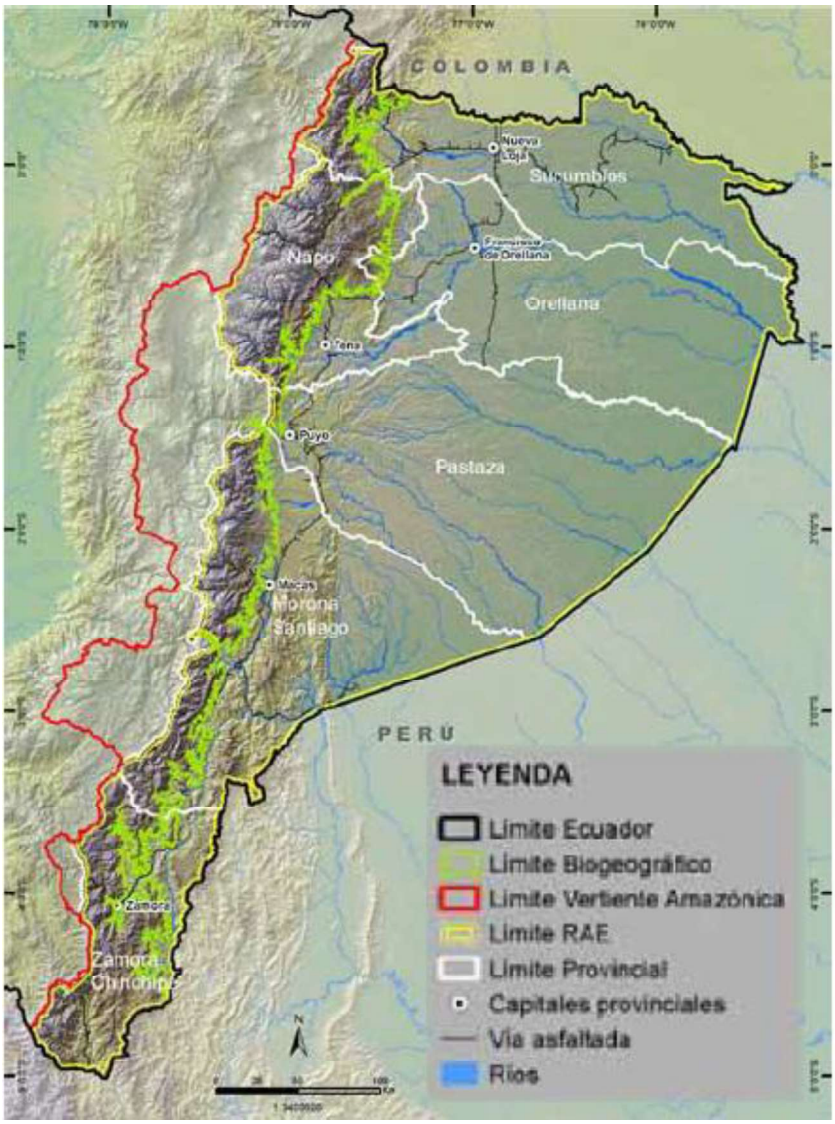


Fuente: Petroamazonas EP

En la amazonía ecuatoriana desde los primeros procesos de colonización, la economía de recursos extractivos ha sido el modo característico de especialización económica, las presiones generadas por la industria extractiva han sido magnificadas debido a que no han generado encadenamiento productivo, debido a la exclusiva producción de materias primas sin valor agregado como: energía eléctrica, minerales, madera o productos agrícolas. De esta forma las condiciones de pobreza y desempleo no han mejorado de acuerdo a lo esperado (López et al., 2013). Dichas presiones han sido posibles mediante dos formas de desarrollo que se han dado en la amazonía ecuatoriana. La primera se refiere a la apertura de carreteras para el avance de la industria petrolera que consecuentemente ha generado extracción de madera y posteriormente colonización agrícola. La segunda, se refiere a las políticas gubernamentales de colonización de la amazonía ecuatoriana, mediante las cuales se diseñaron varios planes estratégicos y se invirtieron grandes cantidades de dinero para ocupar y dominar la selva tropical (Wasserstrom y Southgate, 2013).

Siendo Ecuador uno de los ocho países que conforman la amazonía, de acuerdo al criterio ecológico, la superficie de la amazonía ecuatoriana es de 91.071 km² (Fig. 3), lo cual representa un poco más del 1% del total de la Amazonía; y a la vez, representa el 32,11% del territorio nacional (PNUMA et al., 2009). Por otra parte, conforme al criterio político – administrativo de delimitación de la región amazónica ecuatoriana, esta región con una extensión de 116.588, km² ocupa el 45,47% del territorio nacional, la provincia de Orellana concentrando el 18,6% del territorio es la tercera más grande entre las 6 provincias que comprenden la región amazónica (López et al., 2013). En Julio de 1998 por decreto ejecutivo se crea la Provincia de Orellana, cuya población en el 2010 era de 136.396 habitantes; su capital provincial se encuentra en el cantón Francisco de Orellana el cual concentra al 53,37% de población de la provincia además es el centro de actividades administrativas, económicas y sociales. También es necesario destacar la presencia de las nacionalidades Kichwa, Shuar, Waorani y Awá, los cuales en Francisco de Orellana en el año 2010 eran 19.404 habitantes distribuidos en 103 comunidades (GADPO, 2015).

FIGURA 3: LÍMITES POLÍTICOS, HIDROGRÁFICOS Y ECOLÓGICOS DE LA AMAZONÍA ECUATORIANA



Fuente: López et al., 2013

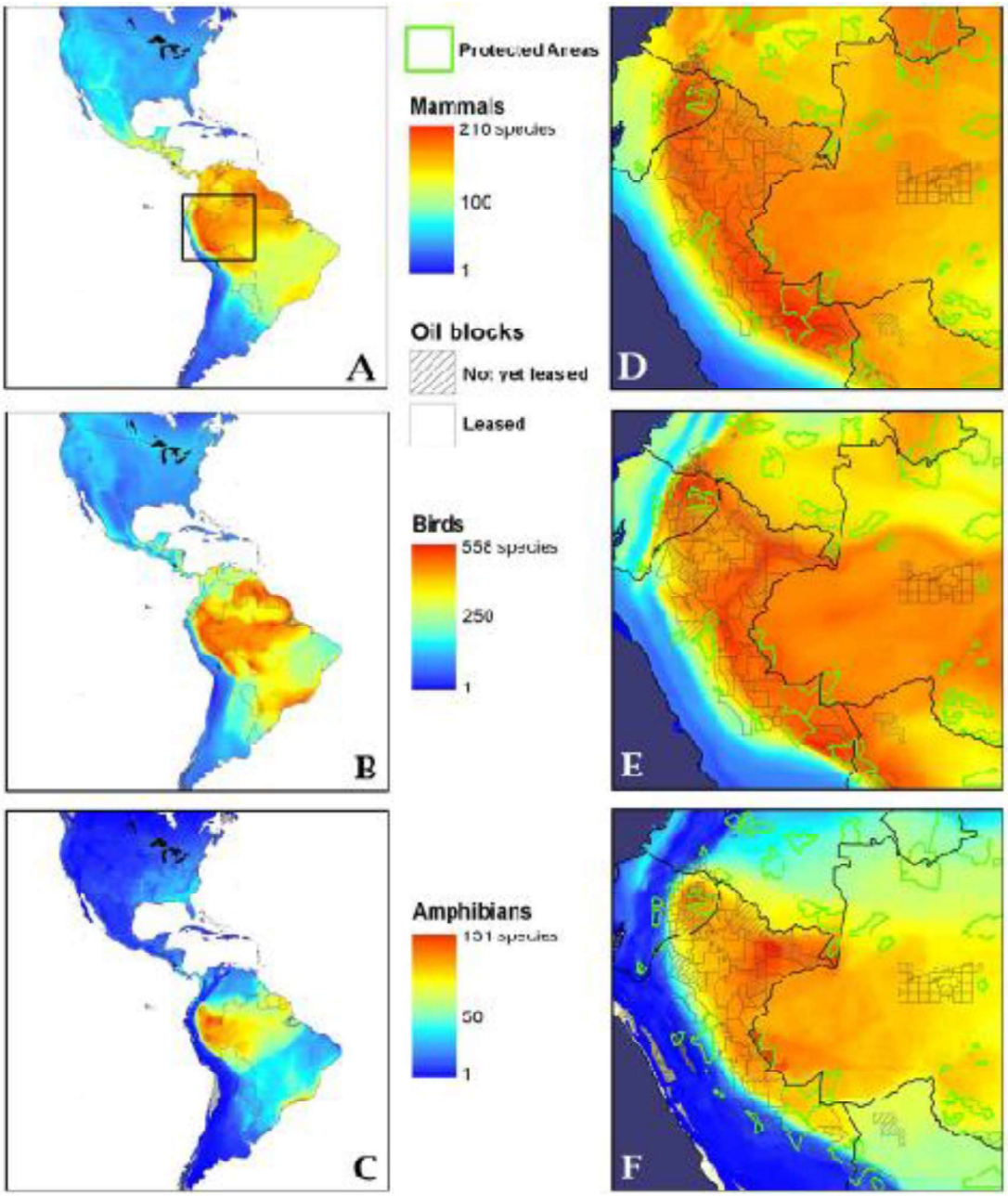
La población de la amazonía históricamente ha sido desatendida por los gobiernos de turno (San Sebastián y Hurtig, 2004) y en la actualidad la provincia de Orellana respecto a salud dispone de 12 médicos por cada 10.000 habitantes, ubicándose debajo del promedio nacional y muy por debajo de la tasa recomendada por la Organización Mundial de la Salud (23 médicos por cada 10.000 habitantes). Además, el 81% de la población es caracterizada como pobre

y aún más alarmante el 38% se encuentra por debajo del umbral de la pobreza extrema (GADPO, 2015).

Desde finales del 2015 la multinacional francesa SCHLUMBERGER, después de firmar con Petroamazonas un contrato de prestación de servicios específicos con financiamiento, se encarga del bloque 61. Aunque oficialmente el operador del bloque continúo siendo la Estatal Petrolera Ecuatoriana, Petroamazonas Ep (Araujo, 2015). Estas operaciones extractivistas se dan en medio de un ecosistema megadiverso, del cual dependen una gran cantidad de especies para su supervivencia, muchas de ellas hoy catalogadas como en peligro de extinción.

Debido a que la biodiversidad de la amazonía en su conjunto representa la mitad de la biodiversidad existente en todo el mundo, se destaca la presencia de muchos taxones de plantas, insectos, anfibios, aves y mamíferos, la vastedad de la biodiversidad Amazónica, se expresa en que una de cada cinco especies de mamíferos, peces, aves y árboles habitan este ecosistema (CEPAL y Patrimonio Natural, 2013); en la Figura 4 se muestra el hotspot de biodiversidad concentrado en la amazonía occidental, la cual presenta mejores características de conservación frente a la amazonía oriental (Finner et al., 2008).

FIGURA 4: DENSIDAD DE MAMÍFEROS, AVES Y ANFIBIOS.



Fuente: Finner et al., 2008

CAPÍTULO 2
MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. AMAZONÍA

Hace 100 millones de años, parte de la costa Atlántica de lo que hoy en día conocemos como América del Sur empezaba a separarse gradualmente del continente Africano, por dicha razón ambos territorios comparten hasta el día de hoy plantas y animales a niveles taxonómicos de género, familia y orden (PNUMA et al., 2009). Dicho territorio se denomina Escudo Guayanés y es la formación geológica sudamericana más antigua del continente (Armenteras y Villa, 2006). La emersión de la cordillera de los Andes y el elevamiento del escudo Guayanés formarían la cuenca estructural sedimentaria, conocida actualmente como la cuenca del Amazonas. Posteriormente, hace 4 millones de años el territorio sudamericano se conectaría físicamente con el norteamericano a través del istmo centroamericano, lo cual produce migración biótica en ambos sentidos y la fauna de la amazonía sufriría grandes cambios originados por animales provenientes del Norte (PNUMA et al., 2009).

La cuenca del Amazonas se encuentra distribuida en 8 países: Bolivia, Colombia, Ecuador, Guyana, Perú, Surinam, Venezuela y con un 64,3% del territorio concentrado en Brasil (PNUD, 2016). Es la cuenca hidrográfica más grande del mundo ocupando dos hemisferios del planeta, cuya longitud máxima es de 6.600 Km y en promedio descarga 230.000 m^3 de agua por segundo en el océano Atlántico. Esta cantidad de agua corresponde al 20% del agua dulce superficial no congelada del mundo (CEPAL y Patrimonio Natural, 2013).

La amazonía es un territorio heterogéneo, lo cual dificulta su delimitación; por tanto se han diseñado tres metodologías diferentes para delimitar geográficamente este gran bioma. Bajo criterios físicos, se ha delimitado hidrográficamente la cuenca del río Amazonas obteniéndose una superficie de

5´147.970 km². Bajo criterios político-administrativos, delimitando las provincias o estados amazónicos en cada país el área resultante es de 7´413.827 km²; y para fines prácticos del presente estudio la delimitación más importante se ha basado en criterios ecológicos, agrupando las áreas con similar cobertura forestal y abundante biodiversidad, obteniéndose una superficie de (Fig. 5) (PNUMA et al., 2009).

FIGURA 5: DELIMITACIÓN ECOLÓGICA DE LA AMAZONÍA

Fuente: PNUMA, 2009

2.1.2. INDUSTRIA PETROLERA

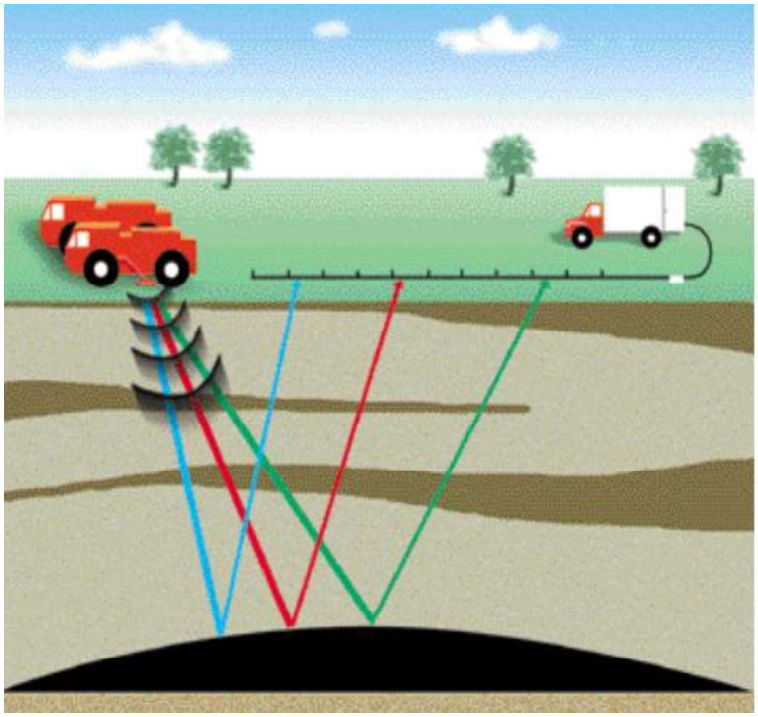
Se refiere al conjunto de actividades y procesos, que se encarga de determinar la presencia de petróleo, extraerlo, transportarlo y refinarlo. Sus procesos internos producen importantes consecuencias directas sobre el medio ambiente, entre las

principales se puede enumerar: deforestación, descargas de efluentes líquidos; y, producción de desechos peligrosos (Guédez, De Armas, Reyes y Galván 2003).

De acuerdo a Gómez y Roa (1999) el petróleo es una mezcla líquida negra y grasosa de varios hidrocarburos; se ha especulado su origen desde dos visiones: la orgánica y la inorgánica. En la primera, tras la extinción de organismos que vivieron hace millones de años; entre ellos, Dinosaurios; debido a, la intensa actividad volcánica e hidrológica los cuerpos fueron cubiertos de lodo y piedras, por lo cual, su descomposición se dio en un ambiente completamente anóxico y generó el petróleo. Por su parte la visión inorgánica; plantea, que bajo condiciones extremas de presión y temperatura en el subsuelo debido a la actividad terrestre; el Carbono, Hidrógeno, entre otros elementos reaccionaron y formaron los Hidrocarburos. Donde se da la formación del petróleo se denomina roca generadora, por efecto de la presión y mediante la presencia de rocas porosas designadas como rocas conductoras, el líquido y el gas alcanzan rocas muy porosas; que se denominan rocas almacenadoras. Cuando la roca almacenadora está rodeada de rocas sello; usualmente, arcillas o sal, se detiene su desplazamiento y se forma el yacimiento petrolero.

La exploración petrolera es el comienzo del proceso de explotación, y se define como la búsqueda de petróleo, aunque existen varios métodos basados en principios gravimétricos o magnéticos; el más utilizado es la prospección sísmica de reflexión. Este proceso consiste en diseñar una malla y enviar ondas; a través, de explosiones controladas o camiones vibradores (Fig. 6). Dichas ondas se transmiten por las capas del subsuelo y son reflejadas de vuelta a la superficie, al medir el tiempo y la forma cuando se recibe el reflejo, se infiere la geometría de las capas del subsuelo, determinando así los posibles yacimientos petroleros (Instituto Argentino de Petróleo y Gas, 2000).

FIGURA 6: PROSPECCIÓN SÍSMICA MEDIANTE CAMIONES VIBRADORES

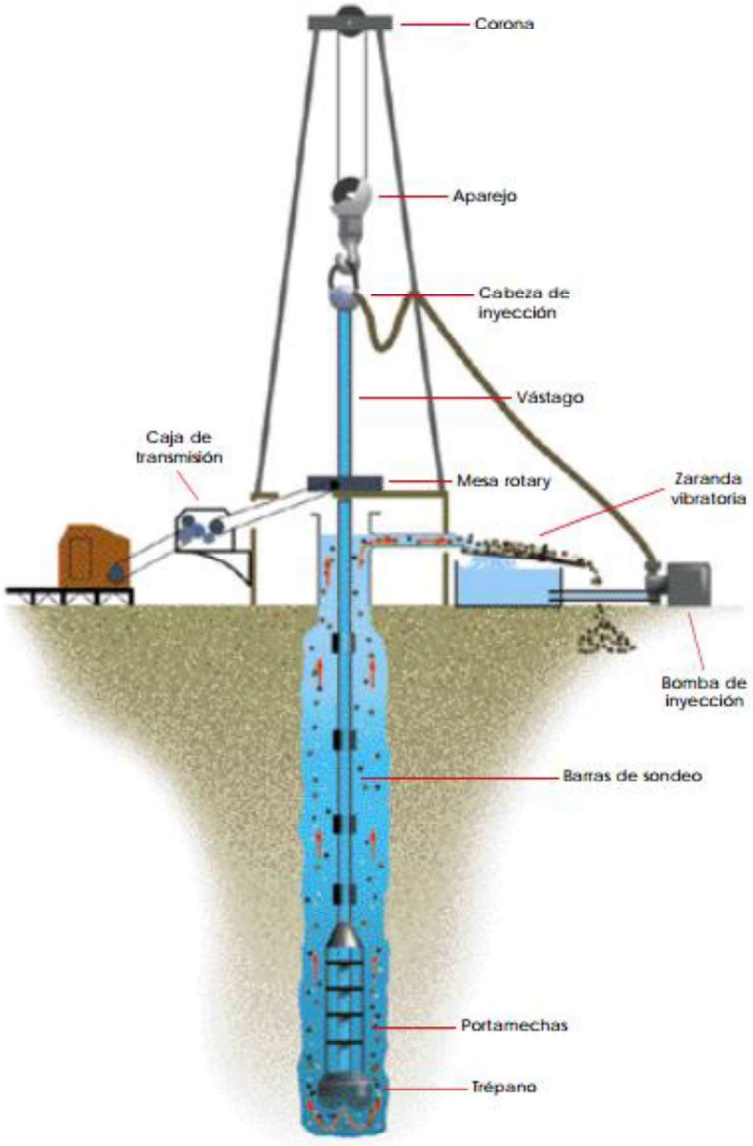


Fuente: Instituto Argentino de Petróleo y Gas, 2000

Posteriormente, se procede a perforar el pozo exploratorio para obtener la certeza de la presencia del hidrocarburo; este proceso, se conoce como: método de perforación rotativo; el cual comienza con la preparación del área en la que se va instalar la torre y el equipo auxiliar; para ello es necesario, desbrozar la cobertura vegetal, nivelar el terreno, construir vías de acceso, dotar de agua al campamento ya sea mediante la perforación de un pozo o mediante el bombeo de un cuerpo de agua cercano, y construir un área para disponer temporalmente los desechos generados en la producción del petróleo y en las actividades cotidianas delpersonal. Una vez que el área está lista, se procede a la perforación en sí; a través del equipo de perforación, el cual consiste de varios mecanismos que trabajan simultáneamente para: empujar la broca a través las capas del subsuelo, extraer la roca de desecho previamente cortadas y mantener girando la broca en el fondo de la perforación. Generalmente en este proceso, se suministra energía mediante generadores a Diésel e indispensablemente como una medida para prevenir una “erupción” del fluido; a la vez, que se perfora se introducen lodos de

perforación; el cual, además de mantener una presión superior a la que ejerce el fluido en su intento de aflorar a superficie; también, mantiene limpia y refrigerada la broca, y cubre las paredes del hoyo para evitar derrumbes (Fig. 7) (Gómez y Roa, 1999). A continuación, contando con la certeza de la presencia del hidrocarburo y las características del yacimiento; el pozo exploratorio, se redefine como pozo de producción, a través del cual se da finalmente la extracción del petróleo o el gas; el cual en el mejor de los casos, debido a diversas condiciones de: profundidad del yacimiento, presión, características de la roca; entre otras, fluye naturalmente hacia la superficie; caso contrario, es necesario invertir en métodos artificiales de extracción, lo cual encarece la producción. Generalmente, se emplean diferentes tipos de bombas o se reinyecta agua al yacimiento para incrementar la presión y que de esta forma el hidrocarburo fluya por el pozo (Instituto Argentino de Petróleo y Gas, 2000).

FIGURA 7: ESQUEMA BÁSICO DE PERFORACIÓN DE UN POZO

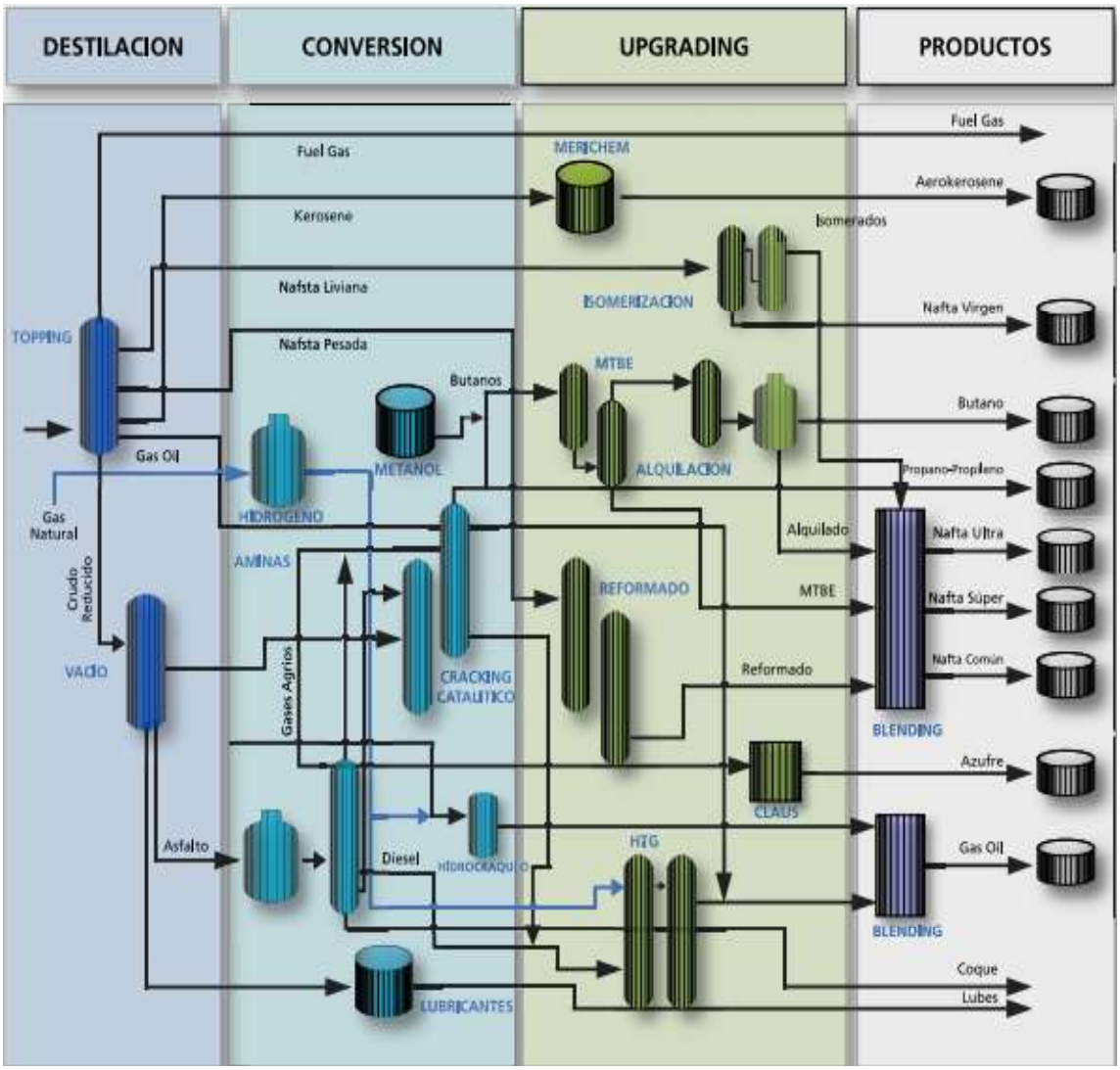


Fuente: Instituto Argentino de Petróleo y Gas, 2000

Finalmente, se transporta el crudo a través de tuberías de acero resistentes a la corrosión; las cuales se denominan, oleoductos. Al llegar a las plantas de refinamiento se puede aplicar una gran variedad de procesos (Fig. 8) como: separación, mejora de calidad, purificación, conversión y mezcla. Finalmente el petróleo se transforma en diversos combustibles, como: gasolinas, gas oil, gas licuado de petróleo; o a una gran diversidad de productos, como: aceites

minerales, asfaltos, coque, parafinas, materia prima para procesos petroquímicos, etc (Burgos y García, 2002).

FIGURA 8: DIAGRAMA DE LA REFINACIÓN DEL CRUDO, CON: PROCESOS GENERALES, PROCESOS ESPECÍFICOS Y PRODUCTOS OBTENIDOS



Fuente: AGIP Argentina, 2006

2.1.3. DEFORESTACIÓN

La deforestación de acuerdo con Achárd et al. (2010) se puede entender como el cambio producido desde un bosque el cual puede ser: abierto, cerrado, plantado o en crecimiento; hacia zonas sin bosques como: arbustos, plantaciones o suelos vacíos. Enmarcado en lo anteriormente señalado, en este estudio se usa el término “deforestación” para designar aquellas áreas cuyo uso de suelo sea diferente al de alojar a los bosques nativos o reforestados. Las principales consecuencias de la deforestación son: pérdida de hábitats naturales, reducción de la biodiversidad y degradación de los servicios ecosistémicos. Consecuentemente, debido a la deforestación se agravan los problemas de calentamiento global, acceso a agua y alimentos seguros, entre otros (SNAP, 2013). Es una de las causas primarias del cambio ambiental, siendo la deforestación en los trópicos de particular interés debido a su relativamente alta tasa de deforestación en comparación a otros lugares del mundo (Helmut y Lambin, 2002).

Las consecuencias de la deforestación sobre la biodiversidad, se dan de tres maneras distintas: destrucción directa del hábitat, efecto de borde, y ruptura o aislamiento de corredores ecológicos (Skole y Tucker, 1993)

2.1.4. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN LA AMAZONÍA

Todos los ecosistemas brindan beneficios a la humanidad, por lo cual se han denominado “servicios ecosistémicos” a determinados componentes de los ecosistemas que pueden ser consumidos o disfrutados directamente, y/o contribuyen, a través de sus interacciones a establecer condiciones que incrementan el nivel de bienestar de la humanidad (Quijas, Schmid y Balvanera, 2010). La importancia mundial de la amazonía radica en la generación de servicios ecosistémicos también denominados servicios ambientales, provistos por su extensa área de bosque tropical y la red hídrica más grande del mundo (PNUMA et al., 2009).

A continuación (Tabla 1) se resumen los principales servicios ecosistémicos provistos por el bosque tropical amazónico. El concepto de servicio ecosistémico o servicio ambiental, tiene la finalidad de ejemplificar los beneficios que la humanidad obtiene de la naturaleza. Sin embargo, esto no quiere decir que la inherente existencia de los ecosistemas y los organismos tenga valor por sí misma, sin tener en cuenta, si brinda o no un servicio a la humanidad (Balvanera, 2012).

TABLA 1: SERVICIOS ECOSITÉMICOS DEL BOSQUE AMAZÓNICO

SERVICIOS DE SUMINISTRO	**Alimentos:** debido a la gran diversidad de plantas, la selva provee alimentos a poblaciones asentadas al interior de la misma selva. Además algunos pobladores consumen carne de mamíferos como el mono capuccino o el armadillo, la también denominada "carne de monte" sirve para la venta aparte del consumo local, generalmente en mercados ilegales (Balvarena, 2012).
	Combustibles: la gran cantidad de biomasa provee leña que es utilizada como combustible, además la Amazonía Ecuatoriana se caracteriza, por la provisión de hidocarburos los cuales posterior a su refinación, se convierten en todo tipo de gasolinas (Balvarena, 2012).
	Medicinas: la utilización de muchas plantas medicinales esta relacionada con las practicas ancestrales de los shamanes y curanderos; sin embargo, la medicina moderna también extrae compuestos activos para ser convertidos en medicinas o precursores (Balvarena, 2012).
	Madera: algunas especies son muy apreciadas en los mercados madereros particularmente, por su dureza y sus vistosos colores (Amaral, 2015).
SERVICIOS DE REGULACIÓN	**Fijación de Carbono:** Debido a su gran biomasa y la gran cantidad de superficie cubierta, los bosques tropicales en su totalidad constituyen el 60% del almacenamiento aéreo de Carbono (Quijas et al, 2010).
	Reguladores del clima: regulan el clima a nivel local debido a la recepción y aprovechamiento de la radiación solar en los procesos fotosintéticos. Además aportan significativamente a la húmedad a través de la liberación de agua por sus estomas (Quijas et al, 2010).
	Minimización del Impacto de los Eventos Meteorológicos Extremos: Debido a su gran complejidad estructural; es decir, sus varios níveles de dosel con plantas de tan solo unos centímetros hasta arboles de 60 metros, reducen el escurrimiento superficial y previenen la erosión precipitada del suelo, previniendo deslaves (Balvarena, 2012).
	Calidad del agua: Al proteger el arrastre de sedimentos durante los eventos de precipitación, retiene materia que de otra forma terminaría en los caudales de los cuerpos de agua, que son utilizados para consumo humano y riego (Balvarena, 2012).
SERVICIOS CULTURALES	**Saberes Amazónicos:** Los pueblos indígenas dentro de su cosmovisión, posicionan a la naturaleza como su deidad, sustentándose en que es la cual los provee de alimento y satisface su necesidades restantes; por ejemplo, para la Nacionalidad Shuar ***"Arutam"*** es la expresión divina de la sabiduría, entendida como la fuerza vital, se expresa mediante la ***"Nunka"***, la cual se refiere directamente a la naturaleza: prodigiosa, bondadosa y protectora (Llorente & Sacona, 2012).
	Disfrute Turístico: Debido a su excepcional belleza paisajística, así como a su biodiversidad, los pueblos amazónicos son destinos escogidos por turistas nacionales e internacionales (Balvarena, 2012).

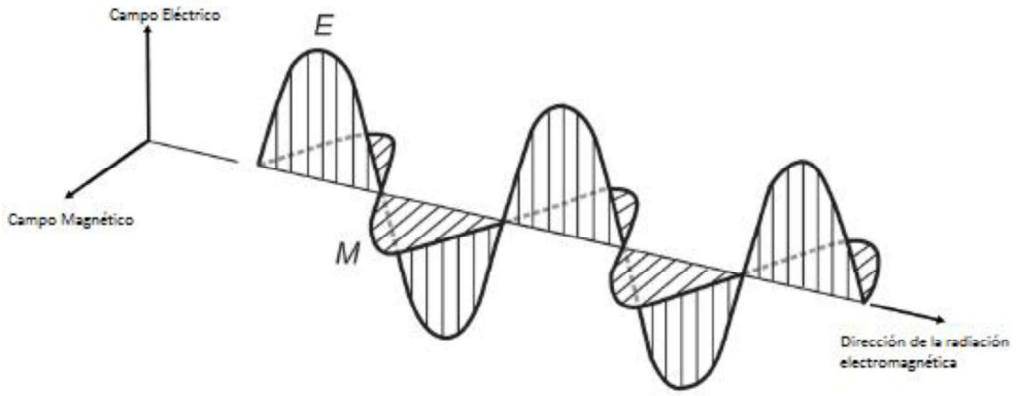
Elaboración: Jordan Andres Cruz

2.1.5. DETECCIÓN REMOTA

Fue establecida la detección remota como herramienta para la cuantificación de la deforestación. Es la ciencia encargada de la observación de un determinado

objeto sin que exista un contacto físico entre el objeto observado y el sensor, en el presente estudio el objeto observado es la superficie terrestre y el observador puede ser la cámara de un avión del cual se obtienen las fotografías aéreas o un satélite espacial el cual produce imágenes satelitales, el observador se denomina sensor remoto. Al no existir contacto físico entre ambos objetos, es necesario algún otro tipo de interacción entre ambos, dicha interacción es el recorrido de la energía desde el Sol, hasta su detección por el sensor remoto. Esta energía es emitida desde el sol en forma de luz, la cual se desplaza en forma de ondas por medio del campo eléctrico y magnético, por ello se denomina a esta energía, radiación electromagnética (Fig. 9) (ITC, 2009).

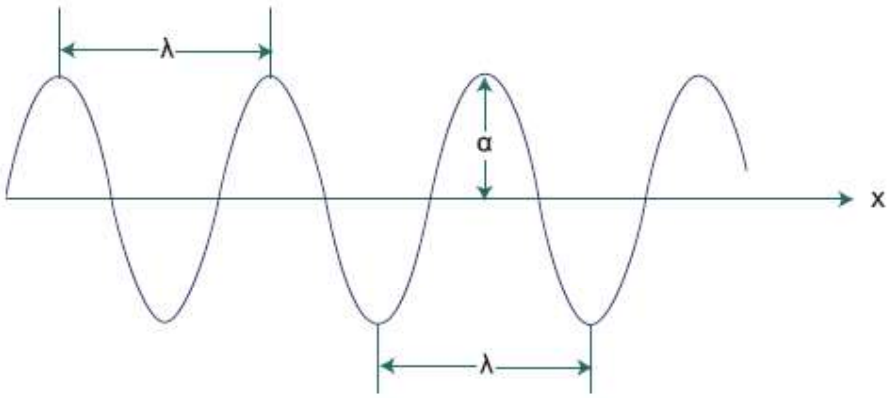
FIGURA 9: NATURALEZA ELECTROMAGNÉTICA DE LA RADIACIÓN SOLAR



Fuente: ITC, 2009

Entre las características más importantes de las ondas electromagnéticas, necesarias para su entendimiento están: la Longitud de onda (λ) que se entiende como la distancia entre dos picos o dos valles, o en su defecto entre dos puntos con energía equivalente, para su medición normalmente se utilizan los micrómetros ($1\mu m=10^{-6}m$); la Amplitud (α) que es el valor de energía más alto que la onda alcanza; y la Frecuencia que se define como el número de ciclos sobre una unidad de tiempo, generalmente se utilizan los Hertz para dicha medición (1Hz=1 ciclo/segundo) (Fig. 10).

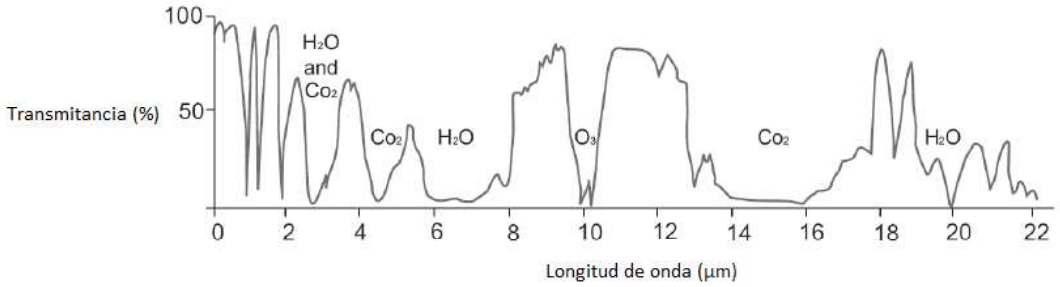
FIGURA 10: PRINCIPALES ELEMENTOS DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA



Fuente: ITC, 2009

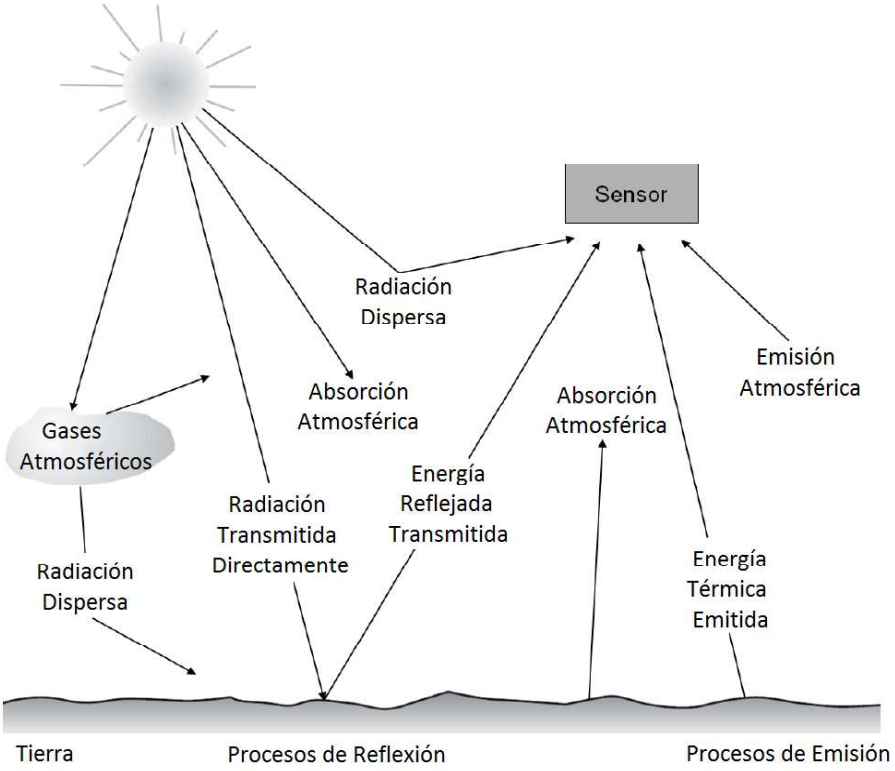
Entonces el proceso, comienza con la emisión de la radiación energética desde la superficie solar, esta radiación no es emitida a una única longitud de onda, sino a un intervalo de varias longitudes de onda. Durante su viaje hacia la tierra, la radiación interactúa con la atmósfera terrestre, de esta interacción con los gases que componen la atmósfera a una determinada longitud de onda la radiación puede ser absorbida o transmitida, esta propiedad en los gases se denomina transmitancia. Entre los gases que tiene una menor transmitancia; es decir absorben una mayor cantidad de radiación están: el Ozono, el Vapor de Agua y el Dióxido de Carbono. A los intervalos en los cuales la radiación logra penetrar, también se les conoce como ventana atmosférica (Fig. 11). Un tercer posible efecto de la interacción radiación-gases es la dispersión, en la cual la onda es redirigida de su camino original. Una vez que la radiación llega a la superficie terrestre, esta puede ser absorbida o reflejada. La radiación reflejada interactúa una vez más con la atmosfera terrestre y finalmente es detectada por el sensor remoto- Además, el sensor recepta emisión proveniente de la atmósfera y de la tierra (Fig. 12).

FIGURA 11: VENTANA ATMOSFÉRICA



Fuente: ITC, 2009

FIGURA 12: INTERACCIÓN ATMOSFÉRICA DE LA RADIACIÓN Y RECEPCIÓN FINAL POR EL SENSOR



Fuente: ITC, 2009

Por lo tanto, la combinación de imágenes obtenidas de teledetección remota en conjunto con los sistemas de información geográfica permite monitorear el cambio de cobertura de suelo; a través de la comparación de dos o más imágenes

obtenidas en diferentes períodos de tiempo. Además con información acerca de las actividades que se desarrollan en el área de estudio, es posible determinar el uso de suelo y la causa del cambio detectado (Wilson y Schröder, 2007).

2.1.6. ECONOMÍA Y AMBIENTE

Las ciencias ambientales intentan entender las actuales y prever las futuras consecuencias de la degradación ambiental, las cuales son potencialmente catastróficas. Por otra parte, la economía espera comprender cómo y por qué los recursos se distribuyen y usan en la sociedad para a través del mercado satisfacer sus necesidades y finalmente generar bienestar (Mendieta, 2000).

Las ciencias ambientales y económicas se interrelacionan debido a que, la humanidad desde su comienzo ha extraído recursos y utilizado servicios provenientes de la naturaleza para satisfacer sus necesidades. En la actualidad, la humanidad se ha convertido en una numerosa y compleja civilización planetaria. Y a pesar de que se ha demostrado que determinados eventos naturales pueden afectar el equilibrio del medio ambiente, esencialmente las actividades antropogénicas han originado que la naturaleza en su conjunto, se ubique en un estado de degradación ambiental, debido a que cada vez somos más y con mayores necesidades (Diamond, 2007).

Por tanto, es necesario sostener el capital social y humano, asegurando el suministro de bienes y servicios ambientales para esta y las futuras generaciones. En otras palabras, es necesario promover el desarrollo sostenible. Para ello, es imprescindible valorar el aporte de los ecosistemas en los mercados, este difícil reto se ha intentado desarrollar desde dos perspectivas paralelas; los economistas han introducido conceptos ambientales originando la *Economía Ambiental*, mientras que los ecólogos han adoptado la dimensión humana en el entendimiento de los sistemas ecológicos dando paso a la *Ecología Económica* (Lomas, Martín , Louit, Montoya y Montes, 2005).

2.1.5.1. ECONOMÍA AMBIENTAL

La economía ambiental se origina en los inicios de los 60s, pero no sería sino hasta los 70s que se consolidaría como una herramienta de análisis de los problemas económicos y su relación con el medio ambiente. En la economía los individuos necesitan producir y consumir bienes para satisfacer sus necesidades y generar bienestar. En la economía ambiental la producción y consumo de aquellos bienes generan contaminación ambiental. Por tanto, el objetivo principal de esta disciplina es definir en qué punto el balance entre la necesidad a satisfacer y la contaminación sufrida, maximizan los beneficios de productores y consumidores; y a la vez, minimizan los impactos negativos al medio ambiente. Es decir, definir el *nivel de contaminación óptimo*. Los graves problemas de contaminación local y global de la actualidad han sido causados, porque la contaminación ambiental ha superado incluso el nivel óptimo y en la gran mayoría de casos ni si quiera se ha tomado en cuenta la contaminación generada (Mendieta, 2000).

Se denomina *externalidad,* cuando cualquier actor en una economía, mediante una determinada acción afecta el bienestar del otro, sin que el afectado haya tenido poder de decisión sobre aquella modificación, ni haya recibido alguna compensación equiparable. Usualmente, los productores no toman en cuenta los efectos negativos de contaminación ambiental que conlleva su producción, de esta forma maximizan sus beneficios; sin embargo, las consecuencias afectan el bienestar de todos los demás, esto se denomina *externalidad ambiental.* El mercado es donde el productor oferta y el consumidor demanda los bienes y servicios; sin embargo, previamente a realizar cualquier transacción entre un productor y un consumidor es necesario definir el *valor* del bien que se va intercambiar, usualmente este es definido en términos monetarios. Al no ser tomadas en cuenta las externalidades ambientales, el dinero que el consumidor paga por un bien generalmente no incluye los impactos negativos que conllevó haberlo producido y disponer sus residuos finalmente. Es por esta razón que existe la necesidad de *valorar económicamente* el ambiente para que las actores

económicos internalicen sus efectos sobre el ambiente (Azqueta, Alviar, Dominguez y O´ Ryan, 2007).

El proceso de valoración económica del ambiente es más complejo que el de los bienes comunes, debido a que en el mercado existe una deficiente apreciación del consumidor y del productor promedio sobre las externalidades ambientales generadas y sus potenciales consecuencias. A pesar de que esa incorrecta apreciación de la naturaleza no libre a estos actores desinformados de pagar las consecuencias, al igual que todos los demás sujetos que no intervinieron en la transacción. Para valorar económicamente el ambiente, el primer paso es identificar qué y cuántos tipos de valor se le va a asignar, un mismo activo ambiental puede tener varios tipos de valor (Fig. 13), se analiza cada uno por separado y no son excluyentes entre sí; posteriormente se suman todos los valores y se obtiene el *Valor Económico Total*. Como podemos inferir, ningún bien o servicio ambiental posee exclusivamente un solo tipo de valoración, sino más bien su Valor Económico Total corresponde a un conjunto de ellos, a continuación, se sintetizan todos los tipos de valor y algunos de los ampliamente utilizados métodos de cálculo (Barbier, Acreman y Knowler, 1997).

Para algunos bienes ambientales la determinación de uno de sus valores es relativamente sencilla, ya que se los puede ofrecer fácilmente en un mercado. Por ejemplo, la madera talada en un bosque se puede comprar y vender fácilmente, debido a ello se denominan *bienes mercadeables* y para su valoración basta con consultar el precio en el mercado actual. En el caso de *bienes no mercadeables*; por ejemplo, el oxígeno que aquel bosque producía previamente a ser talado o la protección frente a deslizamientos de tierra que brindaba el bosque a una determinada comunidad, se enmarca dentro de una metodología diferente (Mendieta, 2000). Por ello, el primer gran aporte de la economía ambiental fue establecer las bases teóricas para la valoración de bienes no mercadeables, producto de lo cual todos los métodos anteriormente descritos se basan básicamente en determinar el máximo que una persona desea pagar para obtener la mejora ambiental o la disposición a perder el mínimo de ese mismo bien ambiental (Loomis, 2010).

FIGURA 13: TIPOS DE VALOR Y MÉTODOS DE CÁLCULO

Fuente: Barbier, Acreman, y Knowler, 1997

Adicionalmente, los análisis financieros económicos ampliamente difundidos, son insuficientes para analizar particularidades de los proyectos ambientales, como: los beneficios derivados de este tipo de proyectos se obtienen a largo plazo o que algunos de ellos no se pueden ver reflejados en los mercados, como se mencionó anteriormente, por ello el análisis económico ha articulado un instrumento económico útil que permite comparar los costos asumidos y los beneficios obtenidos, incluyendo en este último los beneficios fuera de los mercados, esta herramienta se denomina Análisis Costo-Beneficio Social (Ortega, 2012). De igual forma Loomis (2010) determinó la importancia de la distribución de los beneficios obtenidos de las inversiones en medioambiente bajo el enfoque de la eficiencia económica, obteniendo una red de beneficios para la sociedad en conjunto, de esta forma estableció a la equidad como un principio para la construcción de la política medioambiental, extrayendo a la equidad de sus tradicionales ejes de acción como los precios de mercado, impuestos o ingresos. Por tanto, finalmente es deseable brindar una unidad extra de bienestar (objetivo de la economía) a un

individuo que antes no estaba disfrutando de un alto nivel de bienestar, para ello es necesario modificar las cuantificaciones monetarias en medidas de bienestar social mediante un sistema de ponderaciones que permita valorar los beneficios netos que la población obtiene (Ortega, 2012).

2.1.5.2. ECOLOGÍA ECONÓMICA

Su desarrollo es mucho más reciente, a partir de los años 2000, desde un punto de vista más amplio, intenta relacionar los procesos ecológicos que se dan en toda la biosfera y los sistemas económicos que los humanos hemos diseñado para buscar el bienestar, entendiéndose a la humanidad como parte de este macroecosistema; es decir, desde un punto de vista mucho más biocentrista en comparación al modelo utilitarista antropocéntrico planteado por la economía ambiental (Mendieta, 2000). Para la valoración económica del ambiente los ecólogos económicos se han valido de una medición indirecta de los flujos de energía, materia e información que los humanos aprovechan de los sistemas ecológicos, representando a la biosfera como un sistema del cual los humanos aprovechamos parte de esos flujos y no solamente como elementos aislados. También se desprende otra gran línea de pensamiento desde la valoración ambiental por parte de la Ecología Económica, la *Inconmensurabilidad* de los valores la cual postula la incapacidad de cuantificar monetariamente a un sistema ecológico; y para ello plantea un método lógico y racional que permite comparar escenarios o alternativas probables, solamente (Lomas et al., 2005).

Entonces en la ecología económica, la división se da en función del método a utilizar y no en función de la valoración *per se*, se divide en: los métodos energéticos o conmensurables y los métodos de toma de decisiones o inconmensurables. El análisis energético de acuerdo a la Teoría de Valor de Carácter Energético fundamentado en las leyes de la termodinámica cuantifica la energía utilizada directa e indirectamente en la producción de un determinado bien o servicio. Por su parte el análisis emergético basado en la Teoría general de sistemas de Ludwig von Bertalanffy (1968), las leyes energéticas enunciadas por

Lotka (1925) y la energética de los sistemas postulada por Odum (1996), plantea determinar además de la energía que se utiliza en el proceso, aquella energía útil o *emergía* que puede alcanzar por la interacción espontánea entre un sistema y su entorno (Lomas et al., 2005).

2.2. ESTADO DEL ARTE

2.2.1. EJE DE INVESTIGACIÓN

Una vez efectuado un extenso análisis bibliográfico de la literatura científica existente, es posible mencionar que el tema de la comparación entre beneficios industriales y pérdidas ambientales es un tema aún inexplorado en el contexto local. Por otra parte, existe una gran cantidad de información exclusiva a cada eje del estudio presente; es decir: las evaluaciones de deforestación mediante la clasificación de imágenes satelitales para una gran variedad de distintos objetivos, y los análisis de valoración medioambiental basados en la teoría económica ambiental.

El análisis de la literatura citada ha demostrado la falta de visión multidisciplinar al abordar una problemática tan compleja, como la deforestación con fines petroleros y su gran variedad de consecuencias tanto positivas como negativas.

2.2.2. DOCUMENTOS REVISADOS

En la Tabla 2, se presenta la recopilación bibliográfica referente a las áreas de conocimiento que el presente estudio intenta ampliar y sobre las cuales se fundamenta.

TABLA 2: RECOPILACIÓN BIBLIOGRÁFICA

Tipo de Trabajo	Número	Ámbito	Año de Publicación
Libros	12	- Deforestación - Fragmentación ecológica - Desarrollo Sostenible - Amenazas de la Amazonía - Cambio del Uso del Suelo en la Amazonía - Economía Ambiental - Geología Cuenca Oriente - Principios de Teledetección Ambiental	1999-2014
Artículos Científicos	26	- Contaminación Petrolera y Salud - Deforestación en Latinoamérica y la Amazonía - Fragmentación Ecológica - Impactos Explotación Petrolera - Pagos por Servicios Ambientales - Valoración Económica - Precio y Cifras del Petróleo - Análisis Satelital de Cambio de Cobertura - Pretratamiento de Imágenes Satélitales - Mapeo Remoto de Cambio de Uso de Suelo y Pérdida de Cobertura Forestal	1993-2017
Estudios Ambientales	1	- Estudio ExPost Bloque 61	2014
Documentos Gubernamentales	4	- Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial - Perspectivas Nacionales de Planificación y Desarrollo - Informe de Gestión Petroecuador - Reporte Sector Petrolero	2012-2017
Manuales	5	- Software ERDAS - Software CLASlite - Procesamiento datos LANDSAT - Software IDRISI Selva - Software QGIS y Plugin SCP	2005
Folletos Informativos	1	- Características Misión LANDSAT	2016

Elaboración: Jordan Andres Cruz

2.2.3. PRINCIPALES HALLAZGOS

Es notable la gran preocupación de la comunidad científica tanto nacional como internacional, por producir información científica que permita entender de mejor manera al bioma amazónico y sus complejas interacciones socioambientales. La información existente denota la postura conservacionista de la literatura científica, explicada por el acceso a información y posibles consecuencias de su manejo inadecuado, por ello se ejerce una gran valoración desde distintas áreas de conocimiento, como: Ecología, Biología, Sociología, Economía y Ciencias de la Tierra. Además, este conocimiento que ha devenido en una valoración positiva, ha evolucionado a través del tiempo desde la incertidumbre acerca de los efectos antropogénicos en los grandes sistemas ambientales hacia la certeza de la responsabilidad humana en la degradación ambiental generada, producto de ello se ha generado un gran acuerdo a nivel científico, ciudadano y político, acerca de la imperativa necesidad de implementar el desarrollo sostenible en todas nuestras actividades.

Por otra parte, la teledetección remota aplicada a las ciencias ambientales, a pesar de ser una herramienta desarrollada a partir de los 80s, en el contexto local aún es una herramienta poco explotada y con una gran potencialidad de aplicaciones. Esta herramienta que evoluciona y mejora constantemente, actualmente genera una gran cantidad de nueva información que se convierte en una gran ventana hacia aplicaciones futuras; sin embargo, aún conserva una de sus características más importantes, el monitoreo continuo durante largos períodos temporales, por lo cual, los estudios multitemporales que conjugen actividades locales, permitirá entender las causas de problemáticas actuales y prever futuras.

Tras la recopilación y revisión bibliográfica, es posible mencionar que de acuerdo a:

López et al. (2013) en la elaboración de su atlas de la amazonía ecuatoriana bajo presión, realiza un análisis integral de la amazonía y sus relaciones socioambientales, partiendo desde la amazonía previo a la década de los 70s. Es

decir, antes de que se emprenda la extracción de recursos a gran escala hasta la amazonía enfrentada a un nuevo modelo de extracción, esta vez orientada a la extracción de minería metálica a gran escala. Para ello, los autores han recopilado una gran cantidad de información referente a: territorios indígenas, petróleo, carreteras, minería, hidroeléctricas. Además se ha evaluado la deforestación mediante 3 imágenes LANDSAT cubriendo el período temporal 2000-2010. Finalmente, hallaron que al final del período de estudio Ecuador tuvo la tercera tasa de deforestación más alta de todos los países amazónicos.

Ellis (2000) evaluó los cambios en el uso de suelo a través de una combinación de metodologías, la primera de ellas fue la clasificación imágenes satelitales de 30 m de resolución correspondientes al año 2000; esto combinado con el uso de mapas regionales de inventario forestal que fueron obtenidos mediante fotografías aéreas durante 1981 y 1986. Por lo cual pudo monitorear los cambios de vegetación para el período 1985 – 2000, para el oriente ecuatoriano; sin embargo, se estudió a mayor detalle la antigua concesión Petroecuador-Texaco con un área total de 442.976 ha, de las cuales para el año 2000 el 1% había sido deforestado para fines petroleros y el 54,4% para uso agrícola, urbano, entre otros.

Wasserstrom y Southgate (2013) a partir de la información disponible referente a la deforestación en la amazonía ecuatoriana, realizan un recuento histórico para intentar aislar los factores detonantes de la deforestación que es heterogénea en toda la región Amazónica, para ello dividen a la región en cuatro zonas: el nororiente ecuatoriano; donde se han dado procesos de desarrollo petrolero, colonización y la construcción de infraestructura vial; la provincia de Pastaza, en la cual ha existido desarrollo petrolero, pero sin la construcción de carreteras o sin que su acceso sea público; la provincia de Morona Santiago, en la cual no ha existido desarrollo petrolero pero si colonización y carreteras; y finalmente, los territorios fronterizos del oriente ecuatoriano. Al comparar estas distintas realidades socioeconómicas, con la deforestación, es posible concluir que el real detonante de la deforestación en la amazonía ecuatoriana es la construcción de carreteras que abre el paso a la colonización.

Ortega (2012) ha resumido adecuadamente las ventajas de la elaboración de un Análisis Costo-Beneficio a la hora de comparar programas, intervenciones o medidas políticas, en cuyo caso este se convierte en un Análisis Costo-Beneficio Social, porque el objetivo principal deja de ser obtener ganancias económicas, sino generar bienestar social a la mayor cantidad de población posible, su principal diferencia y a la vez complejidad radica el estimar los valores monetarios de bienes y servicios, en los cuales el precio de mercado no refleja su costo real, o incluso no tiene un mercado. Para estos casos el analista debe reconstruir un mercado para estimar en última instancia la disposición a pagar del individuo para evitar el coste o disfrutar el beneficio. Por ello la importancia de transformar las medidas monetarias en una medida del bienestar social.

2.2.4. DIAGNÓSTICO

La utilización de imágenes satelitales para monitorear la vegetación en la amazonía ecuatoriana, se ha venido realizando de forma deficiente ya que se han analizado cortos períodos temporales los cuales impiden entender realmente sus causas. Los estudios de López et al. (2013) y Ellis (2000) realizaron una acertada comparación entre las áreas deforestadas y las actividades socioeconómicas ejecutadas en sus respectivas zonas de estudio. Sin embargo, este monitoreo no se ha perpetuado en el tiempo, y en el mejor de los casos se cuenta con información correspondiente al año 2010.

La información histórica, respecto a las actividades que se dan en la zona de estudio es de fundamental importancia para poder extraer conclusiones válidas y adaptadas a las diferentes realidades de los territorios amazónicos que gozan de una alta heterogeneidad, así como Wassestrom y Southgate (2013) ingeniosamente aislaron actividades diferenciadoras en cada zona que más tarde pudieron reconocer patrones de deforestación diferentes en cada zona.

Finalmente, los estudios de la Economía Ambiental, aún gozan de una gran incertidumbre ya que los mercados son imperfectos por naturaleza y desencadenan en modelos erráticos con un número infinito de variables, al final

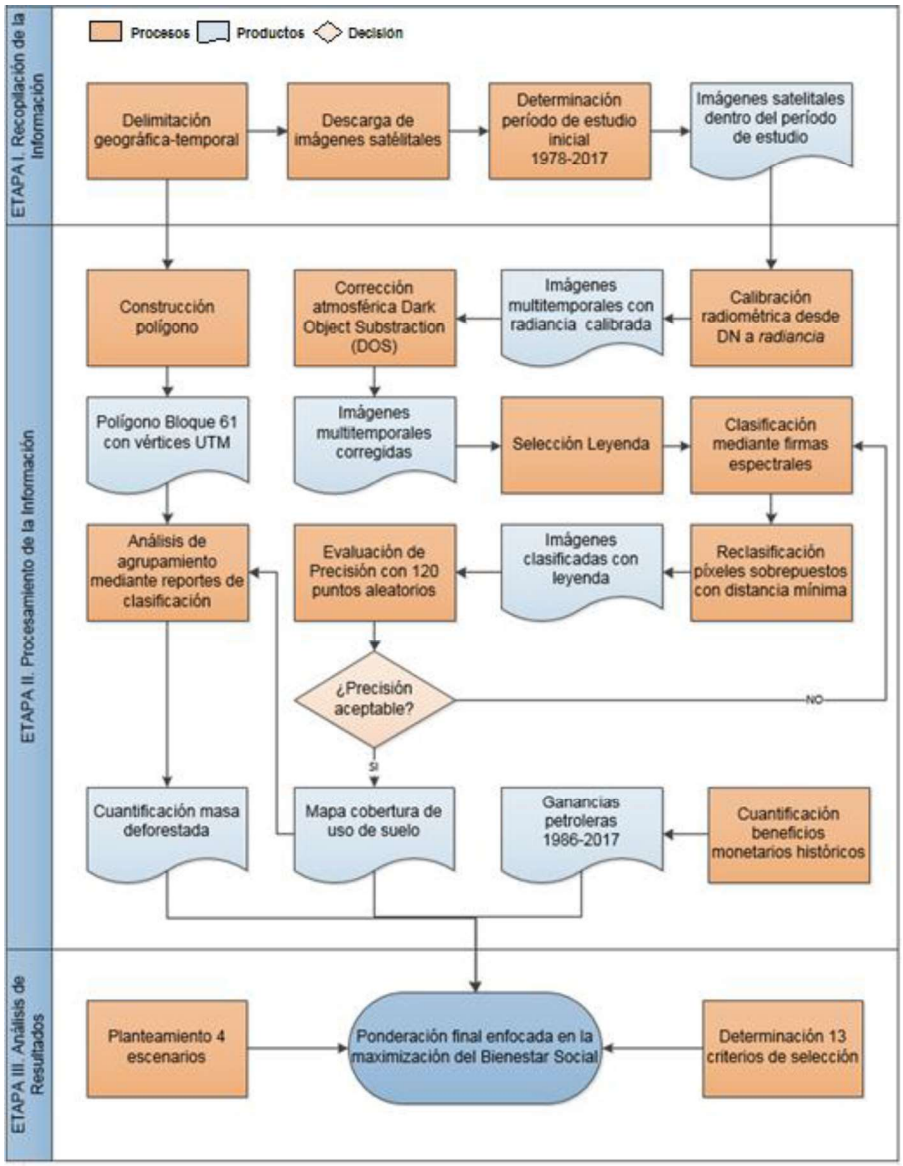
de cuentas, las valoraciones económicas de los servicios ecosistémicos que pueden ser vendidos como madera o generación hidroeléctrica gozan de mucha credibilidad. Sin embargo, factores ambientales que no representan un servicio ambiental como la vida de un determinado ser vivo es simplemente reducido a la valoración que un ciudadano puede expresar mediante una encuesta.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

A continuación se muestra a detalle todos los procesos llevados a cabo para satisfacer los objetivos planteados (Fig. 14).

FIGURA 14: OPERACIONES PRINCIPALES Y PRODUCTOS OBTENIDOS



Elaboración: Jordan Andres Cruz

3.1. RECOPILACIÓN INFORMACIÓN BASE

3.1.1. DELIMITACIÓN GEOGRÁFICO-TEMPORAL

Estudiar toda la amazonía ecuatoriana mediante las herramientas propuestas en este estudio requeriría una gran cantidad de recursos. Por lo cual, para el presente estudio se ha considerado pertinente, seleccionar un área representativa de los fenómenos que suceden en el resto de la región. Esta área cuenta con información accesible y se espera que sus resultados sean representativos para el resto de la amazonía ecuatoriana.

En función de que los elementos a estudiar son los efectos de la actividad petrolera sobre la naturaleza, se ha determinado no delimitar el estudio en divisiones político-territoriales, como: provincias o cantones; sino, en función de bloques petroleros (Fig. 1). Estos bloques petroleros han sido delimitados principalmente en función de los yacimientos hidrocarburíferos sub-superficiales (Rivadeneira y Baby, 1999) y sobre los cuales se facilita enmarcar las actividades petroleras y sus efectos. Por ello, se ha seleccionado el Bloque 61 con una superficie total de 79263,54 Ha. Este bloque petrolero está operativo en la actualidad y se encuentra concesionado a la empresa estatal Petroecuador EP (2014).

El Bloque 61 fue descubierto en Marzo de 1970 con la perforación del pozo Auca 01 (Rivadeneira y Baby, 1999) y se sumó a las cuentas de producción nacional en 1975, entonces operado por el consorcio formado entre la Corporación Estatal Petrolera Ecuatoriano (CEPE) y la Multinacional Estadounidense Texaco (Araujo, 2015). Por lo cual este estudio se ha delimitado temporalmente en un principio desde 1975 hasta la actualidad. Este período de estudio está sujeto a modificaciones en función de la disponibilidad de la información restante.

3.1.2. PRODUCCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DE PETRÓLEO

La recopilación de la información correspondiente con la producción de petróleo del bloque 61 fue desarrollada de dos maneras. La primera, mediante correspondencia digital con funcionarios de la Dirección Nacional de Síntesis Macroeconómica del Banco Central del Ecuador, los cuales proveyeron las matrices correspondientes a la Producción Nacional de Crudo en Campos, desde el año 1972 hasta el año 2012. De acuerdo a la nomenclatura utilizada por Petroecuador, un bloque petrolero se subdivide en campos petroleros, este se subdivide en plataformas y finalmente en pozos. En el presente estudio, el bloque 61 o Activo Auca se subdivide en los campos: Auca, Auca Sur, Yuca, Yuca Sur, Yulebra, Culebra, Cononaco Anaconda, Auca Este y Rumiyacu. En la actualidad los campos Yuca Sur y Auca Este, han pasado a ser considerados campos marginales y su producción no se contabiliza, mientras que el campo Auca Sur se ha fusionado con el campo Auca. La segunda forma, mediante visitas y reuniones con funcionarios de la Secretaría Nacional de Hidrocarburos, fue posible recopilar el faltante de la información (Anexo 1).

3.1.3. INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

3.1.2.1. Selección del Sensor Remoto

Dos de los principales instrumentos utilizados para llevar a cabo la teledetección ambiental, son: aviones que proporcionan fotografías aéreas o satélites que proveen imágenes satelitales. En el presente estudio se ha decidido usar información generada por satélite, este tipo de teledetección remota espacial, cuenta con las siguientes características generales, las cuales favorecen a los objetivos planteados ya que representan ventajas sobre las fotografías aéreas (Chuvieco, 2008):

- La información es de carácter global y comparable, lo cual posibilita el entendimiento de varios problemas ambientales, los cuales se expresan como fenómenos globales.

- Ofrece una vista panorámica de gran amplitud; por ejemplo, cada imagen del sensor LandSat-TM permite observar un área de 34.000 km².
- Las observaciones son constantes y se hacen durante largos períodos de tiempo, lo cual permite almacenar grandes cantidades de objetos.
- El muestreo remoto al no tener contacto físico, no es destructivo con la muestra de ninguna forma.
- Los muestreos multiespectrales pueden ser realizados en longitudes de onda, imperceptibles para los sentidos humanos, pero de gran valor científico.

Todos los estudios referentes a deforestación anteriormente mencionados han utilizado la teledetección remota como metodología para determinar las tasas de deforestación. En algunos casos ésta ha sido acompañada de muestreos in situ, las diferencias entre los valores son aceptables y se pueden atribuir a la diferencia entre las áreas de cálculo, la definición de deforestación, diferencias en las resoluciones tanto espaciales como espectrales entre las imágenes satelitales utilizadas, las áreas inutilizables cubiertas por nubes, y las técnicas de procesamiento de las imágenes (Ellis, 2000).

Entre los múltiples sensores remotos satelitales tenemos; el programa de observación de la tierra llevado a cabo por la Unión Europea, COPERNICUS (ESA, 2018); el programa de cooperación Japonés – Estadounidense de radiometría térmica, ASTER (CALTECH, 2018); y el proyecto LandSat, el cual es una iniciativa del Servicio Geológico (USGS) y de la Agencia Nacional de Administración Espacial (NASA), ambas instituciones de los Estados Unidos de Norteamérica. Para este estudio fueron seleccionadas las imágenes satelitales provistas por la misión LandSat; principalmente, debido a los grandes períodos de monitoreo histórico. La misión LandSat, ha monitoreado la superficie terrestre en su totalidad desde 1972 cuando fue el lanzamiento del satélite LandSat 1 y el comienzo de la misión. Hasta la actualidad se han puesto en órbita un total de 8 satélites (Tabla 3), cada uno con mayores avances tecnológicos que su predecesor, siendo el proyecto LandSat el proyecto de observación terrestre que más tiempo lleva operando (USGS, 2016).

A continuación, se detalla la resolución espacial y espectral de cada uno de los satélites LandSat:

TABLA 3: CARACTERIZACIÓN MISIONES LANDSAT

Satélite	LandSat 8 OLI/TIRS		LandSat 7 ETM+		LandSat 4-5 TM		LandSat 4-5 MSS		LandSat 1-3 MSS	
Descripción	Imágenes Operacionales de la Tierra y Sensor Infrarrojo Térmico		Mapa Temático Mejorado		Mapa Temático		Escaner Multiespectral		Escaner Multiespectral	
Denominación Banda	Resolución: 30 m		Resolución: 30 m		Resolución: 30 m		Resolución: 60 m		Resolución: 60 m	
	Banda	λ [µm]	Banda	λ [µm]	Banda	λ [µm]	Banda	λ [µm]	Banda	λ [µm]
Ultra-azul/Costera	Banda 1	0,43-0,45	--	--	--	--	--	--	--	--
Azul	Banda 2	0,45-0,51	Banda 1	0,45-0,52	Banda 1	0,45-0,52	--	--	--	--
Verde	Banda 3	0,53-0,59	Banda 2	0,52-0,60	Banda 2	0,52-0,60	Band 1	0,50-0,60	Band 1	0,50-0,60
Pancromática	Banda 8*	0,50-0,68	Banda 8*	0,52-0,90	--	--	--	--	--	--
Roja	Banda 4	0,64-0,67	Banda 3	0,63-0,69	Banda 3	0,63-0,69	Banda 2	0,60-0,70	Banda 2	0,60-0,70
Infrarrojo Cercano 1	Banda 5	0,85-0,88	Banda 4	0,77-0,90	Banda 4	0,76-,90	Banda 3	0,70-0,80	Banda 3	0,70-0,80
Infrarrojo Cercano 2	--	--	--	--	--	--	Banda 4	0,80-1,10	Banda 4	0,80-1,10
Cirrus	Banda 9	1,30-1,38	--	--	--	--	--	--	--	--
Infrarrojo de Onda Corta 1	Banda 6	1,57-1,65	Banda 5	1,55-1,75	Banda 5	1,55-1,75	--	--	--	--
Infrarrojo de Onda Corta 2	Banda 7	2,11-2,29	Banda 7	2,09-2,35	Banda 7	2,08-2,35	--	--	--	--
Térmica 1	Banda 10	10,60-11,19	Banda 6	10,40-12,50	Banda 6	10,40-12,50	--	--	--	--
Térmica 2	Banda 11	11,50-12,51	--	--	--	--	--	--	--	--
* Resolución Pancromática: 15 m										

Fuente: United States Geological Survey, 2016

3.1.2.2. Selección y Descarga de Imágenes Satelitales

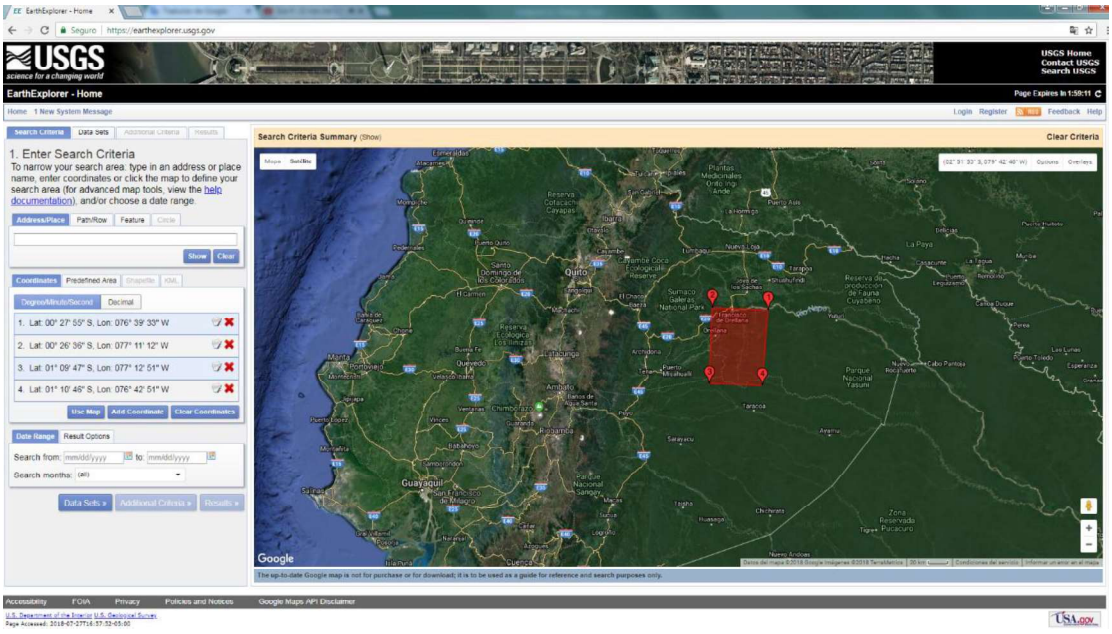
Fue seleccionado el portal de descarga EarthExplorer (Fig. 15) propiedad del Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, esta última institución se encuentra adscrita al United States Geological Survey (USGS). Por lo tanto, la fuente de las imágenes satelitales para el presente trabajo es la misma institución que administra la misión Landsat, con lo cual su veracidad es altamente confiable.

Dentro del portal existen dos niveles de descarga, fueron elegidas las descargas correspondientes al nivel 1, su diferencia principal es que las imágenes pertenecientes a este nivel tienen una menor cantidad de pretratamiento y su descarga es de libre acceso. De acuerdo al United States Geological Survey (2018) las características de las imágenes nivel 1 son las siguientes:

- Formato de salida: GeoTIFF
- Método de remuestreo: Convolución Cúbica
- Tamaño del píxel: 30 m (OLI/TIRS, ETM+,TM) y 60 m (MSS)
- Proyección del Mapa: Universal Transversal Mercator (UTM)

- Datum: World Geodetic System 84 (WGS84)
- Orientación de Imagen: Norte Arriba (MAP)

FIGURA 15: DELIMITACIÓN ÁREA DE ESTUDIO EN EL PORTAL DE DESCARGA



.

Fuente: United States Geological Survey, 2018

Además el nivel 1 se subdivide en Pre-Colección y Colección. Su diferencia principal es que en función de la existencia de puntos de control superficiales (GCP), datos de elevación provistos por un Modelo de Elevación Digital (DEM), y/o datos espaciales colectados por el sensor de corrección de datos (PCD), las imágenes han sido pretratadas lo máximo posible con el objetivo de proveer datos más fiables (Tabla 4) (USGS, 2018).

TABLA 4: CARACTERÍSTICAS NIVELES DE DESCARGA

Landsat Nivel 1: Niveles de pretratamiento		
Pre-Colección	Colección	Descripción
L1T	L1TP	Calibrada radiométricamente y ortorectificada usando puntos de control superficiales (GCP) y mediante datos del modelo de elevación digital (DEM) para corregir el desplazamiento del relieve.
L1GT	L1GT	Calibrada radiométricamente y con correcciones geométricas sistemáticas aplicadas usando datos de la Efeméride espacial, y del DEM para corregir el desplazamiento del relieve.
L1G	L1GS	Calibrada radiométricamente y solo con correcciones geométricas sistemáticas aplicadas usando datos de la Efeméride espacial.

Fuente: United States Geological Survey, 2018

Entonces, cada imagen fue descargada como un paquete de datos comprimido con la siguiente nomenclatura:

$$LXSS_LLLL_PPPRRR: _YYYYMMDD_yyyymmdd_CC_TX$$

Dónde:

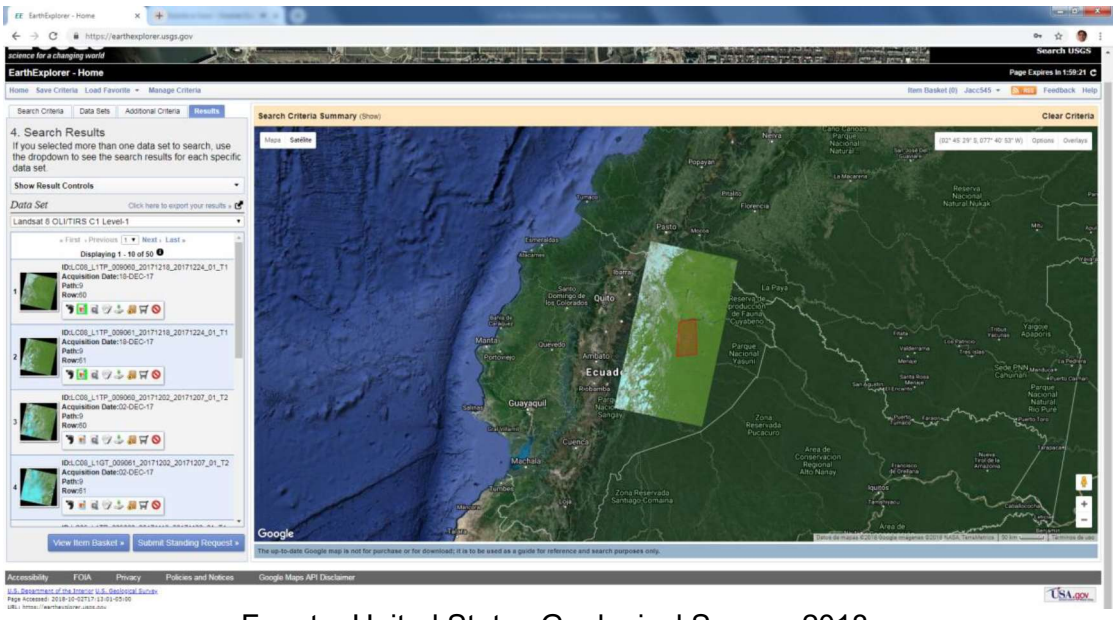
- L=Landsat (Constante)
- X=Sensor (C=OLI/TIRS, O=OLI, T=TIRS, E=ETM+, T=TM, M=MSS)
- SS=Satélite (Por ejemplo, 05 para Landsat 5)
- LLLL= Nivel de Procesamiento (L1TP, L1GT, L1GS)
- PPP= Path
- RRR= Row
- YYYYMMDD= Año, Mes y Día de Adquisición
- yyyymmdd= Año, Mes y Día de procesamiento
- CC= Número de Colección (Por ejemplo, 01=Colección 1)

- TX= RT=Tiempo real, T1 nivel 1 (Mayor calidad), T2 nivel 2 (Menor calidad)

En la nomenclatura, el elemento final correspondiente a TX; se refiere al subproceso del pre-tratamiento en el que el dato se encuentra, puede ser: RT, Tiempo real las imágenes procesadas inmediatamente después de su obtención y de allí generalmente pasan a nivel 1, en el que son registradas imagen por imagen con puntos de control y con un error cuadrático medio de raíz radial (RMSE) ≤ 12 m; Posteriormente las imágenes RT son tratadas y pasan a imágenes nivel 1, las cuales pertenecen al nivel de procesamiento L1TP, descrito anteriormente; o en su defecto pasan al nivel 2, en el que las imágenes son registradas imagen por imagen con datos colectados por el PCD, con un RMSE > 12 m (Zanter, 2017).

Finalmente, la nomenclatura referente a Path y Row se refiere a la identificación del cuadrante específico de cada imagen. Para el presente estudio es necesario elaborar un mosaico con las imágenes correspondientes al Path=9 y Row=60 y 61 para cubrir toda el área de interés (Fig. 16).

FIGURA 16: MOSAICO ÁREA DE ESTUDIO



Fuente: United States Geological Survey, 2018

Para el presente estudio fueron descargadas las dos imágenes de cada año que presentaron una menor nubosidad (Tabla 5) En total se descargaron 118 imágenes con una nubosidad promedio de 6,07%.

TABLA 5: IMÁGENES DESCARGADAS Y SATÉLITES FUENTE

Año	Mes	Día	Nubosidad	Año	Mes	Día	Nubosidad	Año	Mes	Día	Nubosidad
1977	Agosto	12	48	1999	Julio	10	10	2009	Mayo	26	15
			0				7				9
1978	Octubre	18	15		Noviembre	15	11		Septiembre	15	22
			52				9				56
1984	Septiembre	2	55	2000	Noviembre	9	13	2010	Agosto	1	30
			45				19				34
1985	Enero	24	54		Octubre	24	31		Diciembre	7	65
			73				33				33
1986	Agosto	23	16	2001	Septiembre	9	12	2011	Agosto	20	27
			13				30				24
	Octubre	10	48		Agosto	24	18			4	42
			25				23				47
1987	Abril	20	48	2002	Septiembre	12	9	2012	Agosto	6	49
			79				3				9
	Octubre	13	23		Octubre	14	2		Noviembre	10	19
			24				6				19
1988	Octubre	23	26	2003	Febrero	19	24	2013	Septiembre	2	14,2
			30				41				1,8
1989	Agosto	/	9		Noviembre	18	5		Diciembre	23	31,66
			17				19				23,91
	Noviembre	3	40	2004	Septiembre	1	13	2014	Agosto	4	34,5
			34				1				37,8
1990	Febrero	7	50		Octubre	19	20		Noviembre	8	50,34
			49				17				66,28
	Abril	28	29	2005	Febrero	24	31	2015	Mayo	3	28,85
			9				22				21,78
1991	Junio	2	48		Julio	2	55		Septiembre	8	20,12
			39				9				9,53
1992	Julio	14	41	2006	Mayo	18	12	2016	Enero	14	30,68
			12				12				56,3
1996	Septiembre	3	14		Octubre	25	47		Agosto	25	60,28
			38				21				28,69
	Octubre	21	11	2007	Enero	29	5	2017	Septiembre	29	44,7
			34				1				81,16
1997	Septiembre	6	20		Agosto	25	22		Diciembre	18	32,83
			31				11				31,99
		22	48	2008	Septiembre	12	9	LEYENDA			
			40				12		Path 9 Row 60		
1998	Septiembre	25	31			28	15		Path 9 Row 61		
			6				19		Landsat 02		
	Diciembre	30	57	* Solo se conto con una imagen disponible para la descarga					Landsat 05		
			46						Landsat 07		
									Landsat 08		

Elaboración: Jordan Andres Cruz

Posteriormente, fueron excluidas las imágenes específicamente sin nubosidad en el área de interés, obteniéndose un total de 16 imágenes Landsat (Tabla 6).

También fueron excluidas una gran cantidad de imágenes procedentes del satélite Landsat 07, debido a que una falla en el Scan Line Corrector (SLC) produjo imágenes defectuosas, ocasionando pérdidas en cada imagen de aproximadamente un 22% (CARNEGIE, 2014).

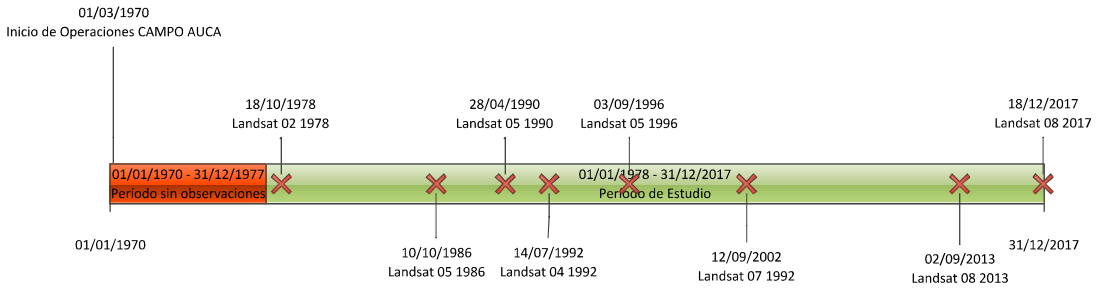
TABLA 6: IMÁGENES SIN NUBOSIDAD EN EL ÁREA DE ESTUDIO

Año	Mes	Día	Misión	Fuente	Path/Row
1978	Octubre	18	LandSat 2	LandSat 1-5 MSS	09060
					09061
1986	Octubre	10	LandSat 5	LandSat 1-5 MSS	09060
					09061
1990	Abril	28	LandSat 5	LandSat 4-5 TM C1 Level-1	09060
					09061
1992	Julio	14	LandSat 4	LandSat 4-5 TM C1 Level-1	09060
					09061
1996	Septiembre	3	LandSat 5	LandSat 4-5 TM C1 Level-1	09060
					09061
2002	Septiembre	12	LandSat 7	LandSat 7 ETM+ C1 Level 1	09060
					09061
2013	Septiembre	2	LandSat 8	LandSat 8 OLI/TIRS C1 Level-1	09060
					09061
2017	Diciembre	18	LandSat 8	LandSat 8 OLI/TIRS C1 Level-1	09060
					09061

Elaboración: Jordan Andres Cruz

Con esta base de datos y la información de la actividad petrolera en la zona de interés, se delimitó inicialmente el período de estudio entre los años 1978 y 2017, cubriendo 39 años de actividad petrolera a nivel industrial en el bloque 61 (Fig.17).

FIGURA 17: LINEA TEMPORAL DEL PERÍODO DE ESTUDIO Y LA INFORMACIÓN SATELITAL DISPONIBLE



Elaboración: Jordan Andres Cruz

3.2. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.2.1. CONSTRUCCIÓN POLÍGONO ÁREA DE INTERÉS

Las coordenadas geográficas oficiales del bloque 61 (Tabla 7) han sido obtenidas del estudio de impacto ambiental ex-post de acceso público registrado en el Sistema Único de Información Ambiental correspondiente al bloque 61 (ENVIROTEC, 2014). A partir de estas coordenadas fue construido el polígono, que representa al bloque 61, referido en el presente análisis como área de estudio.

TABLA 7: COORDENADAS WGS84 UTM ZONA 18 SUR CORRESPONDIENTES AL BLOQUE 61

PUNTO	ESTE	NORTE	PUNTO	ESTE	NORTE
1	286 002	9 949 633	14	289 085	9 910 070
2	300 002	9 949 633	15	289 085	9 901 070
3	300 002	9 950 070	16	290 002	9 901 070
4	306 002	9 950 070	17	290 002	9 880 070
5	306 002	9 944 570	18	280 002	9 880 070
6	299 002	9 944 570	19	280 002	9 910 070
7	299 002	9 928 570	20	288 002	9 910 070
8	297 002	9 928 570	21	288 002	9 925 070
9	297 002	9 920 070	22	286 002	9 925 070
10	294 002	9 920 070	23	286 002	9 933 070
11	294 002	9 913 070	24	280 002	9 933 070
12	292 002	9 913 070	25	280 002	9 940 070
13	292 002	9 910 070	26	286 002	9 940 070

Fuente: ENVIROTEC, 2014

3.2.2. CUANTIFICACIÓN GANANCIAS PETROLERAS HISTÓRICAS

Para poder ejercer la comparación propuesta, dentro de la metodología fue necesario transformar las cifras de producción petrolera en beneficios monetarios. Para ello, partiendo de la información colectada de la producción de todos los campos petroleros del bloque 61 y conociendo el valor de exportación del petróleo; fue posible estimar los ingresos estatales obtenidos de la explotación petrolera. El precio internacional del petróleo es una cifra de alta volatilidad, que depende entre otros, de la política internacional y de los grandes mercados industriales (AIHE, 2013). Además, existen varios precios para los distintos tipos de crudo; es decir, el precio varió en función de la calidad del crudo, esta calidad se refiere a la

densidad medida en grados API del petróleo extraído, la densidad del petróleo dependerá de la profundidad a la que se extrae el crudo. Obviamente, el petróleo más denso, también denominado pesado, se encuentra a mayores profundidades. La estructura Auca produce petróleo de las areniscas: Hollín Principal, Hollín Superior, Arenisca “T”, Arenisca “U” y Arenisca “Tena-Basal”; con densidad promedio de 23,5° API y un contenido de azufre de 1,45% (Baby, Rivadeneira y Barragán, 2004), considerándolo como parte del crudo Oriente, el más abundante y de mejor calidad de producción nacional en comparación con el crudo Napo (Albornoz, 2017). A partir de allí en los reportes del sector petrolero, elaborados por la Dirección Nacional de Síntesis Macroeconómica del Banco Central del Ecuador, fueron calculados los precios promedios del crudo Oriente en el período de estudio finalmente escogido. Además, fue tomada la precaución de recalcular en dólares americanos del año 2017, para de esta forma minimizar errores por inflación monetaria.

3.2.3. TRATAMIENTO IMÁGENES SATELITALES

Una vez seleccionado el sensor multiespectral Landsat, se obtuvo de la descarga, las imágenes en bruto, mediante los fundamentos de la teledetección remota fue posible producir imágenes que pueden ser visualizadas finalmente en la pantalla de un monitor o impresas. Estas imágenes permiten abstraer conclusiones que satisfagan los objetivos previamente planteados. Para ello, los datos brutos en su pretratamiento fueron rectificados y restaurados, posteriormente se han creado mapas en los que el color permite extraer la información de interés mediante modelos digitales de cuantificación y de detección del cambio (ITC, 2009).

Para el tratamiento y pretratamiento de las imágenes satelitales, fue necesario utilizar un software de procesamiento geográfico, se exploraron las opciones de utilización del software IDRISI Selva; sin embargo, debido a que su entorno tiene un soporte nativo diferente al formato TIFF, y este último corresponde al formato de las fuentes de datos, fue descartado. También se exploró la herramienta CLASlite, un software de clasificación automático desarrollado por la universidad

de Stanford; sin embargo, en función de su automaticidad el software asume aspectos como por ejemplo, existe solo un proceso de clasificación de píxeles, el cual utiliza un algoritmo basado en un sistema de ecuaciones lineales con librerías espectrales levantadas en campo (CARNEGIE, 2014). Aspectos como este único algoritmo de clasificación limitan el campo de decisión del análisis, por lo cual el software CLASlite fue descartado de igual forma.

Posteriormente, debido a su característica de código abierto se escogió el sistema de información geográfica QGIS, el cual procede de un proyecto de la Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Esta organización no gubernamental tiene como objetivo impulsar el avance colaborativo de tecnologías geoespaciales y de código abierto. Por lo cual, este programa es distribuido mediante una licencia pública general GNU, lo cual garantiza su utilización y difusión gratuita. QGIS, previamente conocido como Quantum Gis ha sido desarrollado usando las herramientas Qt y C++, por lo cual tiene requerimientos informáticos básicos, una interfaz gráfica ligera y amigable con el usuario; la cual permite trabajar con archivos vectoriales y ráster. Además, es compatible con plataformas Unix, Windows y Mac (QGIS Development Team, 2018).

Una característica fundamental para escoger este software, fue la utilización del complemento Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), cuya versión final fue desarrollada como tesis doctoral de Luca Congedo en la carrera de paisaje y medio ambiente por la Universidad de Roma, el objetivo principal de este plugin de clasificación supervisada es proveer un conjunto de herramientas relacionadas entre sí, para el tratamiento de información ráster, que permita un flujo de trabajo automático; para ello, el complemento provee herramientas informáticas para un tratamiento integral de las imágenes satelitales, desde la descarga hasta el post-tratamiento de los mapas producidos (Congedo, 2018). En los cuales el analista puede aplicar distintos métodos en cada fase del tratamiento, en función de los objetivos planteados.

3.2.3.1. Extracción de Datos Descargados

Los datos fueron descargados en formato *.tar.gz;* el cual corresponde a archivos comprimidos de código abierto (Nucleomics, 2016) por lo cual para su descarga es necesario un software de igual manera de código abierto. El software adoptado fue 7-ZIP, el cual fue desarrollado por Igor Pavlov (2018).

La extracción fue desarrollada en dos partes; primeramente, el archivo *.tar.gz* se extrajo en un archivo *.tar*, y posteriormente de este archivo se extrajeron imágenes *.TIFF* (Tagged Image File Format), este último formato corresponde a un formato de imágenes desarrollado para el manejo y manipulación de imágenes de alta resolución (Gráffica, 2018). El resultado es una imagen por cada número de bandas y un archivo metadato indispensable para el posterior tratamiento de las imágenes.

3.2.3.2. Corrección Geométrica

La corrección geométrica de los datos brutos tiene como objetivo que las imágenes satelitales reflejen de la forma más fiel a la realidad. Es decir, que la geografía real sea lo más similar posible a la representada por las imágenes satelitales. Para el presente caso, las imágenes fueron corregidas geométricamente por la USGS, como se había descrito anteriormente existen varios niveles de pre-procesamiento (*Véase 3.1.2.2.*) con lo cual la mayoría de imágenes han sido corregidas geométricamente usando puntos de control *in situ* y un modelo de elevación digital (Tabla 8) a excepción de la imagen correspondiente al año 1978 la cual fue corregida geométricamente mediante el uso de la efemérides espacial (Zanter, 2017).

TABLA 8: IMÁGENES LANDSAT CORREGIDAS GEOMÉTRICAMENTE

Año	Imagen	Nivel de procesamiento
1978	LM02_L1GS_009060_19781018_20180421_01_T2.tar	L1GS
	LM02_L1GS_009061_19781018_20180421_01_T2.tar	L1GS
1986	LT05_L1TP_009060_19861010_20170216_01_T1.tar	L1TP
	LT05_L1TP_009061_19861010_20170216_01_T1.tar	L1TP
1990	LT05_L1TP_009060_19900428_20170130_01_T1.tar	L1TP
	LT05_L1TP_009061_19900428_20170130_01_T1.tar	L1TP
1992	LT04_L1TP_009060_19920714_20170122_01_T1.tar	L1TP
	LT04_L1TP_009061_19920714_20170122_01_T2.tar	L1TP
1996	LT05_L1TP_009060_19960903_20170103_01_T1.tar	L1TP
	LT05_L1TP_009061_19960903_20170103_01_T1.tar	L1TP
2002	LE07_L1TP_009060_20020912_20170129_01_T1.tar	L1TP
	LE07_L1TP_009061_20020912_20170129_01_T1.tar	L1TP
2013	LC08_L1TP_009060_20130902_20170502_01_T1.tar	L1TP
	LC08_L1TP_009061_20130902_20170502_01_T1.tar	L1TP
2017	LC08_L1TP_009060_20171218_20171224_01_T1.tar	L1TP
	LC08_L1TP_009061_20171218_20171224_01_T1.tar	L1TP

Fuente: United States Geological Survey, 2018

3.2.3.3. Calibración Radiométrica

Todos los sensores remotos, incluidos para el presente caso los satélites Landsat, han sido diseñados para captar la variación de energía electromagnética reflejada por el objeto monitoreado (CARNEGIE, 2014). El resultado de la medición de la energía radiante son los denominados números digitales (DN) (Eastman, 2012). Debido a que cada sensor Landsat, mejora y desarrolla mejores herramientas de teledetección (LEICA, 2005), los DN correspondientes a cada sensor no son comparables en un principio ya que se miden a diferentes resoluciones radiométricas, en el presente caso al realizar un estudio multitemporal y comparar imágenes procedentes de un mismo proyecto de observación, pero de varios satélites, es necesario calibrar radiométricamente los DN a unidades de radiancia, las cuales son expresadas en vatios por metro cuadrado por unidad de ángulo sólido (CARNEGIE, 2014). Estas variaciones inter-satelitales se dan debido a las diferencias del tamaño del píxel muestreado, diferencias en el ancho de la banda correspondiente a la longitud de onda, y diferencias en el rango dinámico de

cuantificación (Thenkabail, 2009), para los datos colectados a continuación se resumen dichas variaciones (Tabla 9).

TABLA 9: DIFERENCIAS INTERSATELITALES DE LOS DATOS DESCARGADOS SIN NUBOSIDAD

Año Imagen	Sensor	Tamaño píxel [m]	Rango espectral [µm]	Número de bandas	Resolución Radiométrica [bits]	Rango de medición [DN]
1978	Landsat 2 MSS	80	0,5-1,1	4	6	0-64
1986	Landsat 5 TM	30	0,45-12,5	7	8	0-256
1990	Landsat 5 TM	30	0,45-12,5	7	8	0-256
1992	Landsat 4 TM	30	0,45-12,5	7	8	0-256
1996	Landsat 5 TM	30	0,45-12,5	7	8	0-256
2002	Landsat 7 ETM+	30	0,45-12,5	8	8	0-256
2013	Landsat 8 OLI/TIRS	30	0,43-12,51	11	12	0-4096
2017	Landsat 8 OLI/TIRS	30	0,43-12,51	11	12	0-4096

Fuente: Hernández y Gilbes, 2014

Esta corrección es típicamente una calibración lineal, que se realiza en conjunto a todos los píxeles contenidos en una imagen; es decir, corrige los rangos de medición (DN) y; por lo cual, no mejora la fidelidad de la imagen pero normaliza su información para que esta sea comparable (Hansen y Loveland, 2012).

Fue utilizada la siguiente ecuación para obtener la radiancia (Thenkabail, 2009):

$$R_i = (G_i * DN) + C_i \qquad (3.1)$$

Dónde:

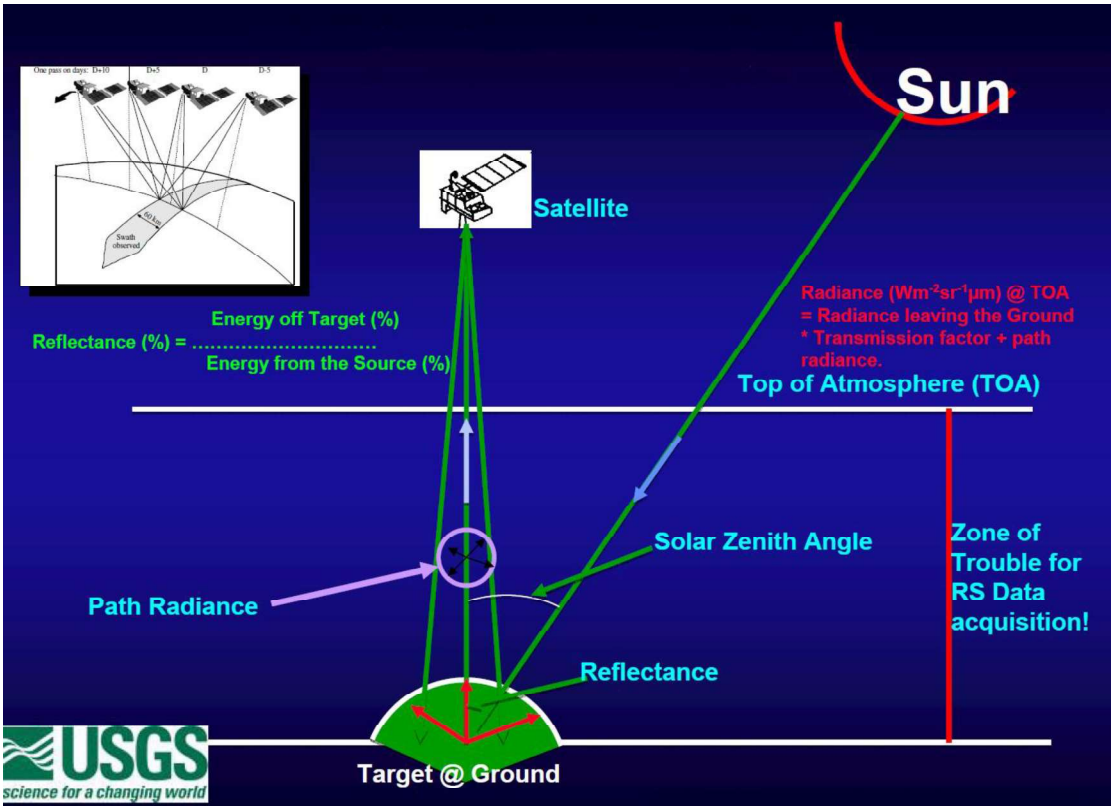
- R_i es la Radiancia Espectral expresada en $\frac{W}{m^2 * \mu m}$
- G_i es la Ganancia o Pendiente expresada en $\frac{W}{m^2 * \mu m}$
- DN es el Número Digital de cada píxel captado por el sensor
- C_i es la Compensación o Bias expresada en $\frac{W}{m^2 * \mu m}$

A parte del DN de cada píxel, los demás elementos como la ganancia o compensación se hallan en el metadato correspondiente a cada imagen (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2013)

La radiancia obtenida de la calibración radiométrica, también suele denominarse como radiancia de la parte superior de la atmósfera (Fig. 18) conocido como TOA

por sus siglas en inglés (Thenkabail, 2009). Esta radiación es comparable entre todas las imágenes (Hansen y Loveland, 2012).

FIGURA 18: RECORRIDO DE LA RADIACIÓN



Fuente: United States Geological Survey, 2009

3.2.3.4. Corrección Atmosférica

Como se mencionó anteriormente *(Véase 3.1.2)* las señales de radiación electromagnética colectadas por el satélite previamente han sido modificadas por la absorción y dispersión a través de su paso por la atmósfera, desde su reflexión en la superficie terrestre hasta la recepción por el sensor de teledetección remota (Song, Woodcock, Seto, Lenney, y Macomber, 2001). Por ello, al analizar digitalmente dichos datos colectados en este caso específico procedentes de los satélites Landsat TM y OLI/TIRS, como parte final del pretratamiento, los efectos ocasionados por estas interacciones atmósfera-radiación deberán ser minimizados o eliminados en medida de lo posible, a este proceso se lo denomina

corrección atmosférica (Chavez, 1988). Sin embargo, la corrección atmosférica no es necesaria en todas las aplicaciones de la clasificación de imágenes satelitales; Por ejemplo, la clasificación de una imagen individual; es decir, de solo una fecha específica, no necesita corrección atmosférica ya que se parte del supuesto que en ausencia de nubes, la atmósfera es horizontalmente homogénea, por lo cual los efectos atmosféricos en cada pixel son exactamente iguales a los de los demás píxeles, y la clasificación no sufrirá ningún cambio representativo antes y después de la corrección (Song et al., 2001). Para el presente estudio, al realizar un análisis de detección de cambio a través de clasificaciones multitemporales de imágenes satelitales, la corrección atmosférica fue completamente necesaria.

Todos los métodos de corrección atmosférica tienen por objetivo convertir la radiancia en reflectancia de la superficie. Para ello, los métodos más eficaces que han sido desarrollados, son los códigos de transferencia radiativa, también denominados métodos absolutos, para lo cual este código requiere información precisa de las propiedades ópticas atmosféricas en el momento exacto de la adquisición de la imagen satelital, esta información a menudo es inexistente o de baja calidad por lo cual las correcciones atmosféricas absolutas no siempre son viables (Song et al., 2001). Alternativamente, se pueden emplear métodos relativos de corrección atmosférica, los cuales se caracterizan por utilizar sencillamente la información contenida en la misma imagen satelital; de estos, el más ampliamente utilizado es la Sustracción de Objeto Oscuro o DOS por sus siglas en inglés (Chavez, 1988). Partiendo del supuesto mencionado anteriormente en el que se considera a la atmosfera horizontalmente homogénea y que la superficie representada en la imagen satelital es una superficie lambertiana, el objeto oscuro puede ser un cuerpo de agua, una densa masa de bosque o una sombra, teniendo en cuenta que dicho objeto oscuro a una determinada longitud de onda no reflejará la radiación, es posible considerar que el valor captado por el satélite en ese punto, es la radiación que fue dispersada de la interacción radiación-gases atmosféricos (Schroeder, Cohen, Song, Canty, y Yang, 2006). Esta aproximación determina el píxel que tenga el valor DN mínimo

a una determinada banda; posteriormente se procede a restar dicho valor a los todos los píxeles de la escena en esa misma banda (Song et al., 2001).

Entonces, teniendo en cuenta las suposiciones anteriores, la relación entre TOA y la reflectancia de la superficie como se menciona en (Song et al., 2001) viene dada por:

$$TOA = L_p + \frac{\rho F_d T_v}{\pi(1-s\rho)} \quad (3.2)$$

Dónde:

- TOA es la Radiancia Top of Atmosphere expresada en $\frac{W}{m^2 * \mu m}$
- L_p es la Radiancia de Camino expresada en $\frac{W}{m^2 * \mu m}$
- F_d es la Irradiancia recibida por la superficie terrestre expresada en $\frac{W}{m^2 * \mu m}$
- T_v es la Transmitancia atmosférica desde la superficie hacia el sensor
- s es la fracción de radiación ascendente dispersada por la atmósfera
- ρ es la reflectancia de la superficie

Teniendo en cuenta que, la Irradiancia recibida por la superficie terrestre se define como:

$$F_d = E_b + E_{down} \quad (3.3)$$

Dónde:

- E_{down} es la Irradiancia difusa
- E_b es el haz de Irradiancia

Este último a su vez viene dado por:

$$E_b = E_o \cdot cos\theta_z \cdot T_z \quad (3.4)$$

Dónde:

- E_o es la Constante Solar Exoatmosférica

- T_z es la Transmitancia atmosférica
- θ_z es el ángulo cenital solar

Posteriormente, reemplazando las dos últimas ecuaciones en la primera, simplificando el valor de s debido a que es un valor muy pequeño, y tras despejar la reflectancia de la superficie, obtenemos:

$$\rho = \frac{\pi(TOA - L_p)}{T_v(E_o \cdot \cos\theta_z \cdot T_z) + E_{down}} \qquad (3.5)$$

Para el presente estudio fue seleccionado este método relativo, debido a la practicidad de utilizar los mismos datos contenidos en las imágenes satelitales; y debido a que en función de los objetivos planteados las firmas espectrales a clasificar gozan una amplia diferencia espectral, por lo cual cualquier proceso de corrección atmosférica absoluto sería un procedimiento exagerado que no generará ningún valor agregado al producto final. Además, existen 4 aproximaciones diferente para el método DOS, para el presente estudio fue seleccionado la aproximación DOS1 debido a que en la naturaleza los objetos no son absolutamente oscuros, por lo cual una mejor aproximación fue considerar una reflectancia superficial de 1% (Sobrino, Jiménez-Muñoz, y Paolini, 2004), las consideraciones tenidas en cuenta para la aproximación DOS1 ejecutada y el resto de aproximaciones, se resumen a continuación (Tabla 10) (Song et al., 2001):

TABLA 10: PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN PARA LAS 4 APROXIMACIONES DOS

Methods	T_v	T_z	E_{down}
DOS1	1.0	1.0	0.0
DOS2	1.0	$cos(\theta_z)$	0.0
DOS3	$e^{-\tau r/\cos(\theta_v)}$	$e^{-\tau r/\cos(\theta_z)}$	Rayleigh(6S)
DOS4	$e^{-\tau/\cos(\theta_v)}$	$e^{-\tau/\cos(\theta_z)}$	πL_p

Fuente: Song et al., 2001

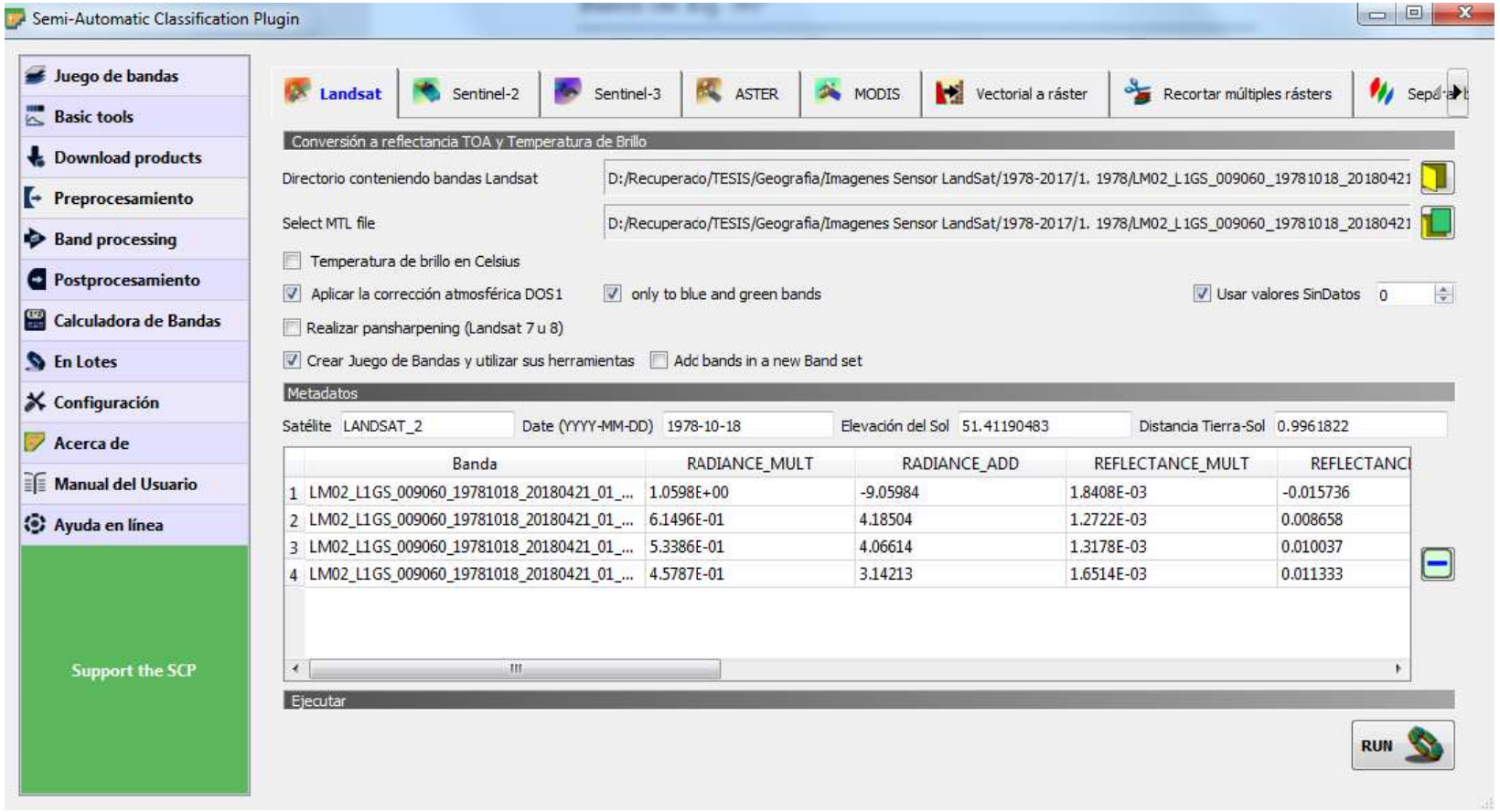
Finalmente, teniendo en cuenta la reflectancia superficial de 0,01 y el valor DN_{min} es el valor del píxel más oscuro en cada ancho de banda en al menos 1.000 píxeles (Schroeder et al., 2006), el efecto atmosférico es definido como (Congedo, 2018):

$$L_p = M_L \cdot DN_{min} + A_L - \frac{0{,}01 * E_o \cdot cos\theta_z}{\pi} \qquad (3.6)$$

Todo este proceso al igual que el resto del pretratamiento de las imágenes satelitales ha sido llevado a cabo mediante el Semi-Automatic Classification Plugin, del software de procesamiento geográfico Qgis.

Como se mencionó anteriormente (*Véase 3.2.3*) el pretratamiento de las imágenes satelitales se realizó exclusivamente mediante el complemento SCP del software de tratamiento geográfico Qgis. En la (Fig. 19) se muestra un ejemplo para la calibración radiométrica corrección y atmosférica para la imagen de 1978 proveniente de Landsat 02.

FIGURA 19: CALIBRACIÓN RADIOMÉTRICA Y CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA EN QGIS CON EL PLUGIN SCP

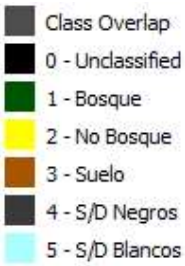


Elaboración: Jordan Andres Cruz

3.2.3.5. Selección Leyenda

En función de los objetivos planteados y de la disponibilidad de información; es decir, del número de bandas disponibles a clasificar por cada píxel, fueron designadas 5 clases por cada imagen satelital (Fig. 20), además se crearon por defecto del programa 2 clases extra que indican posibles errores en la clasificación.

FIGURA 20: CLASES SELECCIONADAS Y CREADAS POR DEFECTO



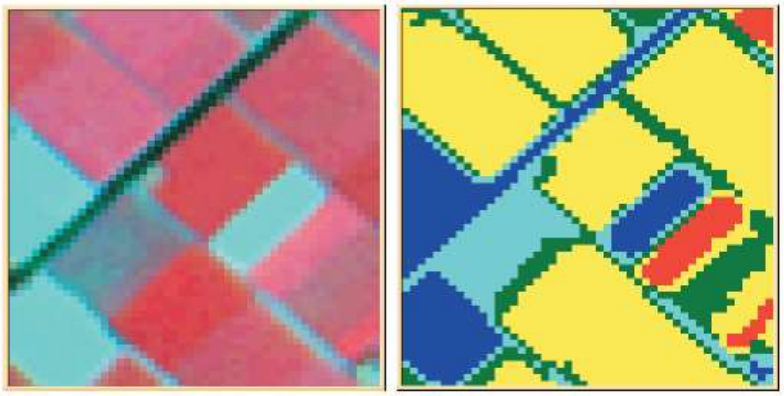
Elaboración: Jordan Andres Cruz

La clase 1 “Bosque” se refiere a las masas forestales que en el presente estudio fueron consideradas vegetación nativa o reforestada. Las clases 2 y 3 son consideradas áreas deforestadas, en las cuales se puede hacer una diferenciación espectral de la clase “No Bosque” que se refiere a zonas de cultivo de ciclo corto, presentes y ampliamente difundidas en el área de estudio; y entre la clase “Suelo”, la cual pertenece al suelo libre de vegetación o zonas de concreto. Las clases 4 y 5 se han denominado clases “Sin Datos”, fueron diseñadas la clase 4 “S/D Negros” para agrupar las sombras y la clase 5 “S/D Blancos” para agrupar aquellos píxeles donde se perdió la información debido a la presencia de nubes. Finalmente, las dos clases extras que se han generado automáticamente por el plugin de clasificación sirven para agrupar aquellos píxeles que han sido superpuestos en 2 o más clases o aquellos píxeles en los cuales los criterios de clasificación no se ajustaron a ninguna de las clases anteriormente mencionadas.

3.2.3.6. Clasificación

La clasificación es el proceso mediante el cual a partir de imágenes satelitales se producen mapas temáticos (Fig. 21); es decir, el área monitoreada dividida en clases, cada clase proporciona una variada cantidad de información, como: bosques, cultivos o suelo (Congedo, 2018). Entonces a partir de la interacción entre el material en la superficie terrestre y la energía electromagnética, el objetivo de la clasificación es hallar el área del espectro electromagnético monitoreado en el cual esa interacción tenga características diferenciantes entre una clase u otra, mediante un algoritmo de clasificación; a partir de ello, se postula que cada clase tiene una firma espectral correspondiente (Eastman, 2012).

FIGURA 21: IMAGEN SATELITAL SIN CLASIFICAR Y CLASIFICADA

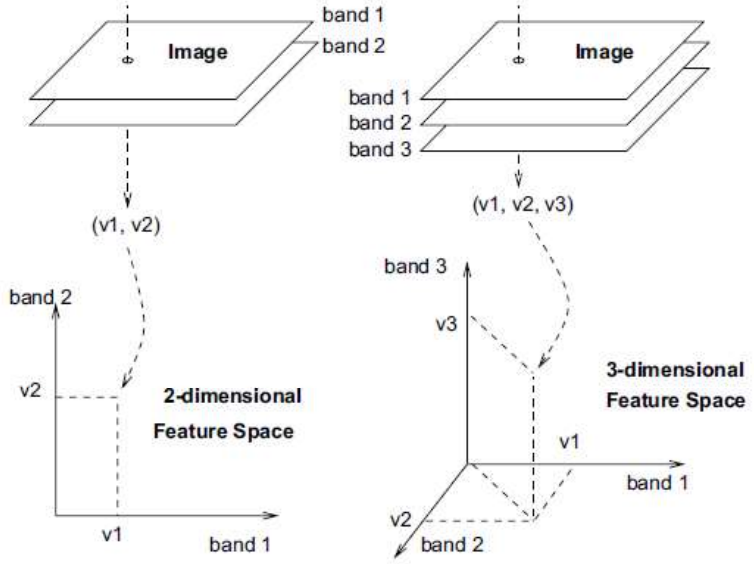


Fuente: University of Twente

Por otra parte, una imagen satelital multiespectral es una composición n-D de píxeles, “n” refiriéndose al número de bandas que se han monitoreado para obtener el producto final, en la Figura 22 se muestra una composición para una imagen 2-D y otra 3-D, el valor que la imagen tiene en cada una de las bandas es el anteriormente mencionado DN *(Véase 3.2.3.3),* con los distintos DN´s de cada banda, es posible definir el vector característico para cada uno de los píxeles (ITC, 2009), en el presente estudio se han utilizado al menos imágenes 7-D para el caso de imágenes Landsat 4-5 TM, a pesar de la dificultad de graficar el vector característico en 7 dimensiones, el principio continua siendo el ilustrado anteriormente.

En caso de no estar familiarizado con el terreno a clasificar o no tener claro los resultados esperados, se puede aplicar una clasificación No Supervisada, en la cual el software identifica patrones de ocurrencia común y de reflectancia distintiva, mediante los cuales procede a segmentar la imagen formando un indeterminado número de clases, posteriormente le corresponde al analista agrupar estas clases en función de las necesidades (Eastman, 2012). En este caso, tras conocer y entender las dinámicas que suceden en el área de estudio y en función de los objetivos planteados, fue seleccionada previamente la leyenda *(Véase 3.2.3.5.)*, por lo cual se ha aplicado una clasificación Supervisada.

FIGURA 22: VECTOR CARACTERÍSTICO IMÁGENES 2-D Y 3-D



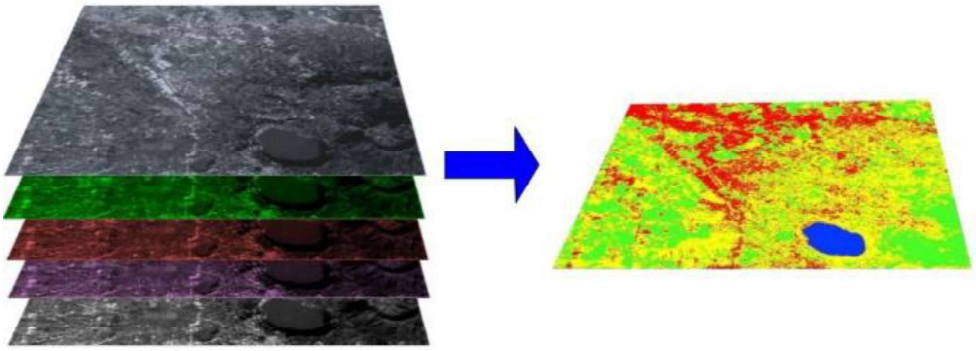
Fuente: University of Twente

Por otra parte, la clasificación supervisada, se caracteriza principalmente en que el analista, el cual está familiarizado con el área de estudio, designa los sitios de entrenamiento, los cuales serán las muestras para que el software estudie sus características espectrales y pueda asignar a cada píxel a una determinada clase (ITC, 2009).

Entonces, en la presente clasificación supervisada una vez conocidas las clases esperadas pero no su magnitud espacial, fue necesario designar áreas de

entrenamiento. Para ello, los datos previamente habían sido descargados y pre-tratados; sin embargo, estas imágenes satelitales corregidas corresponden a una imagen monocromática por cada banda monitoreada, por lo cual fue necesario fusionar la información de cada imagen monocromática, en una imagen compuesta (Figura 23). Adicionalmente en este mismo paso, para la interpretación visual de los sitios de entrenamiento, la imagen compuesta se puede representar como una composición de color RGB (Red, Green, Blue) en la que se puede asignar una banda a cada color y gráficamente la intensidad del color representará la reflectancia correspondiente a esa longitud de onda para ese píxel (Congedo, 2018).

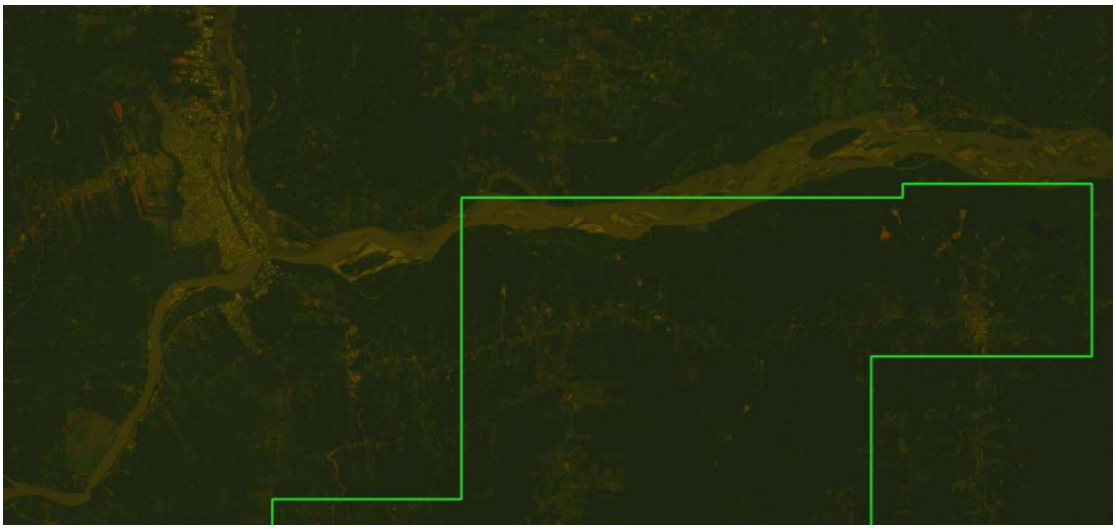
FIGURA 23: COMPOSICIÓN DE UNA IMAGEN SATELITAL



Fuente: Manual SCP, 2018

Previamente a realizar la composición de la imagen fue necesario establecer las bandas que iban a ser representadas en la composición RGB por cada satélite, en función de que esta composición facilite la interpretación visual de las clases deseadas (Fig. 24 y 25).

FIGURA 24: FCO. DE ORELLANA Y PARTE DE LA ZONA DE ESTUDIO A COLOR REAL AÑO 2013



Elaboración: Jordan Andres Cruz

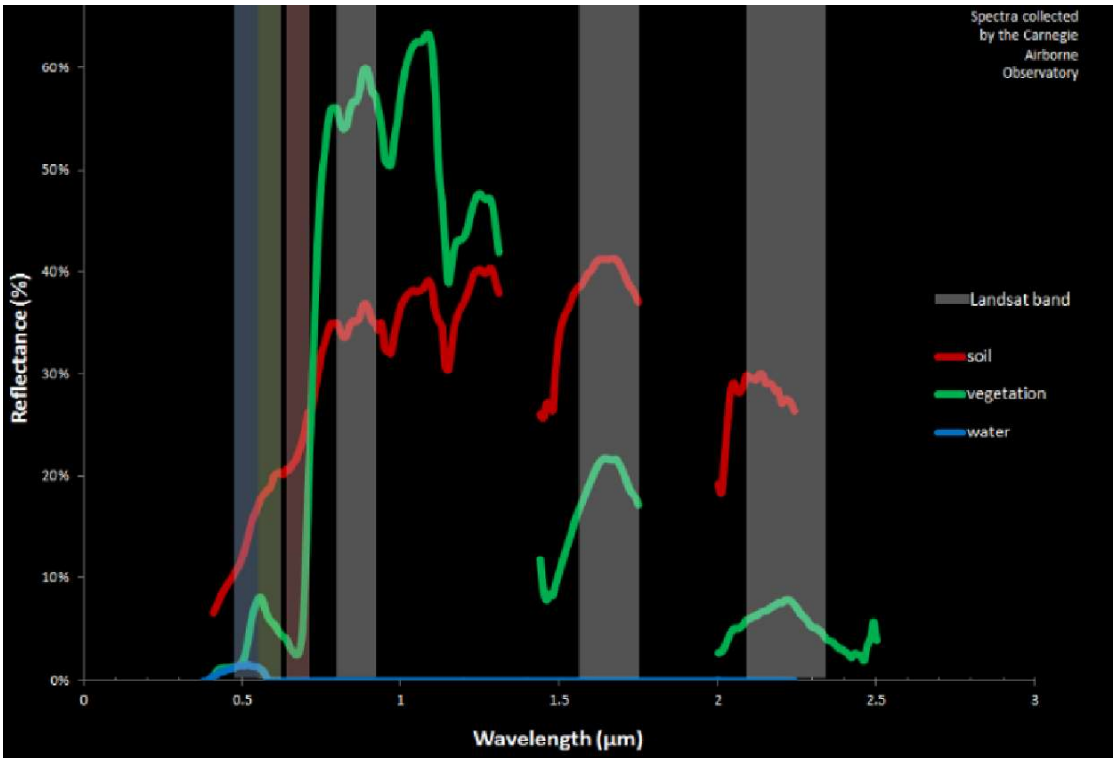
FIGURA 25: FCO. DE ORELLANA Y PARTE DE LA ZONA DE ESTUDIO A FALSO COLOR AÑO 2013

Elaboración: Jordan Andres Cruz

En base a un extenso trabajo de campo realizado específicamente para bosques tropicales como los de la amazonía ecuatoriana Carnegie (2014) ha recopilado una gran cantidad de información in situ, que ha permitido determinar las firmas espectrales (Fig. 26), para la vegetación, el suelo desnudo y el agua. Estas firmas

espectrales han permitido identificar características diferenciantes entre: vegetación sana, vegetación degradada y suelo desnudo. La vegetación sana es posible caracterizarla debido a los pigmentos fotosintéticos de sus hojas, la cantidad de agua y follaje en el dosel superior. La vegetación degradada a través del reconocimiento de compuestos secos del carbono, madera expuesta y una mayor cantidad de suelo expuesto, esta caracterización también sirve para determinar las áreas de cultivo de ciclo corto o pastizales. Finalmente el suelo desnudo se determina debido a la presencia de materia orgánica y componentes minerales y además sirve para identificar construcciones humanas realizadas con ladrillo o concreto (Asner, 2014).

FIGURA 26: FIRMAS ESPECTRALES PARA SUELO, VEGETACIÓN Y AGUA



Fuente: University of Stanford

Teniendo en cuenta, las firmas espectrales que permiten identificar los procesos de deforestación en el área de estudio y por otra parte las bandas a las cuales los satélites Landsat monitorean la superficie terrestre *(Véase 3.1.2.1.)* fueron seleccionadas las configuraciones para la visualización de las imágenes

compuestas, mostradas en la Tabla 11. Cabe destacar que a pesar de que visualmente la configuración solo permite apreciar los cambios de las 3 bandas ubicadas en la visualización RGB, la imagen compuesta y la clasificación serán ejecutadas con la información de las bandas adicionales, ya que es importante contar con la mayor cantidad de información disponible por píxel para que la clasificación sea más eficiente.

El software SCP realiza la composición y visualización de la imagen, creando una imagen en la cual cada píxel contiene la información de todas las bandas deseadas; es decir, creando un conjunto ráster. Para ello, utiliza la herramienta "juego de bandas" la misma que posee una configuración rápida de longitud de onda (Tabla 12), la cual permite determinar los centros de la longitud de onda y los factores aditivo y multiplicativo de cada banda necesarios para la corrección radiométrica también denominados "ganancia" y "compensación" respectivamente *(Véase 3.2.3.3.)*. Además, en este paso se han excluido las bandas Landsat para algún tipo de monitoreo específico como, por ejemplo, la banda 9 de Landsat 08 OLI/TIRS la cual está diseñada exclusivamente para el monitoreo de nubes tipo Cirro.

TABLA 11: COMBINACIONES RGB PARA IMÁGENES UTILIZADAS

Análisis LandSat de Vegetación RGB Display									
Característica	Espectro	LandSat 8 OLI + TIRS		LandSat 7 ETM+		LandSat 4-5 TM		LandSat 1-3 MSS	
		λ Reflactancia [µm]	Operational Land Imager and Thermal Infrared Sensor (OLI	λ Reflactancia [µm]	Enhanced Thematic Mapper Plus	λ Reflactancia [µm]	Thematic Mapper [Banda]	λ Reflactancia [µm]	Multispectral Scanner [Banda]
Suelo	SWIR 1	1,57 - 1,65	6	1,55 - 1,71	5	1,55 - 1,75	5	0,80 - 1,10	4
Vegetación	NIR	0,851 - 0,879	5	0,77 - 0,90	4	0,76 - 0,90	4	0,70 - 0,80	3
Vegetación degradada	Red	0,636 - 0,673	4	0,63 - 0,69	3	0,63 - 0,69	3	0,60 - 0,70	2

Elaboración: Jordan Andres Cruz

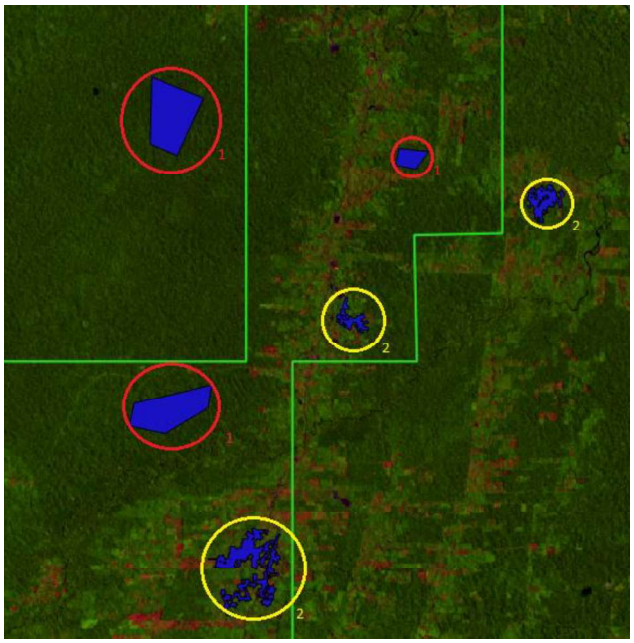
TABLA 12: CONFIGURACIONES CENTRO DE BANDA EN EL JUEGO DE BANDAS DE SCP

Satélite Fuente	Bandas Utilizadas	Centro λ
LandSat 1-3 MSS	4	0,55
	5	0,65
	6	0,75
	7	0,95
LandSat 4-5 TM	1	0,485
	2	0,56
	3	0,66
	4	0,83
	5	1,65
	7	2,215
LandSat 7 ETM+	1	0,485
	2	0,56
	3	0,66
	4	0,835
	5	1,65
	7	2,22
LandSat 8 OLI/TIRS	2	0,48
	3	0,56
	4	0,655
	5	0,865
	6	1,61
	7	2,2

Fuente: Manual SCP

Posteriormente se procede a dibujar las áreas de entrenamiento manualmente; en el panel SCP, se denominan ROI´s (Regions of Interest) y para lo cual dispone dos herramientas (Fig. 27). Con la primera se crean ROI´s por polígonos, seleccionando uno a uno los vértices del polígono; para la segunda, mediante el algoritmo de región incremental se selecciona un píxel semilla y el algoritmo selecciona los píxeles adyacentes en función de su similitud espectral, se puede variar la distancia euclidiana; es decir, a mayor distancia euclidiana se seleccionarán píxeles con menos similitudes espectrales y también el analista puede definir el tamaño máximo del polígono (Congedo, 2018).

FIGURA 27: PARTE DE LA ZONA DE ESTUDIO CON ÁREAS DE ENTRENAMIENTO DIBUJADAS CON POLÍGONOS (1) Y CON EL ALGORITMO DE REGIÓN INCREMENTAL (2)



Elaboración: Jordan Andres Cruz

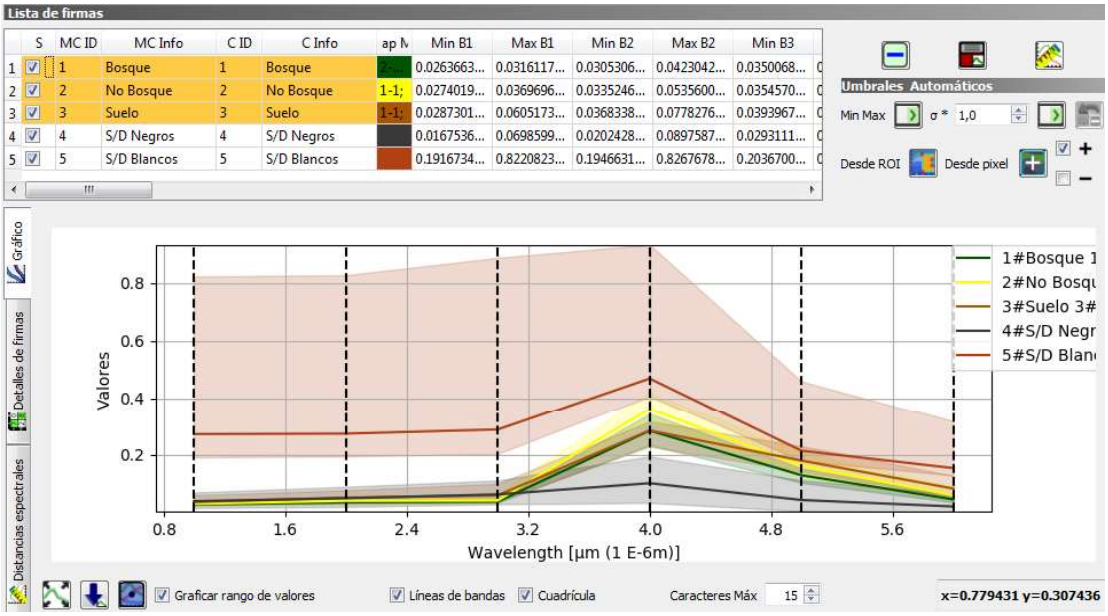
Como se mostró anteriormente (*Véase 3.1.2.2.*), para cubrir toda el área de estudio fue necesario utilizar dos imágenes satelitales por cada año, entonces la primera opción fue realizar un mosaico con ambas imágenes; sin embargo, debido a que las imágenes descargadas vienen orientadas inclinadamente y enmarcadas en un fondo negro, implicaba mucho trabajo recortar el marco banda por banda de cada imagen, previo a la clasificación. Por ello, se clasificaron ambas imágenes por separado, teniendo en cuenta la zona en común de ambas imágenes como zona de control para que ambas clasificaciones sean lo más similares posibles, utilizando las mismas áreas de entrenamiento en ambas clasificaciones. Fue posible verificar el área en común como zona de control al verificar una gran similitud entre los valores de reflectancia para un mismo pixel en ambas imágenes, lo cual se esperaba al haber realizado exactamente los mismos procesos de corrección para todas las imágenes.

Además, para la clasificación es necesario utilizar la mayor cantidad de información disponible para enriquecer el algoritmo y para verificar la clasificación con zonas fuera del área de estudio; por lo cual, no fue practico cortar las imágenes antes de clasificarlas.

Posteriormente, el analista puede seleccionar entre los siguientes algoritmos de clasificación: distancia mínima, máxima probabilidad y mapeo de ángulo espectral. De acuerdo a (Congedo, 2018) el algoritmo de máxima probabilidad se basa en el teorema de bayes en el que las condicionales se refieren a la pertenencia o no de un píxel en una determinada clase, mediante este teorema, el algoritmo calcula las distribuciones de probabilidad para las clases y ubica a los píxeles en cada una de ellas. Por otra parte, el algoritmo mapeo de ángulo espectral, calcula el ángulo entre los vectores característicos de las firmas espectrales de los píxeles y las firmas espectrales de los píxeles de las áreas de entrenamiento, de esta forma agrupa los píxeles en su respectiva clase.

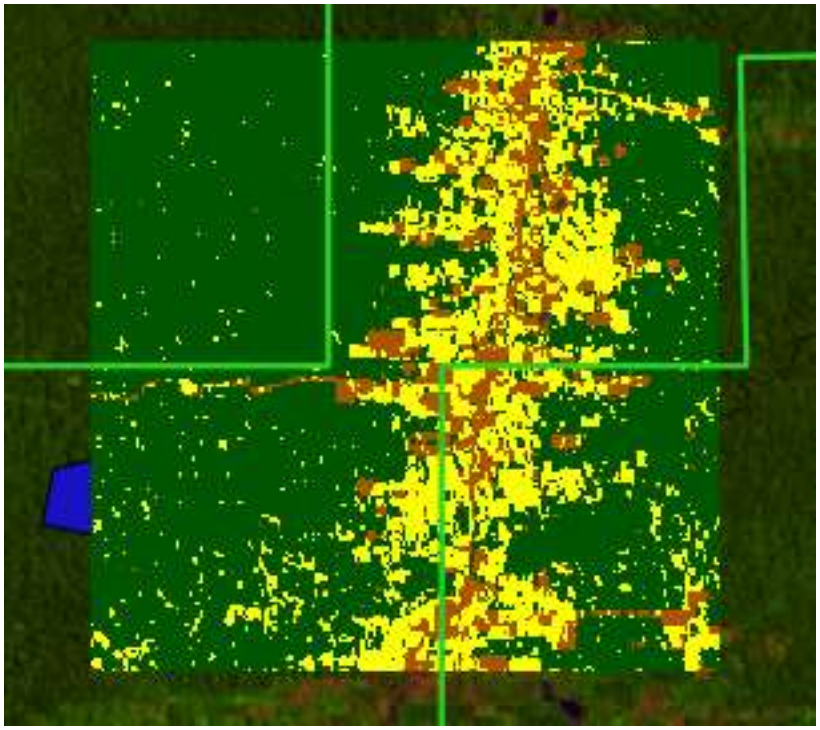
En el presente estudio fueron utilizadas directamente las firmas espectrales para la clasificación de las imágenes satelitales (Fig. 28), agregando las ROI´s dibujadas al gráfico de firmas espectrales. En esta clasificación fue posible modificar los valores umbrales de las firmas espectrales de cada clase en caso de que la pre-visualización temporal muestre evidentes errores en la clasificación (Fig. 29). Sin embargo, existen píxeles que se pueden ajustar a dos o más firmas espectrales; es decir en los píxeles sobrepuestos, así mismo, en los pixeles que no se ajustaron a ninguna de las firmas espectrales, fue aplicado el algoritmo de clasificación de Distancia Mínima.

FIGURA 28: GRÁFICO DE FIRMAS ESPECTRALES



Elaboración: Jordan Andres Cruz

FIGURA 29: PREVISUALIZACIÓN DE PARTE DE LA ZONA DE ESTUDIO CLASIFICADA



Elaboración: Jordan Andres Cruz

El Algoritmo de Distancia mínima se refiere al cálculo de la distancia euclidiana entre las firmas espectrales de las áreas de entrenamiento y las firmas espectrales entre el resto de píxeles. Esta distancia euclidiana se refiere a la distancia vectorial entre los vectores característicos explicados anteriormente (Fig. 22) y está definida por la siguiente fórmula:

$$d(x,y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2} \qquad (3.7)$$

Dónde:

- x es el vector característico de un píxel de la imagen
- y es el vector característico de un píxel del área de entrenamiento
- n es el número total de bandas

Fue utilizada, la siguiente expresión como función discriminante, en la cual además es posible añadir un valor umbral, el valor umbral establecerá una distancia euclidiana mínima para que un píxel clasificado sea reconocido como un símil de un píxel de entrenamiento (Congedo, 2018). Para el presente estudio no fue necesario seleccionar un valor umbral, gracia s a la gran diferencia espectral entre las clases deseadas.

$$x \in C_k \leftrightarrow d(x,y_k) < d(x,y_j) \;\forall\; k \neq j \wedge d(x,y_k) < T_i \qquad (3.8)$$

Dónde:

- C_k es la clase de cobertura k
- y_k es la firma espectral de la clase k
- y_j es la firma espectral de la clase j
- T_i es el valor umbral, excluye a los píxeles bajo este valor

Se obtuvieron dos mapas clasificados por cada año, en este punto fue realizada una extracción por máscara utilizando el polígono del bloque 61 (*Véase 3.2.1*) y

de esta forma fue obtenido el mapa del bloque clasificado sin información sobrante, en dos partes.

En esta fase del estudio, debido a la gran cantidad de nubosidad fueron descartadas las imágenes correspondientes a los años 1990 y 1992, debido a la poca cantidad de información en las bandas del Landsat 02 se descartó también el mapa proveniente de 1978 ya que no provee la suficiente información para que el algoritmo de clasificación produzca las clases deseadas. La imagen correspondiente al año 1996, produjo un error de desalineación de bandas, por lo cual no pudo ser clasificada, se reintentó la descarga y el error persistió. Por todo ello, el período de estudio quedo finalmente configurado de la siguiente forma: 1986, 2002, 2013 y 2017, cubriendo así 31 años de operaciones petroleras en el bloque 61.

Finalmente fue ejecutado el programa y el siguiente paso fue analizar la precisión del mapa clasificado. Si la precisión era inaceptable se procedió a reutilizar las áreas de entrenamiento y variar los valores umbrales del algoritmo y firmas espectrales.

3.2.3.7. Evaluación de la Precisión

Para identificar y medir los errores, posterior a la clasificación de una imagen satelital es necesario evaluar la precisión del mapa (Congedo, 2018), de esta forma es posible obtener índices cuantitativos que permiten evaluar al analista el éxito de su clasificación (Rossiter, 2014). Este proceso básicamente se refiere a comparar el mapa producido con datos geográficos que son asumidos como reales; para ello, se puede contar con información levantada *in situ* o en su defecto es posible utilizar fotografía espacial de alta resolución (LEICA, 2005).

De acuerdo a Rossiter (2014) la evaluación de la precisión puede subdividirse en las siguientes fases:

- Determinar el diseño muestral. Es decir, definir el tamaño y características de la muestra.

- Hallar la respuesta de la muestra. Se refiere, a los métodos para corroborar la información en los puntos de muestra.
- Definir el protocolo de análisis. Con lo cual, a partir de las muestras y sus respectivas respuestas, se puede concluir la precisión.

Para el presente estudio la muestra fue diseñada de acuerdo a lo propuesto por (Canters, 2015), el cual estima el tamaño de la muestra en función del número de bandas utilizadas para la clasificación de imágenes:

$$N = b\ x\ 20 \tag{3.9}$$

Dónde:

- N es el tamaño de la muestra expresada en pixeles a evaluar
- b es el número de bandas

Entonces, como se menciona anteriormente (*Véase 3.2.3.6*) al utilizar 6 bandas en todas las clasificaciones:

$$6\ x\ 20 = 120 \tag{3.10}$$

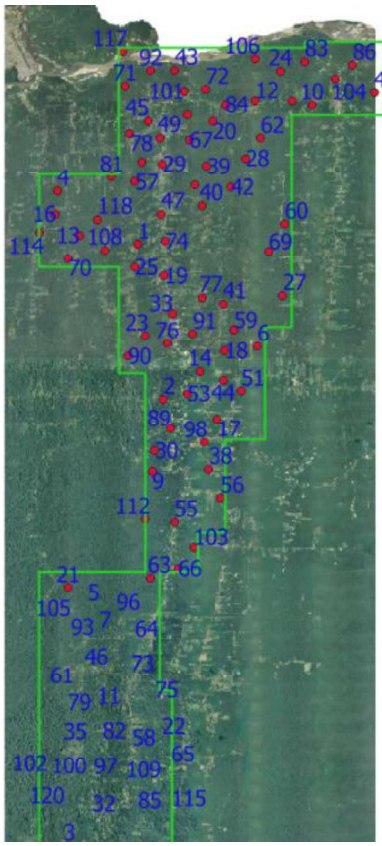
Los 120 píxeles a evaluar fueron seleccionados corriendo el algoritmo de puntos aleatorios de QGIS, exclusivamente ubicados en el polígono del área de estudio a una distancia radial mínima de 1500 m de separación entre cada punto.

Para el diseño de respuesta, de los puntos seleccionados, fue utilizada la ortofotografía digital de alta resolución, que fue entregada como un producto del programa del "Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica, SIG TIERRAS" correspondiente al Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP). Esta serie de fotografías cubre 225 449 km^2 del territorio nacional. Las cuales fueron tomadas por cámaras fotogramétricas digitales multiespectrales (RGB y NIR) y específicamente en la amazonía norte las fotografías fueron tomadas por la subcontratista Stereocarto Aeromapa, con una resolución de 50 cm a finales del año 2012 (SIG Tierras, 2012). A pesar de que siempre se debe procurar utilizar datos del terreno levantados físicamente en una visita al área de estudio, en el presente caso

debido a la extensión de la zona de estudio y a que gran parte de ella esta concesionada a empresas privadas, imposibilita el levantamiento *in situ* de los datos. Sin embargo, debido a la alta resolución de las imágenes y las evidentes diferencias entre una y otra clase, las ortofotografías pueden ser asumidas como la realidad terrena del área estudiada.

En la siguiente (Fig. 30) se muestra el área de estudio, con los pixeles a evaluar distribuidos aleatoriamente y las fotografías correspondientes, cuya codificación se muestra en el Anexo 2.

FIGURA 30: BLOQUE 61 CON PUNTOS ALEATORIOS Y ORTOFOTOGRAFÍAS DE FONDO



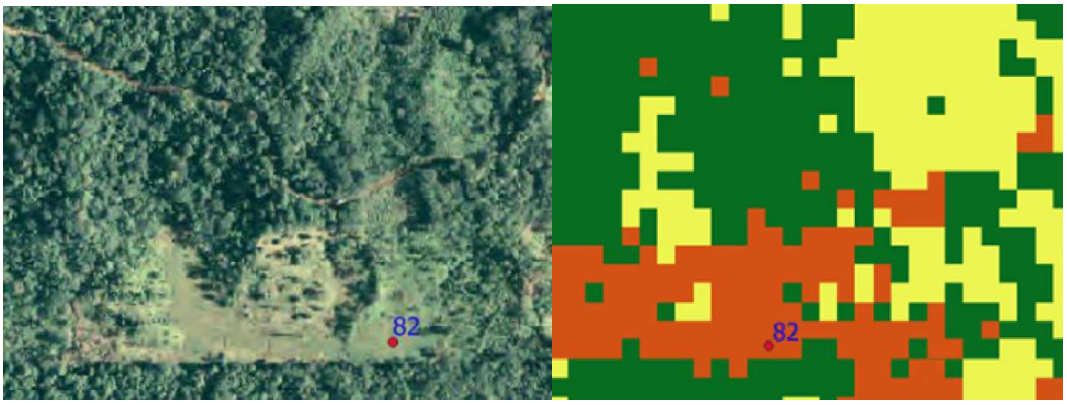
Elaboración: Jordan Andres Cruz

El proyecto de tomar fotografías de alta resolución a todo el Ecuador, llevado a cabo por el SIG Tierras, es el primero y único en su tipo de libre acceso y alta

confiabilidad, combinado con la multitemporalidad del presente estudio, ambos factores imposibilitan contar con información histórica de alta confiabilidad para los mapas clasificados de años anteriores al 2012; por lo cual se procedió a evaluar con la ortofotografía el mapa correspondiente al año 2013, teniendo en cuenta su cercana temporalidad.

Entonces en el (Anexo 2) se presentan los 120 puntos muestreados con sus respectivas coordenadas geográficas, la identificación con la fotografía y su representación final en el mapa (Fig. 31).

FIGURA 31: CORRESPONDENCIA POSITIVA PARA EL PUNTO MUESTRAL 82 CORRESPONDIENTE A LA CLASE “SUELO”



Elaboración: Jordan Andres Cruz

Para el análisis final se escogió la metodología sugerida por la Facultad de Geo-Información, Ciencia y Observación Terrestre de la Universidad de Twente (2009), en cuya publicación sugiere la elaboración de una “matriz de error” también denominada matriz de confusión o contingencia. En la Tabla 13 se muestra un ejemplo para 10 píxeles y 4 clases, en la cual fueron ubicados en las columnas los datos de la identificación fotográfica y en las filas las representaciones en el mapa.

TABLA 13: EJEMPLO DE UNA MATRIZ DE ERROR

		Fotografía				
		A	**B**	**C**	**D**	**TOTAL**
Clasificación	**a**	2	1	0	0	3
	b	1	3	0	0	4
	c	0	0	1	0	1
	d	0	0	0	2	2
	TOTAL	3	4	1	2	**10**

Elaboración: Jordan Andres Cruz

La precisión general podemos obtener dividiendo la diagonal principal de la matriz de error entre la muestra total. En el caso del ejemplo mostrado en la tabla anterior, la diagonal es: 2 + 3 + 1 + 2 mientras que el total es 10. La precisión general sería de 80%.

El error de Omisión, representa el porcentaje de píxeles que no han sido clasificados en la clase correcta por cada clase. Por ejemplo, en la clase A sería 1 píxel clasificado erróneamente dividido entre 3 existentes. Un error de omisión para la clase A de 33,3%.

3.2.4. ANÁLISIS DE AGRUPAMIENTO

Al contar con los mapas clasificados con una adecuada precisión, fue necesario extraer resultados que aporten a la consecución de los objetivos planteados. Para ello, en este proceso se obtuvieron las áreas deforestadas en cada uno de los años analizados. Utilizando el polígono del área de estudio descrito anteriormente *(Véase 3.2.1)* fue necesario dividir el área del bloque 61 en dos partes, la primera correspondiente a la imagen satelital de Path=9 y Row=61 y la segunda a la imagen Path=9 y Row=60, las imágenes satelitales en función del satélite del que provienen, cubren diferentes áreas de la zona de estudio. Por lo cual, fue necesario dibujar en total 6 polígonos shape, estos polígonos no están relacionados con la clasificación, solo fueron dibujados para la extracción del área de estudio por máscara desde la imagen satelital completa (Tabla 14).

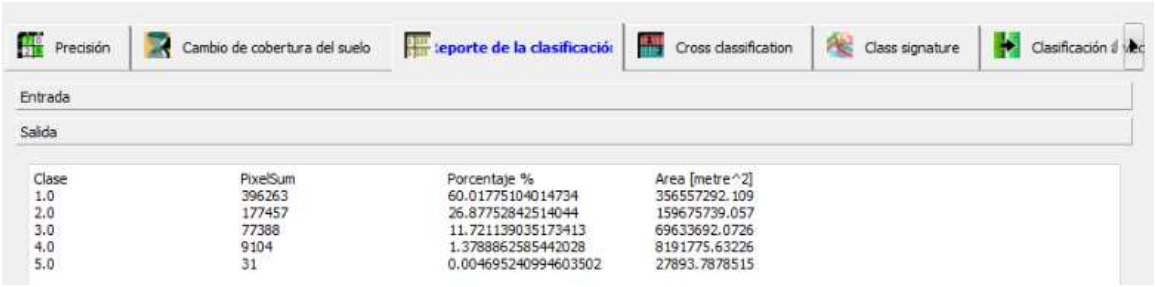
TABLA 14: SHAPES DIBUJADOS PARA EXTRACCIÓN

Año	Satélite	Shapes dibujados
1986	Landsat 05 TM	2
2002	Landsat 07 ETM+	2
2013	Landsat 08 OLI/TIRS	2
2017		
	TOTAL	**6**

Elaboración: Jordan Andres Cruz

A continuación, mediante la herramienta de extracción por máscara, del cuadro de herramientas ráster de Qgis, fue posible extraer solo el área de interés del resto de la imagen satelital. Finalmente, a las capas resultantes; a través de las herramientas de post-procesamiento del plugin SCP, fueron obtenidos los reportes de clasificación (Figura 32). A partir de estos reportes fue posible cuantificar las áreas ocupadas por cada clase y concluir las áreas deforestadas.

FIGURA 32: REPORTE DE CLASIFICACIÓN



Elaboración: Jordan Andres Cruz

3.2.4.1. Comparación Multitemporal de la Deforestación

La deforestación consultada directamente en los reportes de clasificación, no fue comparable en un principio, ya que cada imagen satelital tiene una cantidad diferente de pérdida de información, debido a los píxeles cubiertos por nubes y sus sombras.

Para ejercer una efectiva comparación fue definida el área útil, la cual se refiere exclusivamente al área con datos. Y para la comparación multitemporal fue calculado el porcentaje de área de cada clase respecto solamente al área útil, no al bloque en su totalidad.

Además fue posible cuantificar las tasas de deforestación, las cuales proveen importantes conclusiones sobre la rapidez de los cambios observados en las áreas deforestadas. Para ello, se utilizó la siguiente ecuación:

$$t = \frac{(A * b_i) - (A * b_j)}{j - i} \tag{3.13}$$

Dónde:

- t se refiere a la tasa de deforestación
- A es el área del bloque 61
- i es el año inferior sobre el cual fue calculada la tasa de deforestación
- j es el año superior sobre el cual fue calculada la tasa de deforestación

3.2.6. ANÁLISIS COSTO – BENEFICIO SOCIAL

En función de los objetivos previamente planteados, para formular una adecuada comparación entre el desarrollo de la industria petrolera y la conservación del bosque tropical amazónico, que no esté exclusivamente definida dentro del campo económico. Es decir, para no caer en un reduccionismo financiero y en subjetividades respecto a la valoración económica, porque esta problemática desborda las capacidades de los análisis financieros tradicionales. Para el presente estudio fue escogida alternativamente la herramienta del Análisis Costo-Beneficio Social, planteada por Azqueta et al. (2007) en la línea de los estudios de Economía Ambiental. La cual plantea al Análisis Costo-Beneficio Social, como una herramienta de toma de decisiones, en la cual el objetivo principal ya no es exclusivamente ganar dinero como en el caso del Análisis Costo-Beneficio Financiero, sino elevar el bienestar de la sociedad en general. Por lo cual, al

momento de tomar una decisión, una vez identificado el objetivo, es necesario identificar las diferentes alternativas, y determinar criterios de selección, que finalmente serán ponderados en función de la importancia de cada uno de ellos. Este proceso permitirá escoger una de las opciones o una combinación de ellas. Por lo tanto, el desarrollo de un análisis Costo-Beneficio Social se puede resumir en las siguientes fases:

- Establecimiento escenarios de referencia
- Identificación de alternativas relevantes
- Identificación de criterios de selección
- Valoración de costo y beneficios

Para el presente estudio fueron escogidas dos alternativas opuestas y extremas que permitan un acercamiento a la comparación más real de los costos y beneficios que cada una podría conllevar. Además, como un paso indispensable en este desarrollo es evaluar la opción real, en la que la decisión a tomar sea continuar de la misma forma que está implementado actualmente. Por tanto, las tres alternativas a discutir son: Promover una industrialización a gran escala, Promover un conservacionismo estricto; y la opción real, en la que ambas iniciativas conviven en diferentes proporciones. Adicionalmente, fue establecido el escenario “recomendado”, en el cual sería posible encontrar un punto de equilibrio en el cual se maximicen los criterios de selección, de acuerdo a los datos recabados.

Las 3 alternativas y los criterios de selección fueron comparados entre sí, mediante la elaboración de una matriz de Análisis Costo-Beneficio. Es necesario destacar que este paso inevitablemente está sujeto a la ineludible subjetividad del analista. Sin embargo, como fue establecido en uno de los objetivos del presente estudio, la generación de información confiable y objetiva, en este proceso se tuvieron en cuenta los postulados de objetividad científica y neutralidad axiomática planteados por Weber (1972). Además, a diferencia de las valoraciones económicas que obtienen datos de encuestas realizadas a ciudadanos comunes poco informados, las ponderaciones finales fueron

establecidas teniendo en cuenta los datos recopilados hasta el momento; respecto a la producción petrolera que se transforma en generación de riqueza. Por otra parte, las grandes pérdidas de masa boscosa que afectan a la biodiversidad y los demás servicios ecosistémicos que dependen de ella. De esta manera fue posible ponderar con la mayor objetividad posible, cada uno de los criterios de selección para cada una de las alternativas.

Así fueron establecidos los escenarios de referencia valorando los costes y beneficios de cada una de las opciones con una ponderación entre 0 y 1 por cada criterio de selección, fueron determinados 8 criterios de selección positivos y 5 negativos, por lo cual la ponderación final podría tener un valor mínimo de -5 y máximo de 8 (Fig. 33).

Las 3 alternativas fueron comparadas de acuerdo a los criterios indicados en la Tabla 15. También, se muestra los umbrales bajos y altos que fueron tomados en cuenta para ponderar cada criterio de selección, en la ponderación baja los valores son cercanos a cero, mientras que en la ponderación alta los valores de criterios positivos son cercanos a uno y criterios negativos cercanos a menos uno.

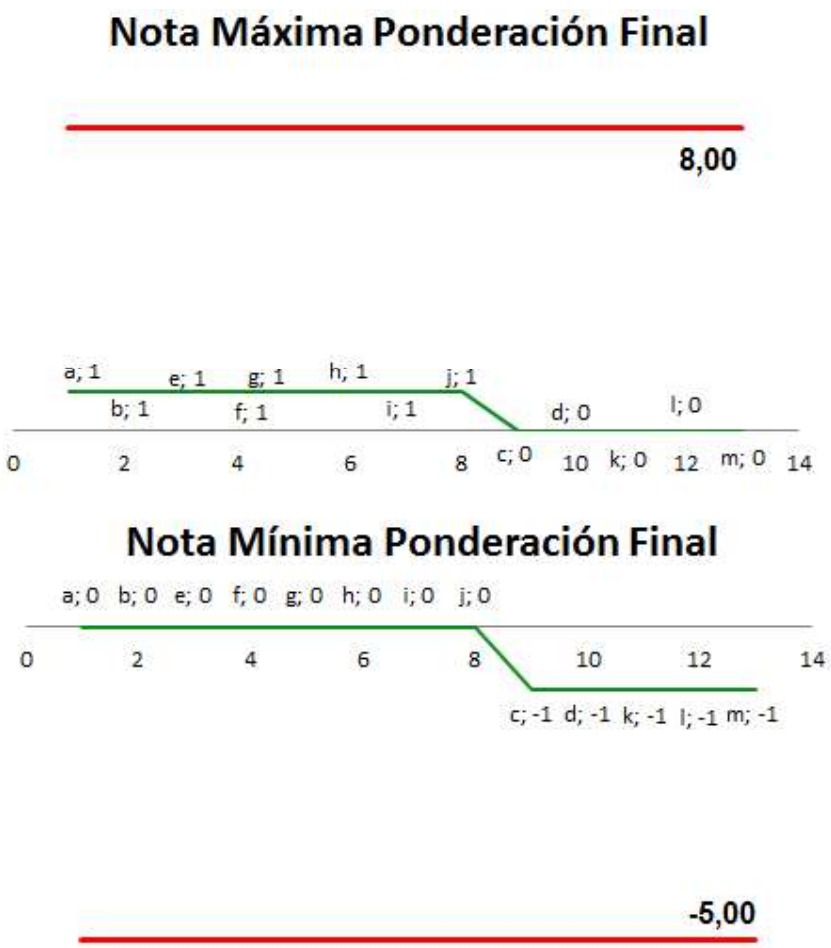
Una vez establecida la función matemática que permite obtener la ponderación final, y establecidas las ponderaciones para los 3 escenarios previos. Mediante 6 iteraciones con variaciones en la cobertura forestal de ±5%, ±10% y ±15% sobre el escenario real. Se determinaron la variabilidad de cada criterio de selección y finalmente su efecto en la ponderación final. De esta forma se dedujo el escenario recomendado.

TABLA 15: CRITERIOS DE SELECCIÓN

Criterio	Explicación	Ponderación baja	Ponderación Alta
Ingresos Estatales	En el Ecuador, los recursos hidrocarburíferos y minerales les pertenecen al estado Ecuatoriano. Además debido a la naturaleza primaria de la economía nacional, la exportación de pétroleo ha representado históricamente	Actividades que generen bajos ingresos estatales, comparando las cifras históricas y el presupuesto general del Estado.	Actividades que generen altos ingresos estatales, comparando las cifras históricas y el presupuesto general del Estado.
Ingresos Privados	Durante la explotación petrolífera se dan contrataciones con una gran cantidad de empresas privadas. La inyección de capital a la economía local y nacional genera una	Escenario bajo el cual los actores privados se ven minimamente beneficiados de la gestión del bosque en el área de estudio.	Actividades que dinamizan la economía, y se dan procesos de contratación con un gran número de actores privados.
Inversión Estatal	Es necesaria para la prestación de servicios públicos, y la construcción de infraestrutura estatal.	Actividades que necesitan una mínima presencia estatal.	Actividades en las que el Estado necesita realizar grandes inversiones, para proveer infraestructura, servicios o procesos de regulación y control.
Inversión Privada	Destinada a la capacitación del personal que trabaja en campo, la adquisición de maquinaria y tecnología, entre otros.	Actores privados necesitan invertir poco dinero para desarrollar sus actividades.	Actividades que necesitan altas inversiones privadas para desarrollarse.
Líquidez	Se refiere a la facilidad con la que un bien puede ser transformado en dinero en efectivo; por ejemplo, la extracción y venta de recursos naturales es mucho más rápida que una gestión	Proyectos en los que retorno de la inversión es bajo.	Actividades que debido a su naturaleza, es necesario esperar una gran catidad de tiempo para el retorno de la inversión.
Empleabilidad	Una presencia de una fuerte industrialización proveera indiscutiblemente una mayor cantidad de fuentes de empleo; sin embargo, la industria primaria genera relativamente pocos empleos debido a que no provee encadenamiento	Actividades que no necesitan altas cantidades de empleados y generalmente poco tecnificados.	Actividades que necesitan altas cantidades de empleados y generalmente altamente tecnificados.
Población Beneficiada	Se refiere al porcentaje de los Ecuatorianos que finalmente gozarán de los beneficios y si realmente aquellos ingresos se dirijen con eficiencia a la satisfacción de las necesidades de	Existe una alta concentración de los beneficios.	Los beneficios económicos y de todo tipo, son distribuidos de una manera más equitativa.
Regulación Ciclo Hidrológico	La importancia del ecosistema amazónico como un gran regulador mundial del ciclo hidrológico	Actividades que directamente producen deforestación.	Actividades que promueven la conservación de los bosques.
Fijación Gases de Efecto Invernadero	La gran cantidad de biomasa concentrada por el bosque amazónico permite la absorción de gases de efecto invernadero.	Actividades que directamente producen deforestación.	Actividades que promueven la conservación de los bosques.
Biodiversidad	En este análisis se ha tenido en cuenta el valor de existencia de la biodiversidad; es decir, que las especies de flora y fauna tienen un valor	Las actividades impactan directamente sobre la biodiversidad o su ecosistema.	El impacto es mínimo sobre la biodiversidad o su ecosistema.
Vulnerabilidad frente al Cambio Cilmático	Se considera que la región occidental de la Amazonía, debido a sus grandes extensiones de bosque trópical húmedo funciona como protección frente a los efectos del cambio	Actividades que directamente producen deforestación.	Actividades que promueven la conservación de los bosques.
Incidentes Ambientales	Los incidentes ambientales de las industrias extractivistas como derrames de crudo o desechos tóxicos no deberían ocurris bajo una adecuada gestión de seguridad industrial; sin	Actividades con baja probabilidad de que ocurran eventos de contaminación ambiental.	Actividades con alta probabilidad de que ocurran eventos de contaminación ambiental.
Incidentes Socio-Culturales	La introducción de pobladores no locales por parte de las industrias históricamente ha generado conflictos sociales y culturales.	Una baja introducción de prácticas que alteren el tejido socio-cultural de los pobladores locales.	Alta introducción de empleados que afecten el tejido soci-cultural de los pobladores locales.

Elaboración: Jordan Andres Cruz

FIGURA 33: PONDERACIONES FINALES PARA CASOS POSITIVO Y NEGATIVO



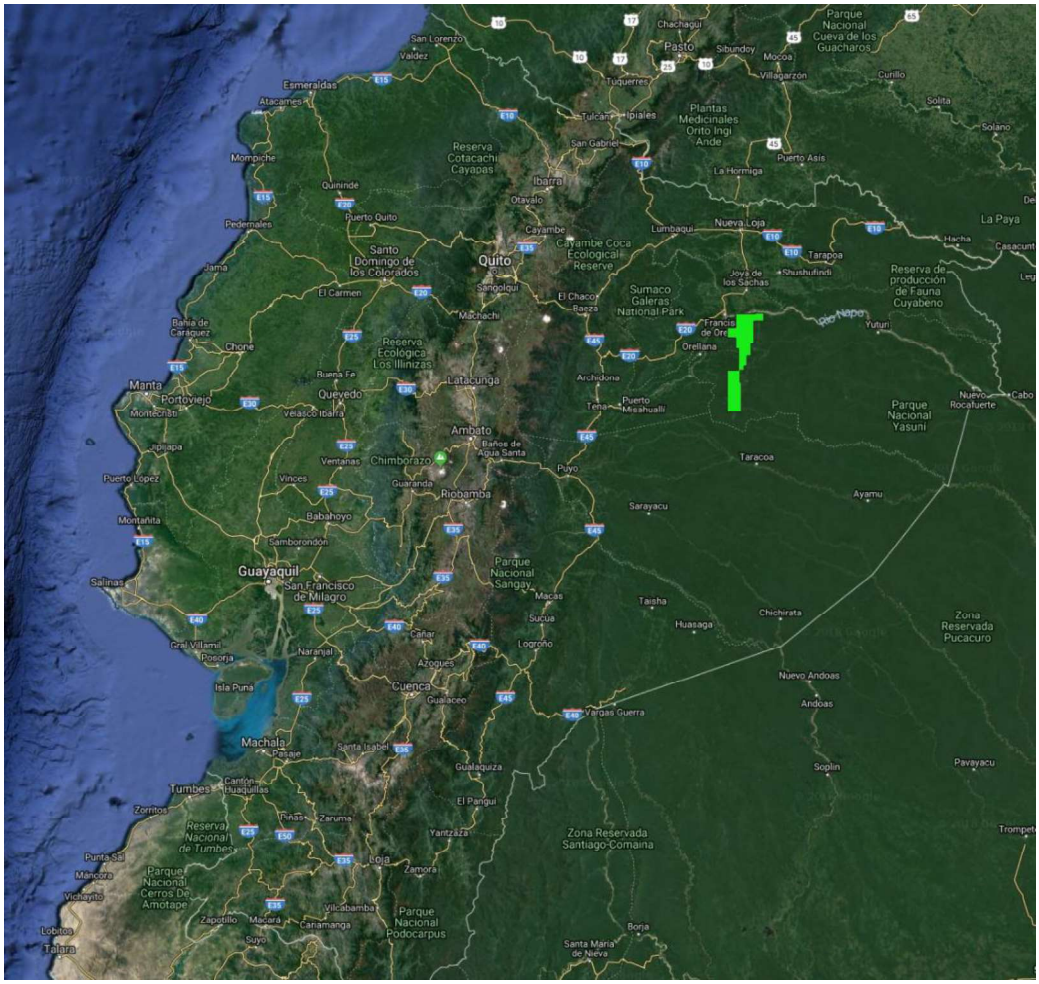
Elaboración: Jordan Andres Cruz

CAPÍTULO 4
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. POLÍGONO ÁREA DE ESTUDIO

Mediante las coordenadas de los vértices obtenidos del Bloque 61 *(Véase 3.2.1)* fue posible construir el archivo .shp correspondiente (Fig. 34), siendo el resultado un área total de 793,44 km². Es necesario mencionar que, los mapas construidos a base de datos monitoreados remotamente presentan la limitación de que existe una entidad areal mínima que puede ser mapeada como una unidad discreta; es decir, una unidad mínima de mapeo. La cual está definida en función del tamaño del píxel monitoreado. Para el caso del presente estudio al utilizar imágenes Landsat de resolución 30 m x 30 m, se ha determinado como Unidad Mínima de Mapeo un área de 3 pixeles x 3 pixeles; es decir 0,0081 km². Por lo tanto, el área supera en gran medida la Unidad Mínima de Mapeo y la resolución de las imágenes Landsat son completamente válidas para el área a mapear (Knight y Lunneta, 2003).

FIGURA 34: POLÍGONO ÁREA DE ESTUDIO



Elaboración: Jordan Andres Cruz

4.2. PRECISIÓN DE LOS MAPAS OBTENIDOS

Para evaluar la precisión de las clasificaciones; es decir en qué medida la realidad está siendo representada en los mapas obtenidos, en la tabla 16 se muestran los resultados de la matriz de Error. Esta matriz representa la clasificación del año 2013, teniendo en cuenta que el procedimiento fue exactamente igual en las otras tres clasificaciones es posible inferir que la precisión resultante es válida para todos los mapas obtenidos.

TABLA 16: MATRIZ DE ERROR DE LA CLASIFICACIÓN 2013

		Fotografía				
		Bosque	**No Bosque**	**Suelo**	**S/D**	TOTAL
Clasificación	Bosque	72	2	0	0	74
	No bosque	7	22	0	0	29
	Suelo	2	0	13	0	15
	S/D	0	0	0	2	2
	TOTAL	**81**	**24**	**13**	**2**	**120**

Elaboración: Jordan Andres Cruz

La evaluación de la precisión finalmente deberá aportar ideas claras que permitan responder las siguientes preguntas (Rossiter, 2014):

- ¿Qué proporción del mapa no representa con seguridad la realidad?
- ¿Cuáles clases han sido incorrectamente mapeadas?
- ¿Por qué se han producido estos errores?
- ¿Cuán serios son los errores cometidos?

Para responder algunas de estas preguntas se toman las aproximaciones estadísticas presentadas por (Canters, 2015). Explicadas anteriormente *(Véase 3.2.3.7)*. La precisión general:

$$Precisión\ General = \frac{72 + 22 + 13 + 2}{120} \tag{3.11}$$

$$Precisión\ General = \frac{109}{120} = 0{,}908$$

Por lo tanto, teniendo en cuenta que el 90,8% del mapa ha tenido una correspondencia positiva, deducimos que el 9,2% del mapa no representa fielmente a la realidad.

El error de omisión por cada clase:

$$Error\ de\ Omisión\ Bosque = \frac{9}{81} = 0{,}111 \tag{3.12}$$

$$Error\ de\ Omisión\ No\ Bosque = \frac{2}{24} = 0{,}083$$

$$Error\ de\ Omisión\ Suelo = \frac{0}{13} = 0$$

$$Error\ de\ Omisión\ Sin\ Datos = \frac{0}{2} = 0$$

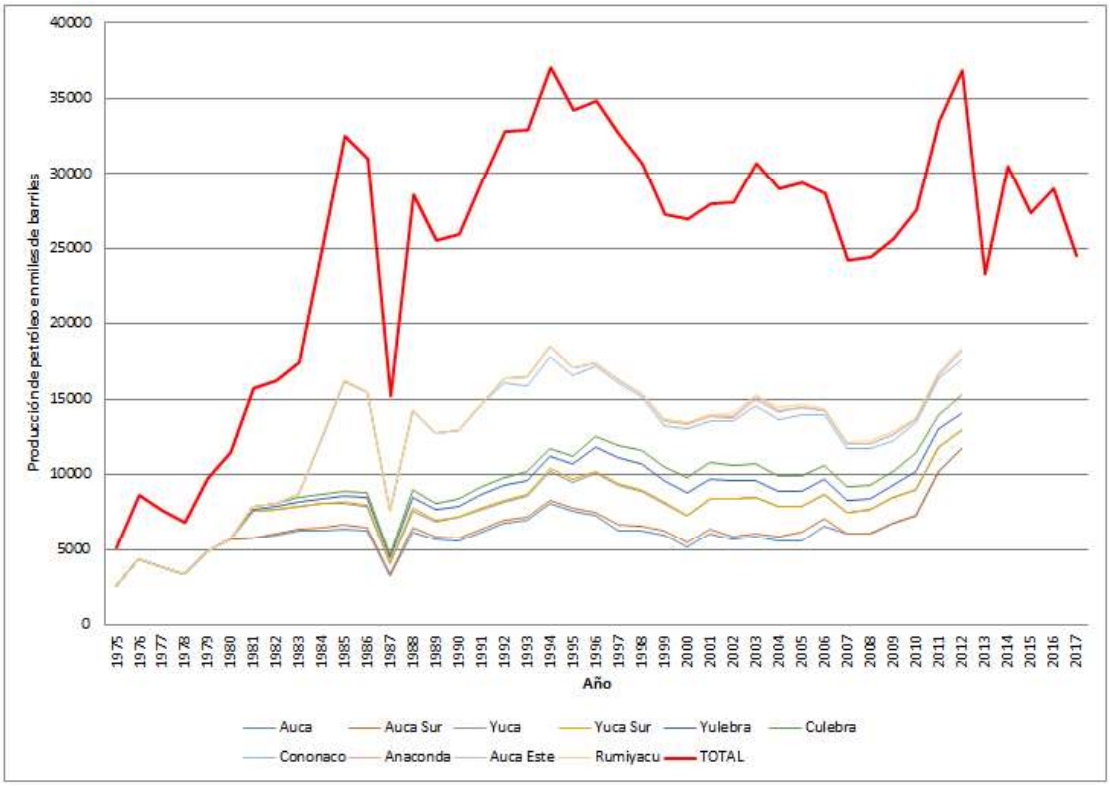
Fue posible determinar, que el error de omisión más importante (11,1%) proviene de píxeles que realmente pertenecían a la clase Bosque; sin embargo, fueron representados como No Bosque y como Suelo. En segundo lugar, con un error de omisión menor (8,3%) dos píxeles de la muestra que realmente eran zonas sin bosque, fueron representados en la clase Bosque.

Estos errores se han cometido por limitaciones propias de la metodología, al analizar durante largos períodos de tiempo; es decir, años. Las circunstancias *in situ* de la cobertura del suelo en el área de estudio, fácilmente puede cambiar a ritmos temporales mucho más cortos, como por ejemplo el caso de una plantación de cultivos de ciclo corto, o tala selectiva maderera a escalas industriales, ambos procesos presentes y ampliamente difundidos en la amazonía ecuatoriana. Por otra parte. Dichos errores al tratarse de una extensa árpea de estudio no afectan considerablemente las conclusiones extraíbles de los mapas clasificados respecto a la cuantificación de la deforestación y por ende a las conclusiones generales del presente estudio.

4.3. GANANCIAS PETROLERAS HISTÓRICAS

En el (Anexo 2) se resume la producción en miles de barriles de petróleo a nivel de campo petrolero de acuerdo al Banco Central del Ecuador (2017) para el período 1972-2012 y de acuerdo a la Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero (2017) para el período 2013-2017 (Fig. 35). Este período temporal fue finalmente ajustado con la disponibilidad de la información geográfica.

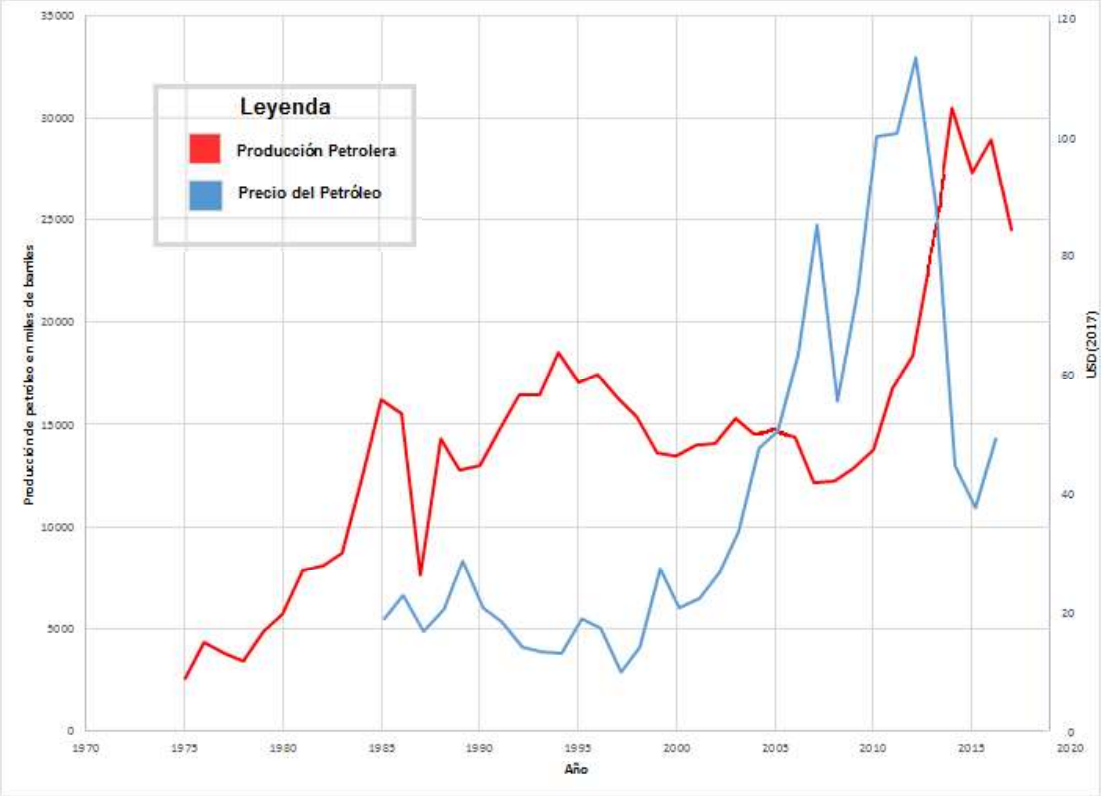
FIGURA 35: PRODUCCIÓN HISTÓRICA EN EL BLOQUE 61 EN MILES DE BARRILES DE PETRÓLEO



Elaboración: Jordan Andres Cruz

En la Fig. 36, se muestra en rojo la producción petrolera del bloque 61 antes mencionada, conjuntamente se muestra en azul el precio promedio anual del crudo Oriente, recalculados en dólares americanos (USD) del año 2017. Con lo cual es posible reconocer que las recesiones económicas recientes en el Ecuador, coinciden con los precios bajos del petróleo, dos de las más importantes fueron la crisis de 1999, en la cual un año antes en 1998 el crudo Oriente se cotizó en $8,88, el precio más bajo en toda la era petrolera ecuatoriana y la recesión del 2016, en la que el crudo oriente pasó de costar $112,11 en el año 2013 a $36,47 en el año 2016, lo cual representó una reducción de ingresos petroleros de aproximadamente el 67%. Así mismo, es posible notar que las mayores bonanzas económicas coinciden con los precios altos del crudo Oriente (Acosta, Maldición de los Recursos Naturales, 2006)

FIGURA 36: PRECIO HISTÓRICO DEL CRUDO ORIENTE



Elaboración: Jordan Andres Cruz

Finalmente, al analizar la producción petrolera conjuntamente con el precio internacional del crudo oriente y al comparar ambas variables con el presupuesto general del Estado Ecuatoriano (Tabla 17), con fines ilustrativos es posible inferir, que los Ingresos Estatales provenientes de la venta del crudo del Bloque 61, representaron en promedio el 5,73% del presupuesto general del Estado a partir de la dolarización.

Todos estos datos obtenidos técnicamente posibilitan evidenciar la importancia y dependencia de las actividades petroleras, en este caso solo un bloque petrolero históricamente ha aportado en gran medida la inyección de capitales a la economía nacional (Mateo y García , 2014).

TABLA 17: APORTE DE LOS INGRESOS PETROLEROS DEL BLOQUE 61 AL PRESUPUESTO GENERAL DEL ESTADO

Año	Producción de petróleo [Miles de barriles]	Precio Internacional Crudo Oriente [USD]	Ingresos [Millones de dólares]	Presupuesto General del Estado [Millones USD]	% de aporte al PGE
2001	13.987	19,65	274,84	5.489	5,01
2002	14.039	21,20	297,63	5.506	5,41
2003	15.325	25,64	392,93	6.188	6,35
2004	14.462	32,45	469,29	7.454	6,30
2005	14.670	46,52	682,45	7.915	8,62
2006	14.354	49,50	710,52	10.359	6,86
2007	12.121	62,27	754,77	11.225	6,72
2008	12.218	83,96	1.025,82	17.237	5,95
2009	12.825	54,34	696,91	20.646	3,38
2010	13.796	72,97	1.006,69	23.523	4,28
2011	16.775	98,88	1.658,71	26.551	6,25
2012	18.406	99,49	1.831,21	30.025	6,10
2013	23.350	112,11	2.617,77	32.366	8,09
2014	30.504	86,83	2.648,66	33.608	7,88
2015	27.342	43,52	1.189,92	34.897	3,41
2016	28.962	36,47	1.056,24	29.835	3,54
2017	24.532	48,05	1.178,76	36.818	3,20
			Promedio		**5,73**

Fuente: BCE, 2017

4.4. CAMBIO DE COBERTURA TERRESTRE

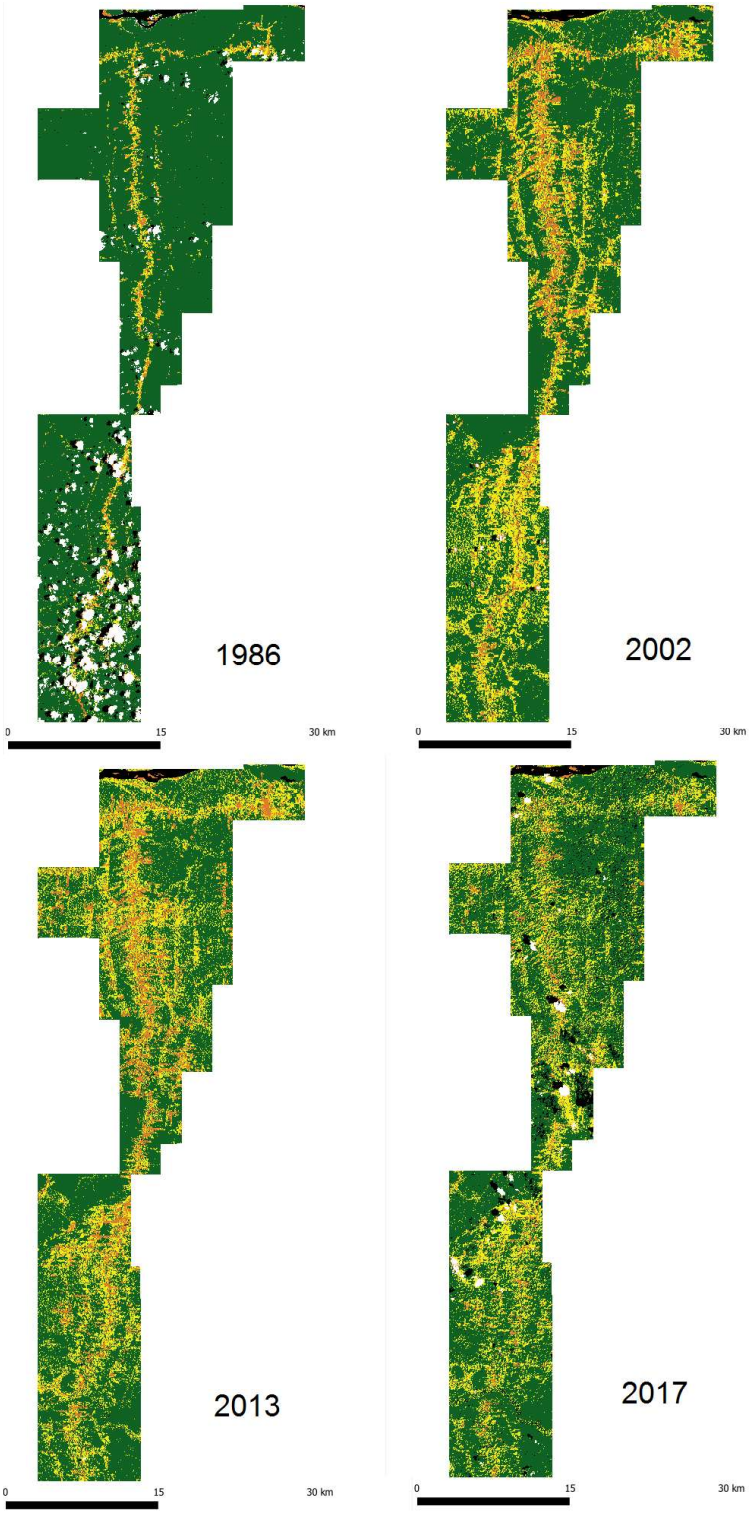
Es posible concluir que el área amarilla en la (Fig. 37) se refiere procesos donde la masa boscosa ha sido reemplazada por cultivos de ciclo corto o pastizales, denominada en el presente estudio como “No Bosque”, mientras que el área naranja representa infraestructura de hormigón o suelo desnudo denominada en el presente estudio como la clase “Suelo”. A partir de ello, se puede inferir que el área amarilla se refiere a deforestación originada por actividades agropecuarias y ganaderas, mientras que el área naranja es deforestación originada por operaciones petroleras. Es necesario aclarar que estas relaciones pueden alterarse muy rápido en cortos períodos de tiempo; es decir las causas de la deforestación gozan de una alta incertidumbre. Debido a que mediante la

clasificación de imágenes satelitales multiespectrales fue posible determinar las áreas deforestadas con una precisión del 90,8%; sin embargo, para determinar las causas de esta misma deforestación con una precisión similar o superior sería necesario un estudio mucho más extenso, con levantamiento de información in situ.

Entre los años 1986 y 2017 la cobertura de uso de suelo en el área de estudio fue transformada drásticamente. Además, debido a los patrones de avance de la deforestación, en el presente caso reconocido como patrón espina de pescado, se evidencia el enunciado de que los procesos de deforestación son catalizados por la presencia de carreteras (Armenteras y Rodríguez, 2014). Ya que las carreteras finalmente facilitan la extracción de la madera talada, o la comercialización de productos agrícolas, promoviendo de esta forma el asentamiento de colonos, los cuales transforman los bosques en pastizales o zonas agrícolas (Wasserstrom y Southgate, 2013). El cambio más importante se da entre los años 1986 y 2002 con una acelerada deforestación, este proceso también se da entre los años 2002 y 2013 pero a una tasa mucho menor. Finalmente se da un proceso inverso; es decir, aumenta la masa boscosa entre los años 2013 y 2017. A pesar de que, la masa boscosa aumenta de ninguna manera alcanza las condiciones iniciales del período de estudio.

Es importante destacar, que el bosque mostrado en estos mapas, solo representa masas boscosas de dosel superior; por lo cual, procesos que no son generalizados en el área de estudio como la siembra y cultivo de plantaciones de ciclo largo, al alcanzar la madurez estas plantas pudieron ser confundidas con bosques nativos, sin que estos reproduzcan de igual manera los servicios ecosistémicos evaluados en el presente estudio. También debido a la resolución de las imágenes satelitales Landsat de 30 m x 30 m, procesos de menor escala como la tala selectiva al interior de la selva, no fueron detectados.

FIGURA 37: CAMBIOS DEL USO DE SUELO EN EL BLOQUE 61



Elaboración: Jordan Andres Cruz

4.5. ÁREAS DEFORESTADAS

A continuación, se muestra la cuantificación de las áreas obtenidas de los mapas clasificados. A pesar de que fueron seleccionadas las imágenes que presentan menor nubosidad, en todas las imágenes existe un porcentaje de datos perdidos, este se refiere a los píxeles cubiertos por nubes o por sombras provocadas por las mismas nubes, también en esta categoría se han agrupado a los cuerpos de agua como el río Napo que intercepta el área de estudio, los cuerpos de agua debido a la cercanía de la firma espectral se los ha agrupado junto a las sombras. Este porcentaje de datos perdidos es mayor en la imagen correspondiente a 1986; sin embargo, esta imagen fue utilizada debido a que por su antigüedad proporciona valiosa información. Con fines ilustrativos y para ejercer una comparación con mayor objetividad, fue asumida una distribución perfectamente homogénea al interior de cada clase; por ejemplo, un píxel bosque es igual a cualquier otro píxel bosque. Esta limitación es propia de la herramienta, a pesar de ello para establecer comparaciones cuantificables esta asunción es válida. Para ello, fue calculado el porcentaje de área útil (Tabla 18).

El Bloque 61 o Activo Auca es un campo petrolero maduro que se ha explotado industrialmente por más de 45 años. Es de gran importancia notar que este campo ha alcanzado un nivel de estabilidad, ya que las afectaciones ambientales más graves de la industria petrolera se dan una vez finalizada la exploración petrolera, cuando se descubre un nuevo yacimiento petrolero, y es necesario construir campamentos y plataformas petroleras. En el caso de este campo operado desde 1972 ha alcanzado su estabilidad posterior al año 2002; es decir, posterior a esta fecha la tasa de deforestación se ha reducido drásticamente y a pesar de ello la producción ha continuado su marcha. Esto se explica fácilmente debido a que es innecesario construir nuevas plataformas si bajo determinadas condiciones de presión del yacimiento, es posible seguir produciendo desde las ya construidas o incluso realizar nuevas perforaciones diagonales desde las plataformas existentes.

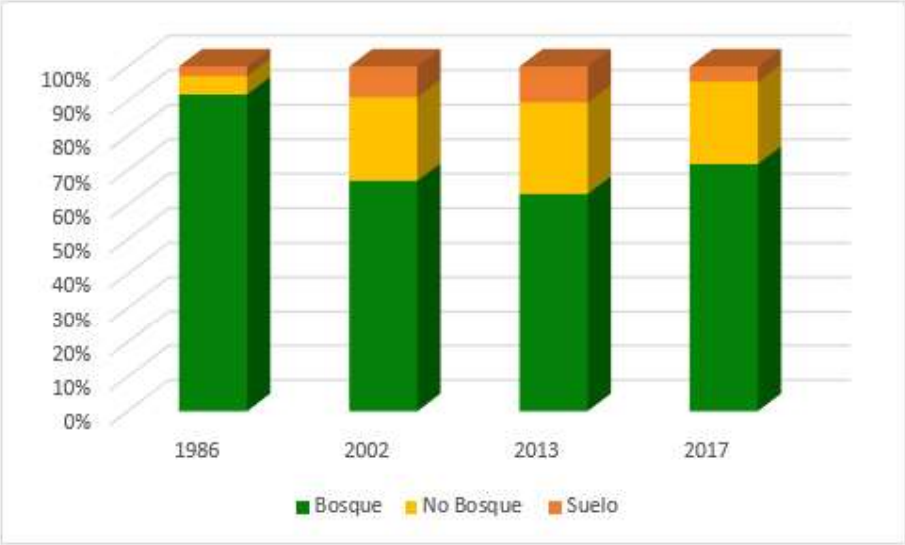
TABLA 18: CUANTIFICACIÓN ÁREAS DEFORESTADAS

	Clase	% Datos Perdidos	Área Absoluta [km²]	% Área Útil
1986	Bosque	10,71	642,08	91,83
	No Bosque		37,01	5,29
	Suelo		20,12	2,88
2002	Clase	% Datos Perdidos	Área Absoluta [km²]	% Área Útil
	Bosque	1,28	516,9	66,88
	No Bosque		186,79	24,17
	Suelo		69,23	8,96
2013	Clase	% Datos Perdidos	Área Absoluta [km²]	% Área Útil
	Bosque	1,11	488,27	63,06
	No Bosque		205,31	26,51
	Suelo		80,76	10,43
2017	Clase	% Datos Perdidos	Área Absoluta [km²]	% Área Útil
	Bosque	6,78	523,72	71,75
	No Bosque		173,72	23,80
	Suelo		32,45	4,45

Elaboración: Jordan Andres Cruz

La explotación petrolera a escala industrial en el área de estudio comenzó en el año de 1975. Lamentablemente no fue posible obtener información de buena calidad que permita identificar las condiciones previas a la explotación petrolera; sin embargo, los datos obtenidos del año de 1986 representan un gran punto de partida, ya que un año antes en 1985 fue finalizada la construcción de la carretera Sacha-Cononaco, y es está área básicamente la que se ha evidenciado como zona deforestada para 1986, evidencia de ello (Fig. 38) es que la zona boscosa cubre aproximadamente el 92% de la zona de estudio. A partir de allí la zona boscosa se reduce para el año 2002 a un 68% y para el año 2013, en el caso más grave se reduce hasta aproximadamente un 63%, existe una ligera pero muy importante recuperación para el año 2017 con aproximadamente un 71% del área cubierta por bosque.

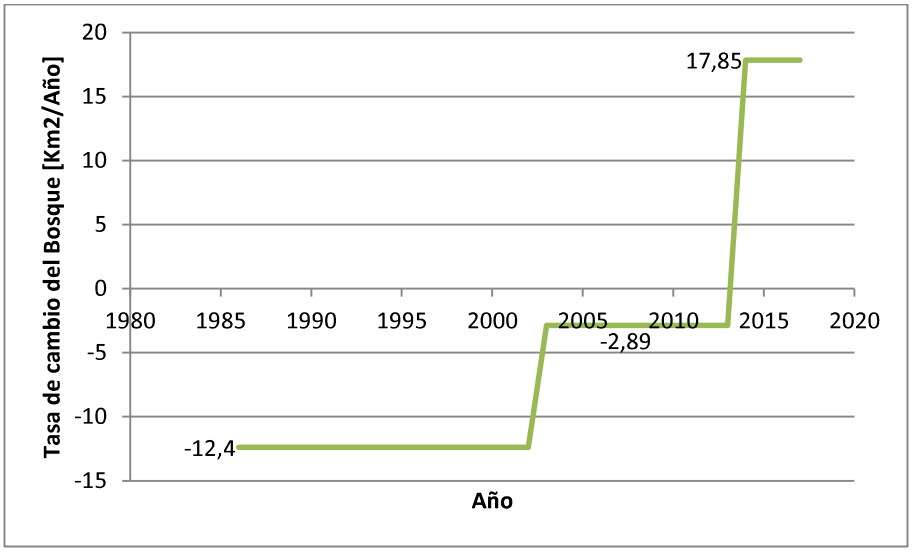
FIGURA 38: VARIACIONES PORCENTUALES DEL ÁREA ÚTIL



Elaboración: Jordan Andres Cruz

Una vez establecida el área de estudio en 793,44 km², y obteniendo en el presente estudio las pérdidas en área de la masa boscosa y los períodos temporales en los que dichos cambios se han detectado, es posible calcular las tasas de cambio de ese mismo bosque (Fig. 39). Por tanto, se ha establecido como una tasa negativa aquella en la cual se ha perdido bosque y como una positiva en la que se dan procesos de reforestación. Es posible concluir que a partir del año 2013 la recuperación de la masa boscosa avanza a una rapidez de 17,85 km²/año superior al período más grave de deforestación entre 1986 y 2002 en el cual, se perdían 12,4 km²/año.

FIGURA 39: TASAS DE CAMBIO DEL BOSQUE EN EL BLOQUE 61



Elaboración: Jordan Andres Cruz

La pérdida de estas grandes masas boscosas representa un ecocidio, debido a la pérdida de los servicios ecositémicos, como el equilibrio del ciclo hidrológico o el clima que afectan directamente a los pobladores del área de estudio, ya que comprometen sus formas de sustento; y afectan, indirectamente a los demás ciudadanos del mundo ya que estos sistemas naturales son imprescindibles para la supervivencia humana (PNUMA et al., 2009). Además de acuerdo a lo mencionado anteriormente *(Véase 2.1.4)* al ser considerada el área de estudio como un ecosistema megadiverso, los afecciones directas a las especies muchas de ellas estrictamente protegidas por la IUCN, organismo internacional encargado de categorizar a las especies de acuerdo a su estado de conservación o peligro de extinción, son muy graves e irreparables en la mayoría de los casos, o en su defecto necesitan de grandes esfuerzos y muy largos períodos temporales para su recuperación (Finner et al., 2008). Finalmente es importante destacar, que los efectos sobre la biodiversidad no se limitan a las zonas deforestadas, debido al efecto borde, los bosques colindantes con las zonas deforestadas también sufren un grave impacto en su biodiversidad, y debido a la naturaleza de la actividad que deforesta muchas pequeñas áreas y distribuidas a lo largo del área de estudio también se dan afectaciones a la biodiversidad como la ruptura de corredores ecológicos. Ambas consecuencias indirectas, el efecto borde y la ruptura de

corredores ecológicos, a pesar de que no son cuantificados dentro de las áreas deforestadas, sus consecuencias son muy importantes a la hora de determinar el impacto final sobre la biodiversidad.

4.6. CONSERVACIÓN FRENTE AL DESARROLLO DE LA INDUSTRIA PETROLERA

Una vez establecido el objetivo de elevar el bienestar de todos los ciudadanos sin que esto excluya el ganar dinero como uno de los criterios a analizar. El fin de este análisis es, partiendo del estudio de los cambios en la cobertura de suelo llevado a cabo hasta el momento, establecer un punto de equilibrio, entre el desarrollo industrial y la conservación de los bosques. Este punto de equilibrio será aquel que permita maximizar el aporte de cada uno de los criterios de selección.

Los resultados de la evaluación de los 4 escenarios se resumen en la (Tabla 19). El primero se refiere a un hipotético escenario en el cual en el bloque 61 se favorece a toda acción encaminada a la industria. A consecuencia de ello, genera una gran cantidad de ingresos estatales y privados, implica considerables inversiones por parte del estado y por parte de la empresa privada, genera fuentes de empleo; sin embargo, al ser industria primaria mayoritariamente, no genera una gran empleabilidad. Tiene una alta liquidez, ya que la extracción y venta de crudo requiere un período de tiempo relativamente corto en comparación a otras actividades. Bajo este escenario poco porcentaje de los ecuatorianos se verían directamente beneficiados. Serían afectados todos los servicios ecosistémicos provistos por el bioma amazónico, y los riesgos de sufrir las consecuencias del cambio climático, sufrir incidentes ambientales y la ocurrencia de incidentes socio-culturales se incrementarían de manera catastrófica.

El siguiente escenario hipotético analizado fue el opuesto al anteriormente descrito; es decir aquel en el que gran parte del bosque se ha recuperado y ha sido gestionado desde un punto de vista conservacionista. En este caso, las ganancias estatales y privadas son mínimas, ya que la única fuente de ingresos

significativa sería el turismo, y a pesar de ello implica grandes inversiones para proveer servicios públicos y para el control que limite la tala y cacería ilegal. Provee poca empleabilidad y además tiene una baja liquidez, debido a que la generación de ingresos por turismo es mucho más lenta y los proyectos deben ser estructurados a mediano y largo plazo. Sin embargo, la mayoría de los ecuatorianos participaríamos de los beneficios ambientales de la conservación. Ya que los servicios ecosistémicos se conservarían, al igual que la biodiversidad podría desarrollarse sin mayores problemas. El riesgo asociado al cambio climático e incidentes ambientales sería mínimo; sin embargo, los incidentes socio-culturales seguirían ocurriendo, pero en menor medida debido al ingreso de turistas nacionales y extranjeros.

Posteriormente fue analizado lo encontrado en el análisis del cambio de cobertura terrestre, donde aproximadamente el 72% de la superficie continúa siendo bosque no protegido y aproximadamente el 28% de la superficie se encuentra ocupada por las industrias, denominando a este tercer escenario como real. Aquí en función de la información económica recabada *(Véase 4.2)* se ha ponderado los ingresos e inversiones estatales y privados. Los servicios ecosistémicos referentes al ciclo hidrológico y gases de efecto invernadero se han conservado aceptablemente, siendo la biodiversidad la más afectada, debido a la deforestación difusa (*Véase 4.3*).

Finalmente, fue propuesto un escenario bajo la experiencia de las evaluaciones previas, identificando los criterios de selección sensibles a una u otra medida, proponiendo un balance equilibrado de aproximadamente un 82% de la superficie como bosque conservado y un área de aproximadamente 18% destinada a las actividades industriales, bajo este escenario perderíamos en poca medida ingresos; y a la vez, logramos proteger los servicios ecosistémicos. Todo ello bajo un estricto control y altos estándares del cuidado al medio ambiente. De continuar la tasa de reforestación expuesta anteriormente *(Véase 4.4)* el escenario recomendado en el presente estudio se podría alcanzar en aproximadamente 5 años. Teniendo en cuenta que esto no garantiza necesariamente que las condiciones de aquella masa forestal recuperada tenga las mismas capacidades

para proveer servicios ecosistémicos que el bosque primario, deforestado en la década de los 70.

Además, es importante destacar que las ponderaciones y características anteriormente expuestas, han sido enmarcadas exclusivamente para el bloque 61, debido a la heterogeneidad de todo el territorio amazónico ecuatoriano, aunque podrían servir como guía, difícilmente podrían ser tomadas estas recomendaciones como válidas para otros bloques petroleros.

TABLA 19: MATRIZ COSTO-BENEFICIO SOCIAL

			Criterios de selección													Ponderación Final*
			Ingresos Estatales	Ingresos Privados	Inversión Estatal	Inversión Privada	Liquidez	Empleabilidad	Porcentaje de la sociedad que goza de los beneficios	Regulación ciclo hidrológico	Fijación de Gases de Efecto Invernadero	Valoración de existencia de la biodiversidad	Riesgo asociado a la vulnerabilidad frente al cambio climático	Riesgo asociado a incidentes ambientales	Incidentes Socio-culturales	
Escenarios de referencia	Ideal Industrial	> 90% de la superficie es destinada a la industria petrolera, agrícola, ganadera, etc. Incluido las facilidades necesarias para su operación, como centros urbanos, campamentos, carreteras, etc. < 10% de la superficie destinada a conservación ambiental	0,90	0,50	-0,45	-0,30	0,90	0,60	0,10	0,10	0,10	0,05	-0,70	-0,80	-0,80	**0,20**
	Real	≈ 28% de la superficie se encuentra ocupada principalmente por la industria agrícola y ganadera. ≈ 72% de la superficie se ha conservado como bosque sin que sea posible asegurar un gran estado de conservación.	0,65	0,30	-0,30	-0,25	0,70	0,45	0,10	0,60	0,60	0,30	-0,50	-0,70	-0,70	**1,25**
	Recomendado	≈ 18% de la superficie se encuentra ocupada principalmente por la industria agrícola y ganadera. ≈ 82% de la superficie se ha conservado como bosque sin que sea posible asegurar un gran estado de conservación.	0,50	0,25	-0,30	-0,20	0,60	0,40	0,25	0,70	0,70	0,40	-0,50	-0,50	-0,50	**1,80**
	Ideal Conservacionista	< 10% de la superficie se destina a centros urbanos y pequeñas industrias. > 90% de la superficie se destina como área protegida, bajo estrictas condiciones de conservación.	0,15	0,10	-0,30	-0,20	0,20	0,15	0,70	1,00	0,80	0,90	-0,10	-0,05	-0,25	**3,10**

* La ponderación final, tiene como nota máxima 8,00 en un escenario perfectamente ideal y un valor mínimo de -5,00 para el caso ideal negativo.

Elaboración: Jordan Andres Cruz

Los resultados de la ponderación (Fig. 40), permiten apreciar la importancia del bosque tropical. Debido a que, bajo el escenario ideal conservacionista el bienestar social provisto por el bloque 61 tiene un valor de 3,10; el mismo que se reduce a 1,25 en el escenario real. Esto significa que tras 31 años de explotación petrolera en el bloque 61 los beneficios obtenidos son ampliamente superados por los costos asumidos, se entiende por costos la crítica reducción especialmente en criterios como: regulación del ciclo hidrológico, fijación de gases de efecto invernadero y la existencia de biodiversidad. Sin embargo, el escenario ideal industrial nos muestra que en caso de haber deforestado aproximadamente el 90% de la cobertura forestal, el valor de la ponderación hubiera descendido hasta 0,20.

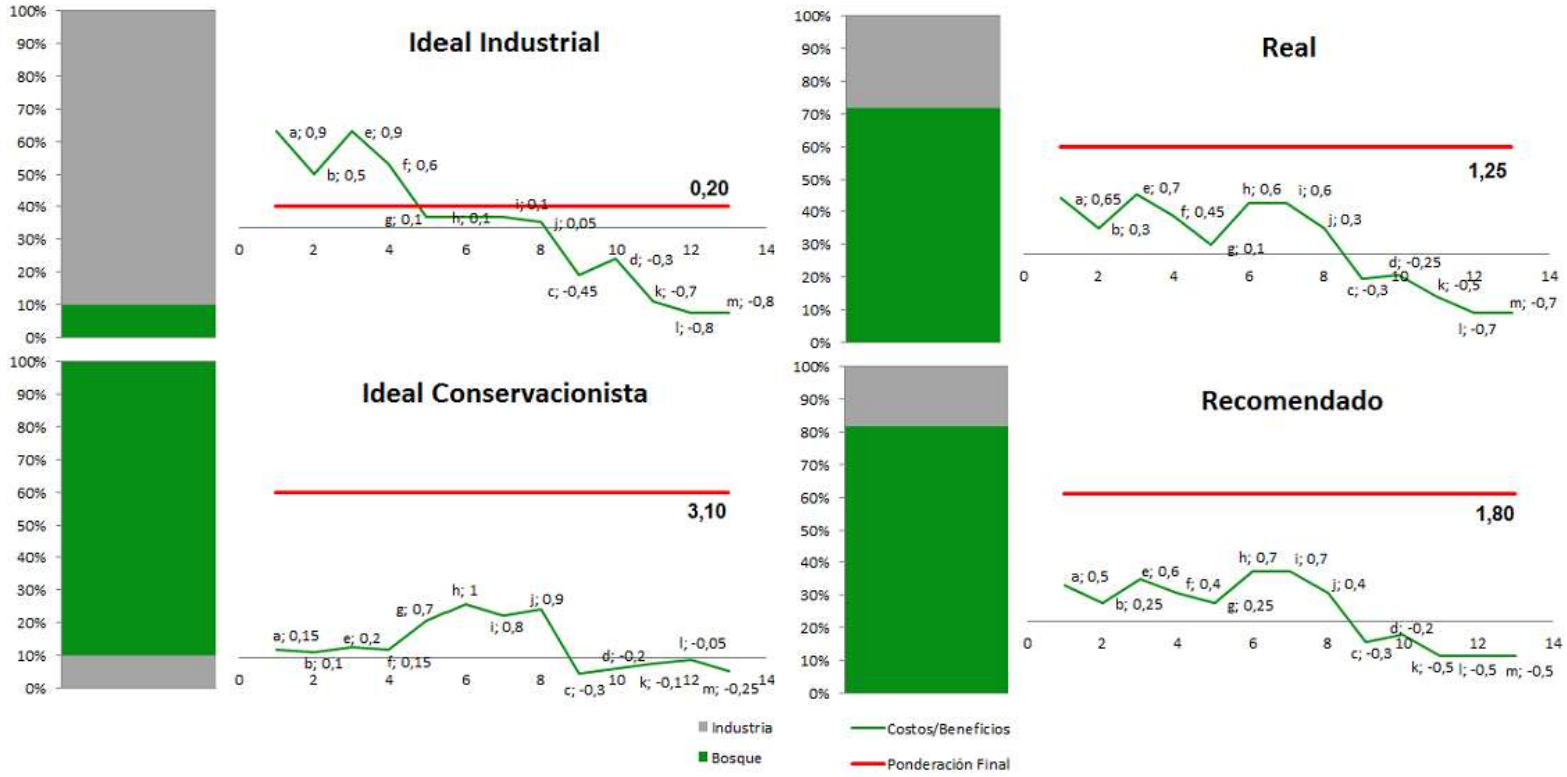
Este análisis, sugiere ideas claras respecto a las decisiones a tomar respecto a la gran disputa entre industrialización y conservación; o en su defecto, e idealmente las variables de mayor sensibilidad que hay que tener en cuenta a la hora de establecer una productiva coexistencia de ambas posiciones que procure el desarrollo integral y sustentable. Estas ideas son recopiladas en el escenario recomendado, el cual a pesar de sacrificar una parte de los ingresos y necesitar mayores inversiones, logra recuperar determinados servicios ecosistémicos, con el aumento de la cobertura forestal hallada en el 2017 de 72% hasta un hipotético 82%.

Este análisis es simplemente introductorio, es imperante establecer mecanismos similares a este pero mucho más profundos que estudien la problemática de manera integral como este estudio lo ha intentado, y a un mayor nivel de desagregación, que implica criterios de selección específicos en función de cada localidad. Estos procesos permitirán establecer un accionar planificado y que no esté sujeto a la voluntad política de los gobernantes de turno. Por todo lo antes mencionado, la comunidad científica local e internacional no puede sostener una actitud de absoluta negación a la extracción y aprovechamiento de los recursos naturales del Ecuador, ni tampoco infravalorar la naturaleza, de la cual

dependemos absolutamente, y sobre cual las generaciones que están por venir no han decidido su gestión; y a pesar de ello, sufrirán las consecuencias.

La comunidad científica debe enfocar todos sus esfuerzos técnicos en intentar generar un encadenamiento productivo que genere valor agregado al aprovechamiento de estos recursos, que los procesos sean cada vez menos invasivos y más eficientes con el ambiente, perfeccionar materiales que permitan sustituir al petróleo, elaborar políticas públicas que permitan internalizar integralmente los daños al medio ambiente, remediando los ecosistemas lo máximo posible, involucrarse activamente en los procesos de toma de decisiones, y finalmente, divulgar y educar acerca de la gravedad de la situación ambiental y como cada uno de nosotros puede aportar.

FIGURA 40: ESCENARIOS Y PONDERACIONES FINALES



Elaboración: Jordan Andres Cruz

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- El constante monitoreo de la cobertura terrestre por parte de los sistemas satelitales permite identificar grandes cambios en el paisaje. Debido a su antigüedad, provee valiosa información acerca de los impactos de actividades petroleras que comenzaron décadas atrás.
- La cobertura del suelo en el bloque 61 ha sido modificada drásticamente en 31 años de monitoreo. Se ha determinado un 92% de masa boscosa para el año de 1986, la cual se reduce rápidamente para 2002 hasta un 67%, y con una reducción más lenta para el año 2006 la masa boscosa ocupó solo el 63% del bloque 61. Para el año 2017, zonas con similar firma espectral al bosque ascienden al 72% lo cual sugiere una reversión de los procesos de deforestación.
- La deforestación en el Bloque 61 es originada por dos actividades. El cambio de uso de suelo desde bosques a cultivos y pastizales, mediante el desbroce. La segunda, es la tala de bosques para la construcción de plataformas y vías de acceso. Debido a los patrones de deforestación es posible inferir que la construcción de carreteras facilita e impulsa la expansión de la frontera agrícola.
- Las actividades extractivas petroleras alcanzan un nivel de estabilidad. El bloque 61 tras 47 años de producción petrolera es considerado un campo maduro, por lo cual no es necesario continuar deforestando grandes cantidades de bosque para mantener la producción. Sin embargo, de ser estrictamente necesaria la exploración de nuevos campos petroleros, es imprescindible concentrar los esfuerzos justamente en la fase inicial de explotación, para minimizar las irremediables consecuencias evidenciadas en el presente estudio.
- Se ha logrado identificar indicios de recuperación en la masa forestal en el bloque 61, mediante detección remota. Este proceso puede explicarse

desde varias posiciones. La actual legislación ambiental y métodos de control son mucho más eficaces que los existentes hace 40 años, existe una mejor tecnología para la extracción de petróleo, el agotamiento de recursos en el bloque 61 hace innecesaria el desbroce para la construcción de nuevas plataformas, programas e incentivos para la conservación de bosques como el programa Socio Bosque.

- El monitoreo remoto de la cobertura terrestre solo identifica los efectos directos, por lo cual procesos como el efecto borde y la ruptura de corredores ecológicos son inapreciables a través de los mapas clasificados. De similar forma los procesos identificados como reforestación en el final del período del presente estudio no necesariamente implican una completa recuperación de todas las propiedades del bosque. Estas propiedades son las que garantizan la provisión de servicios, como la concentración de nutrientes en el suelo o la recirculación de agua y aire.
- La economía ecuatoriana, después de 40 años de explotación petrolera es altamente dependiente de la exportación de materias primas. Solo los ingresos por venta del petróleo extraído del bloque 61 se igualan en promedio al 5,73% del presupuesto general del estado.
- El balance final de la comparación entre: los beneficios principalmente económicos de la extracción de recursos petroleros, con los costos de la deforestación de la selva tropical; es negativo, 31 años de explotación petrolera representan una reducción de bienestar de 3,10 a 1,25. Medidos en un intervalo entre -5 y 8.
- Para maximizar el beneficio social en el bloque 61 es necesario incrementar la zona de bosque nativo desde el 72% hallado en el 2017 hasta un 82%, lo cual idealmente permitiría acercarnos a un escenario donde los beneficios obtenidos de la explotación petrolera sean los máximos, en vista de la dependencia de la economía nacional del petróleo en el corto y mediano plazo.

5.2. RECOMENDACIONES

- Instar a las instituciones públicas a facilitar el acceso a la información como se establece en la Ley Orgánica de Transparencia y Acceso a la Información Pública.
- Realizar una verificación en campo que permita comprobar que las clases obtenidas correspondan a la realidad, la cual proporcionaría una mejor validación de los resultados.
- El análisis costo-beneficio social es una herramienta aplicable en cualquier proceso de toma de decisiones y a muchas escalas. Es necesario recabar toda la información posible y considerar todas las variables incidentes sobre la problemática a analizar.
- Utilizar herramientas de tipo colaborativo como el software libre, las cuales recopilan el trabajo de grandes equipos científicos y generalmente sin costo.
- Ampliar el análisis costo-beneficio con una mayor cantidad de criterios de selección y desagregados a niveles locales. Para que permita evaluar la amazonia en su totalidad y apreciando las reales condiciones de alta heterogeneidad que se han dado en esta región.

REFERENCIAS

Achárd, F., Hugh, E., Hans, S., Mayaux, P., Gallego, J., Richards, T., et al. (2010). Determination of Deforestation Rates of the World´s Humid Tropical Forests . *Science, New Series, Vol. 297, No.5583*, 999-1002 pp.

Acosta, A. (1982). *EL Mito del Desarrollo.* Quito - Ecuador: El Conejo.

Asociación de la Industria Hidrocarburífera del Ecuador. (2013). *El Petróleo en Cifras.* Quito - Ecuador: 36 pp.

Albornoz, V. (2017, Septiembre 17). El diferencial del crudo. *EL COMERCIO*, p. En línea.

Araujo, A. (15 de Diciembre de 2015). Auca, una de las áreas más productivas. *El Comercio*, pág. Online.

Armenteras, D., y Villa, C. (2006). Deforestación y Fragmentación de Ecosistemas Rurales en el Escudo Guayanés Colombiano. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt e Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología "Francisco José Caldas". Bogotá, D.C. - Colombia: Colciencias.

Armenteras, D., y Rodríguez, N. (2014). Dinámicas y Causas de Deforestación en Bosques de Latinoamérica: una revisión desde 1990. Colombia Forestal. Bogotá, D.C. - Colombia: 17(2), 233-246.

Asamblea Constituyente. (2008). *Constitución de la República del Ecuador.* Montecristi: 181.

Asner, G. (2014). *Carnegie Forest Monitoring with CLASlite .* California: Universidad de Stanford.

Azqueta, D., Alviar, M., Dominguez, L., y O´ Ryan, R. (2007). *Introducción a la Economía Ambiental.* Madrid - España: Mc GRAW-HILL.

Baby, P., Rivadeneira, M., y Barragán , R. (2004). *La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo.* Quito: Travaux de l´Institut Francais d´Études Andines.

Balvanera, P. (2012). *Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales.* Asociación Española de Ecología Terrestre Madrid: Ecosistemas 21 (1-2), 136-147.

Banco Central del Ecuador. (2017). *Producto Interno Bruto.* Quito-Ecuador. 2 pp.: Banco Central del Ecuador.

Banco Central del Ecuador. (2018). *Estadísticas de Comercio Exterior.* Quito.

Barbier, E., Acreman, E., Knowler, D.(1997). *Valoración económica de Humedales,* Oficina de la Convención Ramsar. Gland-Suiza

Bravo, E. (2007). *Los impactos de la explotación petrolera en ecosistemas trópicales y la biodiversidad.* Quito: Acción Ecológica.

Burgos , J. y García, P. (2002). *El petróleo, Recorrido de la Energía.* Comunidad de Madrid. Madrid - España: Doménech S.A.

California Institute of Technology. (2018). *ASTER, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*. Retrieved from Jet propulsion Laboratory: https://asterweb.jpl.nasa.gov/

Canters, F. (2015). *Geographical Research Methods 1: Earth Observation.* Brussels - Belgium: Vrije Universiteit Brussel.

Carnegie. (2014). *User Guide CLASlite.* Stanford California - Estados Unidos: Stanford University. 41, pp.

Cayuela, L. (2006). Deforestación y Fragmentación de bosques tropicales montanos en los Altos de Chiapas, México. Efectos sobre la diversidad de árboles. *Ecosistemas, REDALYC*, 191-196.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe; Patrimonio Natural;. (2013). *Amazonía: Posible y Sostenible.* Bogotá, D.C. - Colombia : 11-28 pp.

Congedo, L. (2018). *Semi-Automatic Calssification Plugin Documentation* . Roma: Sapienza University of Rome, pp:133.

Chavez, P. S. (1988). An Improved Dark-Object Substraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 24: 459-479.

Chuvieco, E. (2008). *TELEDETECCIÓN AMBIENTAL: La Observación de la Tierra Desde el Espacio.* Barcelona - España: Ariel S.A.

Diamond, J. (2007). *Colapso.* Bogotá D.C. - Colombia: Random House Mondadori.

Eastman, R. (2012). *IDRISI Selva, Guía para SIG y procesamiento de Imágenes.* Masachusetts, Estados Unidos.: Clark University, 164-170 pp.

Ellis, J. M. (2000). Cambios en el Uso del Suelo Evaluados por Medio de Sensores Remotos. *Ellis GeoSpatial*, 1-27.

ENVIROTEC. (2014). *Estudio de Impacto Ambiental Expost del Bloque 61.* Quito-Ecuador.

European Space Agency. (2018, Julio 26). *Copernicus*. Retrieved from Observing the Earth: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview4 Finner, M., Jenkins, C. N., Pimm, S. L., Keane, B., y Ross, C. (2008). *Oil and Gas Projects in the Western Amazon: Threats to Wilderness, Biodiversity, and Indigenous Peoples. PLoS ONE 3(8): e2932. doi:10.1371/journal.pone.0002932.*

Finner, M., Jenkins, C. N., Pimm, S. L., Keane, B., y Ross, C. (2008). *Oil and Gas Projects in the Western Amazon: Threats to Wilderness, Biodiversity, and Indigenous Peoples.* PLoS ONE 3(8): e2932. doi:10.1371/journal.pone.0002932.

Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Orellana. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Provincia de Orellana 2015-2025.* Francisco de Orellana.

Gómez, J. y Roa, T. (1999). *Oilwatch Curso Técnico de la Industrias Petrolera.* Censat Agua Viva. Santa Fé de Bogotá-Colombia: 39 pp.

Gráffica. (2018, 08 08). *Gráffica*. Retrieved from TIFF o JPEG: https://graffica.info/tiff-jpeg-gif-png-formatos-archivos/

Guédez, C., Armas, D., Reyes, R., y Galván, L. (2003). Los Sistemas de Gestión Ambiental en la Industria Petrolera Internacional. *Interciencia Vol. 28*, 528-536.

Hansen , M. C., y Loveland, T. R. (2012). A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data. *Remote Sensing Of Environment Vol. 122*, 66-74, ELSEVIER.

Helmut, G., y Lambin, E. (2002). Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation. *BioScience, Vol: 52*, 143-150 pp.

Hernández, W. J., y Gilbes, F. (2014). *Disponibilidad de datos de Landsat 8 y su procesamiento en ArcGis.* Mayagüez, Puerto Rico: University of Puerto Rico Mayagüez.

Instituto Argentino de Petróleo y Gas. (2000). *Aspectos Ambientales de la Prospección Sísmica.* Buenos Aires, Argentina: 45 pp.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2013). *Descripción y Corrección de productos Landsat 8 .* Bogotá, Colombia: Centro de Investigación y Desarrollo .

Knight, J., y Lunneta, R. (2003). An Experimental Assesment of Minimum Mapping Unit Size. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol 41, No. 9: 2132-2134 .

Larrea, C. (2006). Petróleo y Estrategias de desarrollo en el Ecuador: 1972-2005. In e. G. Fontaine, *Petróleo y Desarrollo Sostenible en Ecuador 3, Las ganacias y pérdidas* (pp. 57-68). Quito: Serie Foro FLACSO.

LEICA Geosystems Geospatial Imaging. (2005). *ERDAS Field Guide.* Georgia, Estados Unidos.: LLC. 162-172, pp.

Llorente, J., y Sacona, U. (2012). *Investigación Aplicada a la Educación Intercultural Bilingüe.* Instituo de Ciencias del Comportamiento. Universidad de Helsinki, Helsinki-Finlandia

Lomas, P., Martín , B., Louit, C., Montoya, D., y Montes, C. (2005). *Guía Práctica para la Valoración Económica de los Bienes y Servicios Ambientales de los Ecosistemas.* Madrid, España: Ulzama Digital.

Loomis, J. (2010). *Importance of Incorporating Distributional Issues in Benefit Cost Analysis.* Colorado State University. Colorado, Estados Unidos: 29 pp.

López, V., Espíndola, F., Calles, J., y Ulloa, J. (2013). *Amazonía Ecuatoriana Bajo Presión.* Quito-Ecuador: Ecociencia.

Mateo, J., y García , S. (2014). El Sector Petrolero en el Ecuador 2000-2010. *Revista Problemas del Desarrollo*, 113-140.

Mena, C. (2010). Deforestación en la Amazonía Ecuatoriana: del patrón al proceso. *Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales, Revista Polemika*, 58-65.

Mendieta, J. (2000). *Economía del Medio Ambiente.* Programa de Magíster en Economía del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales. Facultad de Economía. Universidad de los Andes. Santa Fe de Bogotá, Colombia.

Ministerio del Ambiente de Ecuador. (2014). *EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS FORESTALES MUNDIALES 2015.* Roma, Italia: Food and Agriculture Organization.

Ministerio del Ambiente de Ecuador. (2013). Mapa Interactivo Ambiental. Quito-Ecuador.

Nucleomics. (2016). *Archive Files with extension .tar.gz.* Bruselas, Bélgica.: Nucleomics Core.

Ortega, B. (2012). *Análisis Coste-Beneficio.* eXtoikos 5 (2012): 147-149 pp. D61; H43.

Pavlov, I. (2018, Agosto 08). *7-ZIP*. Retrieved from License: https://www.7-zip.org/

Petroecuador EP. (2014). *Mapa Catastral.* Quito - Ecuador.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2016). *La Amazonía y la Agenda 2030.* Ciudad de Panamá - Panamá: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 43 pp.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Organización del Tratado de Cooperación Amazónica y Centro de Investigación Universidad del Pacífico;. (2009). *Perspectivas del Medio Ambiente en la Amazonía: GEOAMAZONÍA.* Ciudad de Panamá - Panamá: Programa Ortegde las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

QGIS Development Team. (2018). *QGis 2.18.*

Quijas, S., Schmid, B. y Balvanera, P. (2010). *Plant Diversity Enhances Provision of Ecosystem Services: A new synthesis.* Basic and Applied Ecology 11 (2010): 582–593 pp. doi:10.1016/j.baae.2010.06.009

Rivadeneira, M., y Baby, P. (1999). *La Cuenca Oriente: Estilo Tectónico, Etapas de Deformación y Características Geológicas de los Principales Campos de Petroproducción.* Quito: Petroproducción - IRD.

Rossiter, D. (2014). *Technical Note: Statistical Methods for Accuracy Assesment of Clasified Thematic Maps.* Enschede - Netherlands: University of Twente, Faculty of Geo-Information Science & earth.

San Sebastián , M., y Hurtig, A.-K. (2004). Oil exploitation in the Amazon basin of Ecuador: a public health emergency. *Current Topics*, 7 pp.

Schroeder, T., Cohen , W., Song, C., Canty, M., y Yang, Z. (2006). Radiometric Correction of Multi-Temporal Landsat Data for Characterization of Early Succesional Forests Patterns in Western Oregon. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 103: 16-26.

Secretaria Nacional de Planificación y Desarrollo. (2012). *Transformación de la Matriz Productiva, Revolución a través del conocimiento y el talento humano.* Quito: Ediecuatorial.

Servicio Nacional de Áreas Protegidas. (2013). *Deforestación y Regeneración de Bosques en Bolivia y sus Áreas Protegidas Nacionales para los Períodos 1990-2000 y 2000-2010. La Paz - Bolivia*: Museo de Historia Natural Noel Kempff Mercado y Conservación Internacional.36pp.

SIG Tierras. (2012). *Ortofotografía del Ecuador, el país desde otra perspectiva.* Quito-Ecuador: Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca del Ecuador, MAGAP.

Skole, D., y Tucker, C. (1993). Tropical Deforestation and Habitat Fragmentation in the Amazon: Sattelite Data from 1978 to 1988. *Science, Vol. 260*, 1905-1910.

Sobrino, J., Jiménez-Muñoz, J., y Paolini, L. (2004). Land Surface Temperature Retrieval from LANDSAT 5 TM . *Remote Sensing of Environment*, Vol. 90: 434-440.

Song, C., Woodcock, C., Seto, K., Lenney, M., y Macomber, S. (2001). Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 75: 230-244.

The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. (2009). *Principles of Remote Sensing.* Enschede, The Netherlands: University of Twente.

Thenkabail, P. S. (2009). *Satellite Sensor Data Normalization Issues.* Boston, Estados Unidos: USGS.

United States Geological Survey. (2016). *Landsat Earth Observation Satellites.* Sioux Falls - USA: Earth Resources Observation and Science Center .

United States Geological Survey. (2018, 07 27). *Landsat Processing Details*. Retrieved from USGS Landsat Missions: https://landsat.usgs.gov/landsat-processing-details

Wasserstrom, R., y Southgate, D. (2013). Deforestación, Reforma Agraria y Desarrollo Petrolero en Ecuador, 1964-1994. *Scientific Resources, Natural Resources*, 34-44.

Weber, M., y Abellán, J. (2017). La objetividad del conocimiento en la ciencia social y en la política social. *Alianza Editorial.* Madrid-España.

Wilson, D., y Schröder, B. (2007). Creating land cover maps using Landsat TM data. *Visualisation Technical*, 48-52 pp.

Wilson, J., y Jarrin, S. (2017, Septiembre 7). *¡Viva el Paro! Crónica de la Lucha en Dayuma*. Retrieved Mayo 24, 2018, from Centro de Derechos Económicos y Sociales: http://cdes.org.ec/web/viva-el-paro-cronica-de-la-lucha-en-dayuma/

Zanter, K. (2017). *Landsat Collection 1 Level 1 Product Definition.* Sioux Falls, South Dakota: USGS.

ANEXOS

ANEXO 1: PRODUCCIÓN DEL BLOQUE 61 EN MILES DE BARRILES, DESAGREGADA A NIVEL DE CAMPO PETROLERO Y AÑO

	Auca	Auca Sur	Yuca	Yuca Sur	Yulebra	Culebra	Cononaco	Anaconda	Auca Este	Rumiyacu	TOTAL
1975	2550										2550
1976	4342										4342
1977	3825										3825
1978	3401										3401
1979	4891										4891
1980	5687		36								5723
1981	5736	33	1846		126	125					7866
1982	5981	119	1580		226	203					8109
1983	6254	125	1556		283	313	175			24	8730
1984	6311	191	1580		273	361	3641			122	12479
1985	6422	218	1478	111	400	301	7266			40	16236
1986	6241	286	1390	105	533	251	6687				15493
1987	3227	165	717	25	352	153	2975				7614
1988	6173	273	1181	126	757	463	5327				14300
1989	5703	223	982	116	644	411	4672				12751
1990	5612	207	1329	91	681	461	4584				12965
1991	6133	291	1282	64	973	487	5446	36			14712
1992	6759	193	1290	59	999	544	6201	374			16419
1993	7019	200	1428	107	892	534	5735	546			16461
1994	8113	213	1932	171	851	497	6029	728			18534
1995	7620	185	1692	209	1005	489	5429	459			17088
1996	7341	125	2618	187	1566	754	4580	268			17439
1997	6290	351	2631	177	1645	890	4129	167			16280
1998	6310	291	2309	148	1625	935	3598	151			15367
1999	5981	257	1901	68	1423	903	2719	285	99		13636
2000	5216	256	1863		1483	1000	3186	328	137		13469
2001	6119	263	2017		1349	1041	2777	285	136		13987
2002	5677	250	2432		1294	999	2865	287	95	140	14039
2003	5862	182	2455		1145	1055	3874	415	150	187	15325
2004	5564	272	2063		1019	952	3762	538	123	169	14462
2005	5618	572	1755		996	934	4045	531	54	165	14670
2006	6560	524	1647		989	934	3344	244		112	14354
2007	6109		1380		860	846	2547	250		129	12121
2008	6115		1601		718	837	2473	339		135	12218
2009	6761		1792		785	842	2104	407		134	12825
2010	7272		1741		1223	1186	1997	238		139	13796
2011	10235		1636		1170	971	2401	227		135	16775
2012	11697		1235		1114	1279	2262	633		186	18406
2013	**Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero ARCH entrega información desagregada sólo a nivel de bloque petrolero y no a nivel de campo petrolero**										23350
2014											30504
2015											27342
2016											28962
2017											24532

Fuente: Banco Central del Ecuador y Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero

ANEXO 2: COORDENADAS DE LOS PÍXELES UTILIZADOS PARA EVALUAR LA PRECISIÓN DE LOS MAPAS OBTENIDOS CON ORTOFOTOGRAFÍAS

En cada píxel se muestra la clase a la cual pertenece: N = No Bosque, B = Bosque y S = Suelo; tanto en la ortofotografía como en el mapa clasificado.

Muestra Evaluación de la Precisión																	
No.	X	Y	Foto	Mapa	Código Mosaico Fotos	No.	X	Y	Foto	Mapa	Código Mosaico Fotos	No.	X	Y	Foto	Mapa	Código Mosaico Fotos
1	298807	9929255	N	N	PIII-C3	41	284519	9904783	N	B	PIII-C3	81	288097	9900809	B	S	PIII-C3
2	289766	9938159	S	S	PIII-E1	42	287006	9902728	B	B	PIII-C3	82	284383	9934559	S	S	PIII-E3
3	288958	9947063	B	B	PIII-E3	43	292353	9920717	N	N	PIII-C1	83	295140	9928609	B	B	PIII-C1
4	283933	9894458	B	B	PIII-C3	44	286784	9938415	N	N	PIII-E1	84	286149	9949483	S	S	PIII-C1
5	294020	9946243	B	B	PIII-E3	45	295098	9941927	B	B	PIII-C3	85	288327	9892443	N	N	PIII-E3
6	291920	9945986	N	N	PIII-C3	46	287890	9899489	N	N	PIII-E3	86	280939	9889726	B	N	PIII-C1
7	294849	9927648	B	B	PIII-E3	47	292382	9918995	S	S	PIII-C3	87	289289	9889129	N	N	PIV-A1
8	282966	9901964	B	B	PIV-A1	48	283480	9937855	B	N	PIII-C1	88	286629	9894138	B	B	PIV-A1
9	282973	9881664	B	B	PIII-E1	49	283435	9934587	N	N	PIII-C3	89	292306	9917419	S	S	PIII-E1
10	296590	9926236	N	N	PIII-C1	50	283310	9935606	B	B	PIV-A1	90	286295	9905495	B	B	PIII-C3
11	293987	9933039	N	N	PIII-E3	51	288007	9903409	B	B	PIII-E1	91	289482	9945453	B	B	PIII-C3
12	285946	9888799	N	N	PIII-C1	52	291788	9919810	B	B	PIV-A1	92	287899	9944111	B	N	PIII-C1
13	290207	9926846	B	B	PIII-C3	53	296179	9937278	N	N	PIII-E1	93	288062	9909806	B	B	PIII-E3
14	286251	9882284	S	S	PIII-E1	54	289999	9937778	S	S	PIV-A1	94	305699	9947716	B	B	PIV-A1
15	284016	9889769	B	B	PIV-A1	55	284634	9898544	B	B	PIII-E1	95	287480	9939498	B	B	PIV-A1
16	288112	9915284	B	B	PIII-C3	56	291368	9942472	B	B	PIII-E1	96	290216	9932943	N	N	PIII-E3
17	299045	9944613	B	B	PIII-E1	57	281882	9894602	B	B	PIII-C3	97	290338	9915017	S	S	PIII-E3
18	286980	9930645	B	B	PIII-C3	58	281533	9935572	B	N	PIII-E3	98	284231	9934199	N	N	PIII-E1
19	291111	9948091	S	S	PIII-C3	59	298267	9944835	B	B	PIII-C3	99	288189	9936761	B	B	PIV-A1
20	296175	9929341	B	B	PIII-C3	60	298332	9941048	B	B	PIII-C3	100	290423	9943525	N	N	PIII-E3
21	282634	9901638	B	B	PIII-E1	61	289309	9929373	N	N	PIII-E3	101	292801	9933881	B	B	PIII-C1
22	283701	9889686	B	B	PIII-E3	62	294730	9922058	B	B	PIII-C3	102	287097	9882237	B	B	PIII-E3
23	291299	9913698	B	B	PIII-C3	63	289187	9948680	B	B	PIII-E1	103	281086	9887246	B	B	PIII-E1
24	297016	9932817	B	B	PIII-C1	64	289765	9921975	B	B	PIII-E3	104	285537	9880557	N	N	PIII-C1
25	280003	9937242	B	B	PIII-C3	65	287260	9926532	S	S	PIII-E3	105	292694	9945540	B	B	PIII-E3
26	289581	9940310	B	B	PIV-A1	66	284784	9935695	B	B	PIII-E1	106	292654	9918133	B	B	PIII-C1
27	285032	9935407	B	B	PIII-C3	67	283063	9884917	B	B	PIII-C3	107	288080	9907027	B	B	PIII-C3
28	292870	9923209	B	B	PIII-C3	68	291916	9916188	B	B	PIV-A1	108	288865	9908802	N	N	PIII-C3
29	287079	9948359	S	S	PIII-C3	69	298410	9946442	B	B	PIII-C3	109	291238	9936215	S/D	S/D	PIII-E3
30	283025	9888196	B	B	PIII-E1	70	288059	9908311	B	B	PIII-C3	110	305236	9944911	B	B	PIV-A1
31	287432	9947044	B	B	PIV-A1	71	292696	9932302	B	B	PIII-C1	111	299869	9948668	B	B	PIII-C3
32	292750	9944092	B	B	PIII-E3	72	295505	9946224	B	B	PIII-C1	112	281677	9935918	B	B	PIII-E1
33	293132	9923867	N	N	PIII-C3	73	288533	9923703	B	S	PIII-E3	113	280405	9902003	N	N	PIII-C1
34	305012	9945606	B	N	PIV-A1	74	290824	9918705	S	S	PIII-C3	114	292296	9925639	B	B	PIII-C3
35	287155	9929913	B	B	PIII-E3	75	282869	9901090	B	B	PIII-E3	115	282497	9892475	B	N	PIII-E3
36	294251	9928787	B	B	PIII-C3	76	285547	9896403	B	B	PIII-C3	116	280556	9894566	B	B	PIV-A1
37	292003	9931653	B	B	PIV-A1	77	293052	9944526	N	N	PIII-C3	117	280271	9906453	S/D	S/D	PIII-C1
38	294661	9949073	S	S	PIII-E1	78	281275	9907863	N	B	PIII-C3	118	286392	9909468	B	B	PIII-C3
39	286126	9929541	B	B	PIII-C3	79	301425	9945075	N	N	PIII-E3	119	305354	9946567	B	N	PIV-A1
40	287212	9891998	B	B	PIII-C3	80	282663	9880159	B	B	PIV-A1	120	291496	9945848	B	B	PIII-E3

Elaboración: Jordan Andres Cruz