UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Escuela de Posgrado

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

MODELADO Y PREDICCIÓN ESPACIOTEMPORAL DE CAMBIOS DEL USO Y COBERTURA DE LA TIERRA EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA ILO-MOQUEGUA

TESIS

PRESENTADA POR:

M.Sc. OSMAR CUENTAS TOLEDO

Para optar el Grado Académico de:

DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES

TACNA – PERÚ

2025

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Escuela de Posgrado

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

MODELADO Y PREDICCIÓN ESPACIOTEMPORAL DE CAMBIOS DEL USO Y COBERTURA DE LA TIERRA EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA ILO-MOQUEGUA

Tesis sustentada y aprobada el 26 de febrero del 2025; estando el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE : .....
Dr. Nataniel Mario Linares Gutiérrez

SECRETARIO : .....
Dr. Martín Eloy Casilla García

MIEMBRO : .....
Dr. Alberto Bacilio Quispe Cohaila

ASESOR : .....
Dr. Alberto Bacilio Quispe Cohaila

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Dr. Alberto Bacilio Quispe Cohaila, en mi condición de asesor acreditado con Resolución de Escuela de Posgrado N° 13762-2024-ESPG/UNJBG del 01 de abril del 2024, del trabajo de tesis titulado: *"MODELADO Y PREDICCIÓN ESPACIOTEMPORAL DE CAMBIOS DEL USO Y COBERTURA DE LA TIERRA EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA ILO-MOQUEGUA"*, presentado por el Sr. Osmar Cuentas Toledo, para optar el Grado Académico de Doctor en Ciencias Ambientales.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajo de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN, cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 8%.

Por lo que CERTIFICO LA SIMILITUD de la tesis en 8% y está de acuerdo al nivel PERMITIDO, para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional.

Se emite el presente certificado a solicitud del interesado con fines de continuar con los trámites respectivos para la obtención del Grado Académico de Doctor en Ciencias de Ambientales.

Tacna, 16 diciembre 2024



FIRMA ASESOR
Nombres y apellidos

.....
Dr. Alberto Bacilio Quispe Cohaila
DNI N° 00419682



FIRMA TESISTA
Nombres y apellidos

.....
Sr. Osmar Cuentas Toledo
DNI N° 01342980

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado con todo mi amor a:

Mi madre, Luz Eufemia Toledo Barriga (In memoriam), cuyo legado me guía cada día.

Mi padre, César Cuentas Mendizábal, por ser un pilar en mi vida.

Mis hijos, Albert Osmar e Issac Khalid, quienes dan sentido a mis esfuerzos y sueños.

Luz Marina, madre de mis hijos, por compartir y construir juntos un camino lleno de aprendizajes.

Mis hermanos, Maryluz y Juan Diego, por estar siempre presentes con su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Primero, agradezco a Dios, por brindarme la fortaleza y la oportunidad de desarrollar este trabajo académico y culminar exitosamente el Doctorado en Ciencias Ambientales.

A la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, especialmente a la Escuela de Posgrado del Doctorado en Ciencias Ambientales, por su invaluable formación académica y por proporcionar el espacio para la realización de este trabajo.

Expreso mi profundo agradecimiento a mi asesor, el Dr. Alberto Bacilio Quispe Cohaila, y a mi co-asesor, el Dr. Aloisio Machado da Silva Filho, por sus valiosas orientaciones y contribuciones al desarrollo de esta investigación.

A los miembros del jurado, el Dr. Nataniel Mario Linares Gutiérrez y el Dr. Martín Eloy Casilla García, por sus sugerencias y aportes significativos que enriquecieron este trabajo.

A mis familiares y amigos, quienes me acompañaron en este proceso. En especial, agradezco al Ph.D. Efraín Yury Turpo Cayo, y a los Ingenieros Víctor Daniel Mamani Laura, Alberto André Cáceres Mamani, Jheison Kenni Yunguri, Jhon Deyvis Calsín Ccalla, Katy Machaca Quispe y Élmer Ulises Condori Escobar, por su apoyo incondicional, especialmente en las actividades de elaboración cartográfica y la validación de modelos en campo.

Finalmente, a todos aquellos que, de alguna manera, contribuyeron a la realización de este trabajo de investigación, mi más sincero agradecimiento.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA iv

AGRADECIMIENTOS v

RESUMEN xvii

ABSTRACT xviii

RESUMO xix

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 4

1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA 4

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 8

1.2.1. Problema principal 8

1.2.2. Problemas secundarios 8

1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN 9

1.3.1. Justificación social 9

1.3.2. Justificación académica 10

1.3.3. Justificación técnico-ambiental 10

1.3.4. Importancia de la investigación 10

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN 11

1.4.1. Objetivo general 11

1.4.2. Objetivos específicos 11

1.5. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN 12

1.5.1. Hipótesis general 12

1.5.2. Hipótesis específicas 12

1.6. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN 13

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO 14

2.1. Antecedentes del estudio 14
2.1.1. A nivel internacional 14
2.1.2. A nivel nacional 18
2.1.3. A nivel regional y/o local 21

2.2. Bases teóricas 24
2.2.1. Cuenca Hidrográfica 24
2.2.2. Características topográficas y morfométricas de la cuenca hidrográfica 26
2.2.3. Uso y cobertura de la tierra 26
2.2.4. Cambio en el uso de la tierra y cambio en la cobertura de la tierra 27
2.2.5. Sistemas de clasificación de uso y cobertura de la tierra 27
2.2.6. Cartografía de uso y cobertura de la tierra 28
2.2.7. Evaluación de cambios en el uso y cobertura de la tierra 30
2.2.8. La urbanización y los cambios de uso y cobertura de la tierra 31
2.2.9. Modelamiento de cambios en el uso y cobertura de la tierra 33

2.3. Definición de términos 40
2.3.1. Modelado. 40
2.3.2. Predicción. 40
2.3.3. Espaciotemporal. 40
2.3.4. DEM. 40

CAPÍTULO III: MARCO FILOSÓFICO 43

3.1. Perspectiva de la ontología 43
3.2. Perspectiva de la epistemología 44
3.3. Perspectiva de la axiología 45
3.4. Paradigma de investigación 46
3.5. Conclusión filosófica 46

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN 47

4.1. Caracterización o tipo del diseño de investigación 47
4.2. Población y muestra 48

4.3. Operacionalización de variables 49
4.3.1. Identificación de las variables 49
4.3.2. Caracterización de las variables 49
4.3.3. Definición operacional de las variables 52
4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos 60
4.4.1. Para el primer objetivo 60
4.4.2. Para el segundo objetivo 63
4.4.3. Para el tercer objetivo 69
4.4.4. Para el cuarto objetivo 70
4.5. Procesamiento y análisis de datos 70
4.5.1. Para el primer objetivo 70
4.5.2. Para el segundo objetivo 91
4.5.3. Para el tercer objetivo 106
4.5.4. Para el cuarto objetivo 107
CAPÍTULO V: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN 108
5.1. Delimitación y caracterización topográfica y morfométrica de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua 108
5.1.1. Delimitación de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua. 108
5.1.2. Características topográficas y morfométricas de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua 131
5.2. Análisis de tendencias espaciales de cambios de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua entre los años 1972-2012-2023 147
5.2.1. Cartografiado de la distribución espacial de clases de uso y cobertura de la tierra para los años 1972, 2012 y 2023. 147
5.5.2. Análisis de tendencias espaciales de cambios de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua entre los años 1972, 2012 y 2023. 154
5.3. Modelo de cambio de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua 176
5.4. Escenarios del cambio de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua para el año 2040 202

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN 210

6.1. Delimitación y caracterización topográfica y morfométrica de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua 210
6.1.1. Delimitación de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua. 210
6.1.2. Características topográficas y morfométricas de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua 212

6.2. Análisis de tendencias espaciales de cambios de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua entre los años 1972-2012-2023 212
6.2.1. Cartografiado de la distribución espacial de clases de uso y cobertura de la tierra para los años 1972, 2012 y 2023. 213
6.2.2. Análisis de tendencias espaciales de cambios de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua entre los años 1972, 2012 y 2023 214

6.3. Construcción, comparación y validación del modelo de cambios de uso y cobertura de la tierra en el periodo 2023 217

6.4. Predicción de escenarios futuros de cambio de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua para el año 2040, utilizando técnicas de modelación espaciotemporal. 220

CONCLUSIONES 223

RECOMENDACIONES 228

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 232

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características topográficas y morfométricas de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua 50

Tabla 2 Clases de uso y cobertura de la tierra de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua 51

Tabla 3 Principales características e identificación de Modelos Digitales de Elevación (DEMs) 61

Tabla 4 Principales características de las imágenes de satélite Landsat y Sentinel-2A. 65

Tabla 5 Principales fotografías aéreas. 66

Tabla 6 Mosaico de imágenes satelitales de Google Earth Pro del año 2012. 68

Tabla 7 Imágenes de satélite Landsat y Sentinel-2A. 68

Tabla 8 Estándar NMAS 74

Tabla 9 Estándar EMAS 76

Tabla 10 Estándar NSSDA 78

Tabla 11 Clave de interpretación de las clases de uso y cobertura. 100

Tabla 12 Matriz de tabulación cruzada 104

Tabla 13 Valores del coeficiente de Kappa 104

Tabla 14 Resultados de las métricas de evaluación RMSE, Error medio y Desviación estándar 114

Tabla 15 Resultados de la evaluación NMAS 115

Tabla 16 Resultados de las pruebas de hipótesis en el estándar EMAS 119

Tabla 17 Resultados de la evaluación posicional con el estándar NSSDA 120

Tabla 18 Características topográficas y morfométricas de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua 132

Tabla 19 Distribución de las elevaciones de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua 138

Tabla 20 Clases de uso y cobertura de la tierra de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua de 1972 149

Tabla 21 Clases de uso y cobertura de la tierra de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua de 2012 151

Tabla 22 Clases de uso y cobertura de la tierra de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua de 2023 153

Tabla 23 Desempeño de la clasificación en términos de errores de omisión y comisión 154

Tabla 24 Matriz de tabulación cruzada de uso y cobertura de la tierra (1972-2012) en píxeles..... 155

Tabla 25 Índices de concordancia Kappa (KIA) para la evaluación de precisión (1972-2012)..... 156

Tabla 26 Matriz de tabulación cruzada de uso y cobertura de la tierra (1972-2012) convertida a hectáreas 157

Tabla 27 Categorías de cambios del uso y cobertura de la tierra de 1972 a 2012 158

Tabla 28 Síntesis de los cambios del uso y cobertura de la tierra de 1972 a 2012 160

Tabla 29 Tasa de cambio anual de uso y cobertura de la tierra de 1972 a 2012 161

Tabla 30 Reporte global de cambio y no cambio del uso y cobertura de la tierra de 1972 a 2012 162

Tabla 31 Matriz de tabulación cruzada de uso y cobertura de la tierra (2012-2023) en píxeles..... 162

Tabla 32 Índices de concordancia Kappa (KIA) para la evaluación de precisión (2012-2023)..... 163

Tabla 33 Matriz de tabulación cruzada de uso y cobertura de la tierra (2012-2023) convertida a hectáreas 164

Tabla 34 Categorías de cambios del uso y cobertura de la tierra de 2012 a 2023 165

Tabla 35 Síntesis de los cambios del uso y cobertura de la tierra de 2012 a 2023 167

Tabla 36 Tasa de cambio anual de uso y cobertura de la tierra de 2012 a 2023 168

Tabla 37 Reporte global de cambio y no cambio del uso y cobertura de la tierra de 2012 a 2023 168

Tabla 38 Matriz de tabulación cruzada de uso y cobertura de la tierra (1972-2023) en píxeles..... 169

Tabla 39 Índices de concordancia Kappa (KIA) para la evaluación de precisión (1972-2023)..... 170

Tabla 40 Matriz de tabulación cruzada de uso y cobertura de la tierra (1972-2023) convertida a hectáreas 171

Tabla 41 Clases de cambios del uso y cobertura de la tierra de 1972 a 2023..... 172

Tabla 42 Síntesis de los cambios del uso y cobertura de la tierra de 1972 a 2023..... 174

Tabla 43 Tasa de cambio anual de uso y cobertura de la tierra de 1972 a 2023 175

Tabla 44 Reporte global de cambio y no cambio del uso y cobertura de la tierra de 1972 a 2023 176

Tabla 45 Desglose de la habilidad del modelo de 1972 a 2012..... 191

Tabla 46 Clases de uso y cobertura de la tierra predichos al 2023 195

Tabla 47 Cantidad de áreas validadas en hectáreas entre el mapa histórico y mapa predicho del año 2023 198

Tabla 48 Tabulación cruzada a nivel de píxel entre el mapa histórico y mapa predicho del año 2023. 199

Tabla 49 Valores proporcionales de la tabulación cruzada a nivel de píxel entre el mapa histórico y mapa predicho del año 2023..... 199

Tabla 50 Índice de precisión KIA para el año 2023: Comparación entre datos históricos y predichos 199

Tabla 51 Clases de uso y cobertura de la tierra para el año 2040..... 203

Tabla 52 Tasas de cambio anual de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua en el periodo de 1972 a 2040..... 204

Tabla 53 Tendencias y ajuste para los modelos de regresión lineal y cuadrático..... 205

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Modelos de elevación digital 42

Figura 2 Mapa de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua 49

Figura 3 Cuadro de empalme de las cartas nacionales a escala 1/100000 62

Figura 4 Metodología para delimitar y determinar las características topográficas de la Cuenca Hidrográfica Ilo-Moquegua 81

Figura 5 Pendiente del cauce principal 87

Figura 6 Delimitación de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua por modelos digitales del terreno 108

Figura 7 Delimitación de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua por la ANA y delimitación manual 109

Figura 8 Vectorizado de los puntos de control 110

Figura 9 Tratamiento de datos de puntos de control 110

Figura 10 Identificación de puntos con valores -9999 112

Figura 11 Diferencias de altura en la zona minera del tajo Cuajone 113

Figura 12 Puntos con error vertical en el DEM ALOSPALSAR 116

Figura 13 Puntos con error vertical en el DEM ASTER 117

Figura 14 Puntos con error vertical en el DEM SRTM. 118

Figura 15 Zonas con discrepancia en la delimitación de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua 122

Figura 16 Análisis cartográfico de la zona 1 123

Figura 17 Análisis cartográfico de la zona 2 124

Figura 18 Análisis cartográfico de la zona 3 125

Figura 19 Análisis cartográfico de la zona 4 126

Figura 20 Análisis cartográfico de la zona 5 127

Figura 21 Análisis cartográfico de la zona 6 128

Figura 22 Análisis cartográfico de la zona 7 129

Figura 23 Diferencias entre la delimitación de la ANA y delimitación manual..... 131

Figura 24 Mapa de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua..... 132

Figura 25 Mapa de pendientes de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua..... 136

Figura 26 Distribución de las elevaciones de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua... 138

Figura 27 Curva hipsométrica porcentual de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua ... 139

Figura 28 Polígono de frecuencia de altitudes de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua 142

Figura 29 Polígono de frecuencia de altitudes de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua 143

Figura 30 Red de drenaje de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua..... 145

Figura 31 Mapa de uso y cobertura de la tierra de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua de 1972 148

Figura 32 Representación estadística de las clases de uso y cobertura de la tierra de 1972 149

Figura 33 Mapa de uso y cobertura de la tierra de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua de 2012 150

Figura 34 Representación estadística de las clases de uso y cobertura de la tierra de 2012 151

Figura 35 Mapa de uso y cobertura de la tierra de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua de 2023 152

Figura 36 Representación estadística de las clases de uso y cobertura de la tierra de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua de 2023..... 153

Figura 37 Mapa de clasificación cruzada del uso y cobertura de la tierra (1972-2012)157

Figura 38 Mapa de cambios del uso y cobertura de la tierra de 1972 a 2012..... 159

Figura 39 Mapa de clasificación cruzada del uso y cobertura de la tierra (2012-2023)164

Figura 40 Mapa de cambios del uso y cobertura de la tierra de 2012 a 2023..... 166

Figura 41 Mapa de clasificación cruzada del uso y cobertura de la tierra (1972-2023)171

Figura 42 Mapa de cambios del uso y cobertura de la tierra de 1972 a 2023 173

Figura 43 Mapa de carreteras en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua 177

Figura 44 Modelo de elevación digital (DEM) de Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 178

Figura 45 Mapa de transición de la clase Agricultura a la clase Infraestructura Urbana 179

Figura 46 Mapa de transición de la clase Bofedal a la clase Natural 179

Figura 47 Mapa de transición de la clase Agua a la clase Natural 180

Figura 48 Mapa de transición de la clase Natural a la clase Infraestructura Urbana 180

Figura 49 Mapa de transición de la clase Natural a la clase Minera 181

Figura 50 Mapa de transición de la clase Natural a la clase Agricultura 181

Figura 51 Mapa de transición de la clase Natural a la clase Agua 182

Figura 52 Mapas de tendencia espacial de tercer orden polinomial de cambio 182

Figura 53 Mapas de distancia euclidiana 183

Figura 54 Mapa de pendientes en porcentaje 184

Figura 55 Mapa de geología 185

Figura 56 Mapa de capacidad de uso mayor de las tierras 186

Figura 57 Mapa de suelos 187

Figura 58 Transición Potencial del Sub-Modelo Natural a Infraestructura Urbana 188

Figura 59 Mapas de potenciales de transición para los Sub-Modelo 192

Figura 60 Mapa del modelo potencial proyectado para las transiciones al 2023 193

Figura 61 Mapa de predicción del cambio de uso y cobertura de la tierra al 2023 195

Figura 62 Representación estadística de clases de uso y cobertura de la tierra predichos al 2023 196

Figura 63 Mapa de validación entre el mapa histórico y mapa predicho del año 2023 197

Figura 64 Mapa de predicción de escenarios para el año 2040 202

Figura 65 Representación estadística de clases de uso y cobertura de la tierra para el año 2040 203

Figura 66 Tendencias y ajuste para los modelos de regresión lineal y cuadrático 206

RESUMEN

El objetivo principal de esta investigación fue evaluar los cambios en el uso y cobertura de la tierra (CUCT) en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua durante los períodos 1972-2012-2023 y modelar escenarios futuros para el año 2040. El problema central abordado fue la ocupación desordenada y la conversión de la cobertura natural, procesos que, sin una planificación adecuada, pueden generar impactos significativos en los ámbitos social, económico y ambiental. Esta problemática se agrava con la reducción de bofedales y lagunas, áreas clave para la conservación de la biodiversidad biológica en Moquegua, las cuales desempeñan un rol esencial en la preservación de ecosistemas y recursos naturales fundamentales.

Para evaluar y monitorear estos cambios, se emplearon productos de teledetección y herramientas avanzadas como el software ArcGIS 10,5 y TerrSet. La clasificación de las coberturas se validó mediante verificaciones in situ, garantizando la precisión de los resultados. El análisis permitió identificar seis categorías principales de uso y cobertura de la tierra: Agricultura, Agua, Bofedal, Infraestructura Urbana, Minera y Natural.

El análisis comparativo mostró una consistencia significativa en los resultados, destacándose los cambios más relevantes en el período 1972-2023: la conversión de cobertura natural a minera (6226,46 hectáreas), de cobertura natural a agrícola (5369,50 hectáreas) y de cobertura natural a infraestructura urbana (2107,69 hectáreas). Estos hallazgos ofrecen información valiosa para la planificación territorial y la gestión sostenible de los recursos en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua.

ABSTRACT

The main objective of this research was to evaluate land use and land cover changes (LULC) in the Ilo-Moquegua watershed during the periods 1972-2012-2023 and to model future scenarios for the year 2040. The central problem addressed was the unregulated occupation and conversion of natural land cover, processes that, without proper planning, can generate significant social, economic, and environmental impacts. This issue is further exacerbated by the reduction of wetlands and lagoons, which are key areas for the conservation of biological biodiversity in Moquegua and play a crucial role in preserving ecosystems and essential natural resources.

To evaluate and monitor these changes, remote sensing products and advanced tools such as ArcGIS 10,5 and TerrSet software were used. The classification of land cover categories was validated through in situ verification, ensuring the accuracy of the results. The analysis identified six main categories of land use and cover: Agriculture, Water, Wetland, Urban Infrastructure, Mining, and Natural.

The comparative analysis showed significant consistency in the results, highlighting the most relevant changes during the period 1972-2023: the conversion of natural cover to mining (6226,46 hectares), natural cover to agriculture (5369,50 hectares), and natural cover to urban infrastructure (2107,69 hectares). These findings provide valuable information for territorial planning and the sustainable management of resources in the Ilo-Moquegua watershed.

RESUMO

O objetivo principal desta pesquisa foi avaliar as mudanças no uso e cobertura da terra (LULC) na bacia hidrográfica Ilo-Moquegua durante os períodos de 1972-2012-2023 e modelar cenários futuros para o ano de 2040. O problema central abordado foi a ocupação desordenada e a conversão da cobertura natural, processos que, sem um planejamento adequado, podem gerar impactos sociais, econômicos e ambientais significativos. Essa problemática é agravada pela redução de áreas úmidas e lagoas, que são essenciais para a conservação da biodiversidade biológica em Moquegua, desempenhando um papel crucial na preservação dos ecossistemas e recursos naturais fundamentais.

Para avaliar e monitorar essas mudanças, foram utilizados produtos de sensoriamento remoto e ferramentas avançadas, como os softwares ArcGIS 10,5 e TerrSet. A classificação das categorias de uso e cobertura da terra foi validada por meio de verificações in loco, garantindo a precisão dos resultados. A análise permitiu identificar seis principais categorias de uso e cobertura da terra: Agricultura, Água, Áreas Úmidas, Infraestrutura Urbana, Mineração e Natural.

A análise comparativa mostrou consistência significativa nos resultados, destacando-se as mudanças mais relevantes no período de 1972-2023: a conversão de cobertura natural para mineração (6226,46 hectares), de cobertura natural para agricultura (5369,50 hectares) e de cobertura natural para infraestrutura urbana (2107,69 hectares). Esses resultados oferecem informações valiosas para o planejamento territorial e a gestão sustentável dos recursos na bacia hidrográfica Ilo-Moquegua.

INTRODUCCIÓN

El hombre desde su aparición fue dejando rastros de las actividades antrópicas y modos de vivir, para su subsistencia y protección, ocupando distintos espacios geográficos en los diferentes continentes de nuestro planeta, como se evidencia en las pinturas rupestres de los primeros hombres Neandertales o Cavernícolas durante el periodo del paleolítico, las construcciones de viviendas subterráneas y semienterradas de los hombres del Cromagnon durante el periodo del neolítico para albergar cada vez mayor cantidad de habitantes, las construcciones sobre la cobertura de la tierra inician en el periodo del holoceno utilizando diferentes materiales, las construcciones de viviendas en las ciudades con ladrillos y elementos de fábrica que comenzaron en el siglo IX, la revolución doméstica se da en el siglo XVIII con la iluminación artificial descubriendo el confort físico y el surgimiento de la revolución industrial, las casas de apartamentos como edificios en hileras y el crecimiento vertical de las ciudades actuales iniciaron en el siglo XX (Simancas, 2003; Mylopotamitaki et al., 2024); por lo que podemos indicar que existe una relación directa entre la evolución del hombre y el paisaje produciendo constantes cambios en el uso y cobertura de la tierra.

Los estudios enfocados a los cambios del uso y cobertura de la tierra comenzaron por los años de 1990, con la denominación “Land-Use and Land-Cover-Change” (LUCC) o “Land cover and land use change” (LCLUC) focalizados en la evolución del paisaje con relación al cambio global, a partir de tres focos de investigación: la dinámica del uso de la tierra, la dinámica de la cobertura de la tierra y la modelación a nivel regional como global (Montero Mora & Viales Hurtado, 2015; Patru-Stupariu et al., 2020); por lo que, en los últimos años, los estudios LUCC se convierten en investigaciones importantes en términos de planificación ambiental sostenible frente a los problemas de seguridad alimentaria, cambio climático y pérdida de biodiversidad (Winkler et al., 2021), identificándose que los estudios en LUCC están aumentando la atención académica a escala global, nacional y local (Potapov et al., 2022) para abordar los principales problemas de seguridad ecológica (Peng et al., 2023; Bao et al., 2024).

En el Perú la importancia de los estudios LUCC se inicia con la implementación de normativas del Ministerio del Ambiente en el 2004, donde se establece el marco de la

Zonificación Ecológica Económica – ZEE (Decreto Supremo Nº 087-2004-PCM, 2004), en el 2006 establece el proceso metodológico para la ZEE (Decreto del Consejo Directivo Nº 010-2006-CONAM-CD, 2006), en el 2012 aprueban los Lineamientos de Política para el Ordenamiento Territorial (Resolución Ministerial Nº 026-2012-MINAM, 2012) y en el 2013 definen los instrumentos Técnicos Sustentatorios del Ordenamiento Territorial y las pautas técnicas para los Estudios Especializados - EE dentro de ellos los Estudios de análisis de cambios de cobertura y uso de la tierra (Resolución Ministerial Nº 135-2013-MINAM, 2013), implementándose disposiciones para realizar el trabajo de campo en la elaboración de la línea base de los instrumentos de gestión ambiental (Resolución Ministerial Nº 108-2020-MINAM, 2020).

Los estudios especializados sobre cambios del uso y cobertura de la tierra de una área determinada son esenciales para proporcionar subsidios al monitoreo ambiental (Facco et al., 2017; Hrdina & Romportl, 2024), aplicado a dinámicas espacio-temporales del paisaje (Mao et al., 2024), expansión urbana (Akay, 2024; Gilbert & Shi, 2024), expansión agrícola (del Pozo et al., 2024; Rukundo et al., 2023), sobreexplotación del recurso agua (Lamichhane et al., 2024; Mammadova & Negri, 2024), destrucción de bosques (Pradhan et al., 2024), islas de calor urbano (Hamed Fahmy et al., 2023; Shahfahad et al., 2022), cambio climático (G. C. G. da Silva et al., 2024; Woldesenbet et al., 2023) entre otros estudios, convirtiéndose en un componente importante en las estrategias de planificación espacial territorial (Nie, 2024; Yanbo et al., 2023), conservación de la biodiversidad (Guilherme et al., 2024; Yue et al., 2023), gestión de áreas protegidas (Chiaka et al., 2024; Purwanto et al., 2023), planificación de energías renovables en áreas rurales (Poggi et al., 2023; Tønnesen et al., 2023) para alcanzar un desarrollo sostenible y dominar la dinámica expansiva del uso de la tierra (Bovet et al., 2023; Anthony et al., 2024; Pei et al., 2024).

En este contexto, el área de estudio es la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, una de las cuencas que tiene mayor actividad antrópica minera, cuprífera y agricultura del cultivo de la vid en la región de Moquegua y el país, dando titulaciones históricas a la región como: “Capital del cobre peruano” y "Tierra del Sol, Vid y la Amistad" (Kuon, 1996; Ibarcena Balbuena, 2017); aumentando la población Moqueguana según los reportes de los dos últimos censos nacionales, del 2007 con 161533 habitantes y el 2017

con 174863 habitantes (INEI, 2023), mientras que los reportes de la biodiversidad biológica en Moquegua indican que existen 21 zonas de vida de las 84 que posee el país, identificándose ecosistemas frágiles que albergan especies endémicas y se encuentran en situaciones de vulnerabilidad alta como los bofedales y lagunas altoandinas, manteniéndose amenazadas constantemente por las actividades antrópicas (Gutiérrez Tito, 2013), por lo que plateamos el presente estudio de investigación titulado "Modelado y predicción espaciotemporal de cambios del uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua" que está divida en cinco capítulos.

En el primer capítulo se presenta el planteamiento del problema que contiene la formulación del problema, los objetivos y las hipótesis. En el segundo capítulo se presenta el marco teórico resaltando los antecedentes del estudio a nivel internacional, nacional y local, las bases teóricas necesarias para el estudio del modelamiento y evaluación de cambios de uso y cobertura de la tierra y para finalizar el capítulo el apartado sobre definición de términos. En el tercer capítulo se presenta al marco filosófico, describiéndose temas del pensamiento crítico e investigación científica positivista o conductual. En el cuarto capítulo se presenta el marco metodológico definiendo las variables y el diseño de la investigación, las fuentes de datos y los procedimientos. En el quinto capítulo se presentan y analizan los resultados de la investigación con respecto a resultados de otras investigaciones, reafirmando los resultados de esta investigación. En el sexto capítulo se desarrolla el análisis y discusión de resultados. Finalmente, se presentan las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

CAPÍTULO I
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El cambio de uso y cobertura de la tierra (CUCT), es el resultado primario de las actividades y alteraciones que desarrolla la humanidad (Jing et al., 2024), forman parte de los procesos dinámicos generalizados y significativos que impulsan el cambio ambiental y la degradación de los ecosistemas naturales a nivel mundial (Entahabu et al., 2023), presentándose en diversas escalas espaciales y temporales (Ocloo et al., 2024), de una forma acelerada en las últimas décadas (Vinayak et al., 2021), logrando impactar significativamente en los servicios ecosistémicos, las superficies biofísicas y funcionamiento de los sistemas naturales del planeta (Dembélé et al., 2024), teniendo un efecto perjudicial sobre el desarrollo sostenible del medio ambiente local, regional y mundial.

La evaluación del cambio de uso y cobertura de la tierra (CUCT) es uno de los métodos más precisos que permite comprender el uso y la cobertura de la tierra en tiempos pasados y estimar las tipologías de cambios (Leta et al., 2021), nos proporciona una perspectiva para modelar y predecir los posibles escenarios futuros, para que los tomadores de decisiones puedan plantear estrategias futuras de planificación y desarrollo (Değermenci, 2023). La evaluación y predicción de los CUCT en las cuencas hidrográficas, es un componente crucial que influye directamente en la hidrología y los recursos hídricos (W. Liu et al., 2024), son esenciales para una planificación y gestión optimizadas de los recursos hídricos (Sankarrao et al., 2021), incluyendo la regulación del clima y la biodiversidad que está en peligro por las altas tasas de deforestación (Mendoza-Ponce et al., 2020).

Los reportes de estadísticas e indicadores de uso de la tierra sobre las tendencias globales, regionales y nacionales desde 1990 al 2019, realizado por la FAO mediante los resúmenes analíticos de *FAOSTAT Analytical Brief*, informa que en la clasificación de tierras agrícolas entre 1990 y 2019, las tierras de cultivo aumentaron el 5 % y las tierras

de pradera y pasto permanente disminuyeron el 4 %. (FAO, 2021). Otras investigaciones sobre el CUCT a nivel mundial realizadas por Potapov et al., (2022), comprueban que durante el periodo de los años 2000-2020, existió una disminución de la cobertura arbórea global de 1 millón de km^2 y la tasa más alta de pérdida neta de bosques fue en América del Sur con 5 % es decir 0,44 millones de km^2 de área forestal. La pérdida y alteración de bosques son consecuencia del aumento de expansión de tierras de cultivo con 11,5 % en los intervalos de años 2000-2003 y 2016-2019, identificándose que América del Sur presentó el mayor incremento de tierras de cultivo con 37,8 % durante el periodo 2000-2020. La expansión de terrenos edificados a nivel global al 2020 fue de 4,3 millones de km^2, identificándose que el 47 % está localizado en Asia, después por China y Estados Unidos con 21 % y 14 % respectivamente.

La expansión urbana no simplemente conlleva el acrecentamiento de la densidad de población en áreas urbanas, sino también cambios significativos en el uso y cobertura de la tierra como en las dinámicas socioeconómicas. Según el Informe Mundial de las Ciudades 2022 de ONU-Hábitat, reporta que, pese a la disminución temporal de urbanización en la pandemia COVID-19, a nivel mundial la población crece con una tendencia de 2,2 billones de personas más para el año 2050 (UN-Hábitat, 2022). La población mundial, en noviembre del 2022, llegó aproximadamente a 8000 millones de personas y más de la mitad (55 %) viven en zonas urbanas, proyectándose al año 2050 un aumento de 70 % (ONU, 2023). Las tasas futuras del uso de tierra y las tasas de crecimiento de la población son los aspectos cruciales a considerar en el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 11 de la ONU (Rienow et al., 2022), convirtiéndose en temas discutibles para la gestión sostenible de la tierra (Frimpong et al., 2023).

A nivel nacional, el informe del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI) y el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), sobre la Encuesta Nacional Agropecuaria entre los años 2014 a 2019 y 2021 al 2022, respecto a los usos de la tierra, reporta que existe una tendencia creciente en la superficie agrícola, evidenciándose que en el 2015 la superficie agrícola representaba el 36,1 %, incrementándose 7,9 puntos porcentuales al 2022, donde la superficie agrícola representa el 44,9 %, así mismo, reporta que existe una tendencia decreciente de superficie no agrícola (bosque, monte, pasto natural entre otros usos), mostrando que en el 2015

representaba 63,9 % y en el 2022 representa el 55,1 % (MIDAGRI & INEI, 2023). El proceso de deforestación es la primordial causa de perdida forestal en la Amazonía peruana (MINAM, 2021), por otro lado, el MINAM (2023) con los resultados obtenidos del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero desde el 2000 al 2019, indica que las principales emisiones se deben al uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura representado el 47,90 % del total de GEI generado en Perú.

El Perú tiene una extensión de 129,2 Millones de hectáreas (Mha), entre los años de 1985 y 2022, la vegetación natural (Bosque, Bosque seco, bosque inundable, pastizal, matorral y otras coberturas) disminuyo 4,1 Mha y el uso antrópico (Minería, infraestructura, minería, agropecuario, agricultura entre otras), resaltando que la superficie minera incremento 165,5 miles de hectáreas (mha), desde 3,8 mha en 1985 a 169,3 mha en 2022, presentando un aumento de 1618 ha/año al 2009 y desde el 2009 a 2022 presenta una tasa de 9160 ha/año; la superficie de infraestructura incremento 218,4 mha, desde 106,7 mha en 1985 a 325,1 mha en 2022 presentando un aumento constante de 5,4 mil hectáreas por año y la superficie de uso agropecuario incremento 3,8 Mha desde 10,7 Mha en 1985 a 14,5 Mha en 2022 (Mapbiomas Perú, 2023).

A nivel local, los impactos de la dinámica de uso y cobertura de la tierra en la parte alta de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua desde 1973 y 2016 son significativos, identificando que las coberturas que incrementaron su expansión fueron: área urbana 13,63 veces, área de centros de mineros alcanzó 1092,77 ha, mientras las coberturas que tuvieron mayor reducción son las coberturas de glaciar 93,3 % y bofedal 24,87 % (Cuentas Toledo, 2017). Otro estudio identifica que las acciones humanas y el crecimiento urbano en la ciudad de Moquegua y el pueblo de Samegua, durante 1955 y 2023 han provocado que la clasificación de superficie “Sin/Poca Vegetación” disminuya 3882,59 hectáreas, la clasificación de “Cuerpo Agua” disminuya 126,88 hectáreas y la clasificación de “Yacimiento Arqueológico” disminuya 59,88 hectáreas, por otro lado, la clasificación de “Zona Agrícola” aumentó 2469,72 hectáreas y la clasificación “Superficie Artificial” aumento 1835,12 hectáreas (Cuentas Toledo, 2019); datos que son importantes para comprender el proceso de cambios de uso y cobertura de la tierra y una herramienta para los tomadores de decisiones en el ordenamiento territorial y ambiental.

Los estudios de cobertura vegetal de la Región Moquegua a escala de trabajo 1:100000 del proyecto “Fortalecimiento de las capacidades para el Ordenamiento Territorial del Departamento de Moquegua”, desarrollados para la Meso Zonificación Ecológica y Económica del Departamento de Moquegua (Gobierno Regional Moquegua, 2023), son importantes para que los pobladores y autoridades puedan conocer los potenciales y limitantes que se tiene en el territorio de Moquegua, permitiendo tomar las mejores orientaciones a los tomadores de decisión en la gestión social, económica, cultural y ambiental del territorio. Pero se identificó que, en los estudios de cobertura vegetal de la Región Moquegua, presenta errores en la clasificación de sus coberturas, como, por ejemplo, en la identificación de la clase cobertura agricultura (AGRI) de la Cuenca Hidrográfica Baja del Río Moquegua, donde la sombra de los cerros es considerada como zona de agricultura (AGRI).

Estos errores identificados se presentan comúnmente, por no detectar la presencia de sombras en la teledetección de imágenes satelitales ópticas, sombras que se producen por la fisiografía del terreno, objetos y nubosidad al momento de su barrido o captura de la información espacial, que son causados por diversos factores que distorsionan las imágenes, llevando a la perdida de información espacial en estudio, distorsionando los tonos y formas reales de los objetos, afectando negativamente en la identificación de las características, clasificación y dificultando el análisis de los objetos en el procesamiento de las imágenes satelitales ópticas (Shi et al., 2023; Shi & Zhao, 2023).

Estos errores, no solo se detectan en el procesamiento de imágenes satelitales ópticas, sino también en la teledetección de imágenes de radar para generar modelos digitales de elevación MDE conocidos como DEM del inglés *digital elevation model*, que son el insumo principal para realizar la delimitación de las cuencas hidrográficas y obtención de sus parámetros morfométricos para la modelización hidrológica y estudios para la gestión de cuencas hidrográficas (Soille & Ansoult, 1990; Molina-Navarro et al., 2023; H. Zhang et al., 2020), por lo que es importante identificar y utilizar el DEM más representativo o fidedigno a la realidad de la topografía del terreno, para lograr una delimitación real de la cuenca hidrográfica e iniciar los estudios referidos a la cuenca hidrográfica (Gutiérrez, 2014: Mercuri et al., 2023; Sena et al., 2020b).

En consecuencia de lo fundamentado en el párrafo anterior, se analizó la delimitación de la Cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua en la versión actual del Mapa de Unidades Hidrográficas del Perú, publicada en formato digital WMS y shapefile (ANA, 2009a), mapa aprobado por Resolución Ministerial N° 033-2008-AG (INRENA, 2008), donde se identifica que algunas zonas no están delimitadas correctamente, las mismas que fueron evaluadas con la información topográfica de la carta Nacional a una escala de 1/100 000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2021), como por ejemplo la zona de la Laguna Parincota, que no está incluida como parte de la Cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua y según la delimitación de la ANA corresponde a la Cuenca Hidrográfica del Tambo. Error que es causado por la delimitación incorrecta entre la Laguna Seca y Laguna Parincota, como si entre ambas lagunas existiera un cerro o loma, pero en realidad es una zona plana en la que se conectan las dos lagunas y vierten sus aguas en tiempos de avenida a la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Por lo antes mencionado, en la identificación del problema a nivel mundial, nacional y local, nos lleva a formular el problema con las siguientes interrogantes:

1.2.1. Problema principal

¿Cuál será el impacto del cambio espacial histórico en el uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua entre los años 1972, 2012 y 2023, y cuáles son las predicciones de escenarios para el año 2040?

1.2.2. Problemas secundarios

1. ¿Cómo se puede lograr una delimitación más precisa y realista de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, que se ajuste mejor a la topografía del terreno, para mejorar la precisión en la representación de sus características

topográficas y morfométricas y su impacto en la gestión del uso y cobertura de la tierra?

2. ¿Cuáles han sido las tendencias espaciales históricas de los cambios en el uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua entre los años 1972, 2012 y 2023?
3. ¿Cómo se puede construir y validar un modelo de cambios de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, considerando sus tendencias espaciales históricas?
4. ¿Cuáles serán las posibles predicciones para el cambio de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua para el año 2040?

1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Justificación social

La investigación propuesta tiene una relevante justificación social, ya que busca comprender y predecir los cambios en el uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua. Estos cambios tienen un impacto directo en las comunidades locales, afectando la disponibilidad de recursos naturales, la seguridad alimentaria y la calidad de vida. Al modelar espacialmente estos cambios y predecir escenarios futuros, esta investigación contribuirá a la toma de decisiones informadas en la planificación del desarrollo sostenible, la gestión de recursos hídricos y la conservación del medio ambiente, beneficiando así a la población de la cuenca hidrográfica.

Las investigaciones sobre los crecimientos urbanos y el análisis de los cambios en el uso y cobertura de la tierra constituyen estudios primordiales para monitorear a lo largo del tiempo y del espacio, permitiéndonos identificar posibles impactos ambientales en las cuencas hidrográficas, Además que estos estudios obtener informaciones detalladas y precisas sobre los crecimientos urbanos y las posibles conversiones de aumento y disminución entre las categorías de uso y cobertura de la tierra.

1.3.2. Justificación académica

Desde una perspectiva académica, esta investigación aporta al avance del conocimiento en el campo de las ciencias ambientales, el sensoramiento remoto, los sistemas de información geográfica, la geomática y la geografía, específicamente en el modelado espacial del uso y cobertura de la tierra. Al aplicar metodologías de procesamiento geoespacial donde se analizan las tendencias espaciales históricas y se predicen escenarios futuros con nuevas tecnologías, enriqueciéndose la comprensión teórica y metodológica de estos procesos dinámicos espaciales, obteniendo resultados más precisos y confiables. Además, los resultados obtenidos podrán ser utilizados como referencia para futuros estudios similares o en la elaboración de modelos más complejos.

1.3.3. Justificación técnico-ambiental

La investigación es fundamental desde un punto de vista técnico y ambiental, ya que utiliza y valida modelos digitales de elevación y técnicas de modelación espaciotemporal para mejorar la precisión en la representación de las características topográficas y morfométricas de la cuenca. Esto permite una evaluación más precisa de los impactos ambientales del cambio de uso y cobertura de la tierra, facilitando la identificación de áreas críticas para la conservación y la implementación de estrategias de manejo sostenible.

El uso de las técnicas de geoprocesamiento y sensoramiento remoto permite la previsión futura de los usos y cobertura de la tierra a través de la simulación de escenarios. De esta forma, podrán auxiliar a los tomadores de decisión y planeadores urbanos en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua.

1.3.4. Importancia de la investigación

La importancia de esta investigación radica en su capacidad para proporcionar información valiosa para la planificación y gestión del territorio, la conservación de ecosistemas y la mitigación de los efectos del cambio climático. Al entender cómo ha evolucionado el uso y cobertura de la tierra en el pasado y prever cómo podría cambiar

en el futuro, se pueden desarrollar políticas y estrategias más efectivas para enfrentar los desafíos ambientales y socioeconómicos de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua.

El impacto de la urbanización en el cambio de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua constituye un estudio fundamental para el desarrollo integral y ordenado de la misma. Este trabajo se justifica también por la importancia de conservar los fragmentos de ecosistemas naturales o seminaturales y la importancia de conservar el agroecosistema.

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo general

Analizar y modelar espacialmente el uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua entre los años 1972, 2012 y 2023, para el análisis de sus cambios históricos y la predicción de escenarios al año 2040.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Delimitar de manera más precisa y realista la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua utilizando un modelo digital de elevación, evaluado y validado con estándares de exactitud posicional de datos espaciales.
2. Analizar las tendencias espaciales de los cambios en el uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua entre los años 1972, 2012 y 2023.
3. Construir, comparar y validar un modelo de cambios de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, del mapa espacial 2023.
4. Predecir escenarios futuros del cambio de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua para el año 2040, utilizando técnicas de modelación espaciotemporal.

1.5. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Hipótesis general

El modelado espacial del uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua revelará patrones significativos de transformación a lo largo del tiempo entre los años 1972, 2012 y 2023, y que las técnicas de modelamiento geoespacial permitirán generar simulaciones precisas de escenarios futuros para el año 2040, contribuyendo a su planificación y gestión del ordenamiento territorial y ambiental.

1.5.2. Hipótesis específicas

1. La utilización de un modelo digital de elevación, evaluado y validado según estándares de exactitud posicional de datos espaciales, permitirá una delimitación más precisa y realista de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, lo que mejorará la representación de sus características topográficas y morfométricas y contribuirá a una gestión más efectiva del uso y cobertura de la tierra.
2. El análisis de las tendencias espaciales históricas de los cambios de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua entre los años 1972, 2012 y 2023, permitirá identificar patrones de transformación y determinar el estado de conservación de las coberturas de la tierra, proporcionando información importante para la gestión y planificación ambiental en la cuenca.
3. La construcción de un modelo de cambio de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, validado mediante la comparación entre el mapa espacial histórico del año 2023 y el mapa predicho por el modelo, proporcionará una representación precisa de las tendencias espaciales históricas y facilitará la predicción de cambios futuros.

4. Los posibles escenarios futuros del cambio de uso y cobertura de la tierra de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua para el año 2040 mostrarán una reducción significativa de las áreas agrícolas próximas a las áreas urbanas, debido a la expansión urbana y a los cambios en las prácticas de uso de la tierra.

1.6. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Las principales limitaciones de la investigación estuvieron relacionadas con el acceso a ciertas concesiones mineras y áreas de propiedad privada, debido a la falta de permisos, cuyos trámites administrativos resultaron ser complejos y prolongados. No obstante, esta restricción fue superada mediante el uso de imágenes satelitales de alta resolución proporcionadas por Google Earth Pro, las cuales permitieron complementar la validación en campo. De este modo, se logró garantizar la precisión en la delimitación de la cuenca y en la clasificación del uso y cobertura de la tierra, asegurando el cumplimiento de los objetivos de la investigación.

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

2.1.1. A nivel internacional

En el estudio de "Evaluación espaciotemporal del cambio en la cobertura del uso del suelo, fuerzas impulsoras y consecuencias utilizando técnicas geoespaciales: el caso de la ciudad y el interior de Naqamte, oeste de Etiopía" se utilizó el método de máxima verosimilitud para la clasificación LULC a partir de imágenes Landsat de 1987, 2004 y 2021, posteriormente se realizaron tabulaciones cruzadas y análisis de tendencia de superficie para identificar las transiciones terrestres dominantes en los mapas posteriores a la clasificación. Los resultados muestran que las clases LULC espaciales y temporales cambiaron significativamente, excepto en los cuerpos de agua. La extensión aérea estimada de las tierras forestales ha disminuido drásticamente en un 14,5 % en los últimos 34 años (1987-2021), mientras que las tierras desnudas, las tierras edificadas y las tierras agrícolas han aumentado un 6,83 %, 4,33 % y 3,21 %, respectivamente. Según este estudio, las principales causas de LULCC en el distrito fueron el aumento de la población, el aumento de las tierras de cultivo, la necesidad de leña, materiales de construcción y carbón, así como el uso ineficaz de los recursos naturales y los sistemas de seguimiento de la tierra. El deterioro de los bosques, la extinción de especies vegetales y animales, la degradación del suelo y la falta de alimento para animales fueron los principales efectos de los cambios en LULC. La precisión general de las tres imágenes clasificadas de los años 1987, 2004 y 2021 fue del 86 %, 94 % y 97 %, respectivamente. Por último, nuestro trabajo utilizó el análisis de la cadena de Markov para examinar LULCC de manera espaciotemporal. Concluyendo que estos hallazgos brindarían apoyo a las decisiones de los formuladores de políticas para formular futuras políticas de uso sostenible de la tierra (Edosa & Nagasa, 2024).

En el estudio de "Un análisis de los efectos de los cambios en el uso y la cobertura del suelo sobre la escorrentía en la cuenca de Luvuvhu, Sudáfrica" se utilizó el modelo

de simulación de autómatas celulares de redes neuronales artificiales (ANN-CA), y estableció la respuesta de la escorrentía a los cambios de LULC *(land use/land cover)*, utilizando el modelo de la herramienta de evaluación de suelos y agua (SWAT). Los resultados indican que la tierra desnuda tuvo el mayor aumento del 15,2 % y la vegetación natural tuvo la mayor disminución del 18,9 %, así mismo los resultados de la clasificación LULC mostraron altas precisiones generales que oscilaron entre el 93 % y el 98 % y coeficiente Kappa superiores a 0,9. Los LULC previstos para 2025 muestran que la tierra desnuda tendrá el mayor aumento de 168 km^2, mientras que la vegetación natural puede perder la mayor superficie de 356 km^2 en 2025. Se espera que las mismas tendencias observadas en 2025 continúen hasta el año 2030, indican que, en promedio, la escorrentía superficial general aumentó un 7,3 % de 169,14 mm a 181,49 mm entre 1990 y 2020. Los resultados mostraron que la escorrentía superficial de la cuenca de Luvuvhu se vio alterada debido a los cambios significativos en LULC en la tierra desnuda y la vegetación natural, con 15,2 % de aumento y 18,9 % de disminución, respectivamente. Concluyendo que, debido a las alteraciones previstas en LULC, persiste la probabilidad de un aumento de la escorrentía superficial, lo que plantea posibles desafíos en la gestión de cuencas, incluidas inundaciones y erosión de riberas de ríos o canales de arroyos. Por lo tanto, priorizar el desarrollo de estrategias efectivas de gestión de cuencas es crucial, ya que sirven como una medida fundamental para mitigar los impactos de los cambios LULC (Óscar et al., 2024).

En el estudio de "Modelado y predicción de cambios en el uso y la cobertura del suelo utilizando el modelador de cambio de suelo en la cuenca del río Suluh, tierras altas del norte de Etiopía" se utilizó clasificación difusa del vecino más cercano para clasificar las imágenes Landsat y con el software IDRISI Selva se realizó la detección de cambios y el modelado. Los resultados mostraron una disminución de las tierras forestales en 97,2 %, las tierras de pastoreo en 89,8 %, las tierras de plantaciones en 89,1 %, las tierras de arbustos en 1,5 % y las masas de agua en 84,8 % entre 1990 y 2002, mientras que aumentaron las tierras desnudas en 10,6 %, el suelo urbanizado en 29,4 % y el suelo cultivado en 65,4 %. En la predicción del modelo para los años 2028 y 2048. las tierras desnudas, edificadas y cultivadas aumentarán a costa de cuerpos de agua, pastos, bosques, matorrales y plantaciones. También identificaron que las precipitaciones, pendiente,

altura, distancia a ríos, la distancia a las carreteras, la distancia a las ciudades y la densidad de población fueron los principales determinantes del cambio de LULC en el área de estudio. Concluyendo que se debe promover el desarrollo sostenible, salvaguardar la cuenca fluvial y disminuir la gravedad de los cambios (Entahabu et al., 2023).

En el estudio de "Simular y predecir tendencias futuras de uso y cobertura del suelo utilizando modelos CA-Markov y LCM" se utilizó y comparó dos modelos CA-MARKOV *(Cellular Automata - Markov)* y LCM *(Land Change Modeler)*, mientras que la clasificación utilizada es el método supervisado por Máxima Verosimilitud, este método nos ayuda a identificar cuatro categorías de uso de suelo: cuerpo de agua, bosque, vegetación, terreno baldío con casco urbano. La validación de los resultados de las predicciones y la determinación de la precisión de los modelos, estuvo determinada por el índice de kappa y la matriz de confusión. Los resultados indican que los principales cambios afectarán a la superficie forestal la cual sufrirá descensos en los próximos años y se verá afectada por la urbanización donde tendremos una disminución de la superficie forestal del 70 % del 2000 al 2039 y en paralelo un aumento de alrededor del 37 % de suelo baldío y superficie urbana. Este aumento de usos urbanos se debe al impacto del constante aumento del desarrollo económico y demográfico, y por otro lado, el cuerpo de agua se mantendrá constante con los cambios en la cobertura vegetal. Concluyendo que los resultados indican la necesidad de crear nuevas estrategias en la zona para proteger la sostenibilidad de los usos del suelo en la subcuenca de Lakhdar y proteger la cubierta vegetal y los bosques de la deforestación y la erosión (Ait El Haj et al., 2023).

En el estudio de "Modelado del impacto futuro del uso de la tierra, los patrones de cambio de la cobertura terrestre en las temperaturas de la superficie terrestre más allá de las fronteras del gran Kumasi: acoplando un enfoque de autómata celular (CA) y cadenas de Markov" utilizaron redes neuronales artificiales (ANN) acopladas, cadenas de autómata celular-Markov y regresión múltiple para simular el estado futuro de LULC *(land use/land cover)* y LST *(land surface temperatures)* para los años 2032 y 2042 mientras que para la clasificación de imágenes utilizaron una técnica de aprendizaje automático *Support vector machine (SVM)*. Los resultados mostraron que entre los años 1986 y 2022, la superficie edificada aumentó un 18,63 %; los bosques de alta densidad

disminuyeron un 42,13 %, mientras que los bosques de baja densidad aumentaron un 20,21 %. El modelado futuro para el periodo 1986 y 2042, se espera que la superficie construida aumente un 27 %, los bosques de alta densidad probablemente disminuyan un 45 %, mientras que los bosques de baja densidad probablemente aumenten un 19,10 %. Por el contrario, se espera que las masas de agua y los suelos desnudos disminuyan un 0,61 % y un 0,13 %, respectivamente. Con respecto a los LST muy altos, aumentaron un 8,23 % entre 1986 y 2022. El modelado futuro LST para el periodo 1986 y 2042, se espera que aumenten espacialmente un 16,15 %, así mismo se espera que las LST medias aumenten 7,43 °C (36,03 %) entre 1986 y 2042. Concluyendo que la expansión urbana claramente impulsa el aumento de las LST, y es más probable que esto persista en el futuro (Asori & Adu, 2023).

En el estudio de "Modelado de la proyección del uso/cobertura del suelo utilizando diferentes escenarios en la cuenca del Cisadane, Indonesia: implicaciones en la deforestación y la seguridad alimentaria", aplicó un modelador de cambio de suelo (LCM) bajo la cadena de Markov de percepción multicapa (MLP-MC) para predecir el futuro LULC en tres escenarios. Los escenarios son seguir como de costumbre (BAU), proteger los arrozales (PPF) y proteger las áreas forestales (PFA). Los resultados mostraron que todos los mapas LULC demostraron una precisión excelente, indicada por una precisión general > 83 %. Además, BAU produce el peor efecto al disminuir las áreas de bosques y arrozales. La PPF tiende a causar pérdida de bosques, mientras que se prevé que la PFA reducirá los arrozales. Concluyendo que existe un equilibrio entre mantener la seguridad alimentaria y conservar los recursos naturales (Ambarwulan et al., 2023).

En el estudio de "Modelado de la dinámica de uso y cobertura del suelo utilizando redes neuronales artificiales y algoritmos de cadena de Markov de autómatas celulares en la cuenca de Goang, Etiopía", se utilizó la técnica de clasificación supervisada de Support Vector Machine (SVM) para clasificar las imágenes de satélite, mientras que el módulo Land Change Modeler (LCM) del software TerrSet se utilizó para evaluar la tendencia histórica y la simulación futura de la dinámica LULC. Para predecir futuros cambios en el paisaje, se generaron mapas de potencial de transición utilizando un algoritmo de red neuronal de perceptrón multicapa (MLP). Los resultados del estudio demostraron que la

cuenca de Goang ha experimentado cambios LULC significativos desde 1984. Durante los períodos 1984-2001, 2001-2022 y 1984-2022, las tierras agrícolas mostraron una tendencia creciente dramática, con 7,5 km^2/año, 110,3 km^2/año y 64,3 km^2/año, respectivamente. También se observó una tendencia similar en las zonas urbanizadas, con 0,5 km^2/año, 3,2 km^2/año y 2 km^2/año. La expansión de las tierras de cultivo y las zonas urbanizadas se produjo a expensas de los bosques, matorrales y pastizales. En un escenario de continuidad, la extensión de las tierras agrícolas seguirá aumentando entre 2022 y 2060, mientras que se espera una rápida reducción en el caso de los bosques, matorrales y pastizales. Concluyendo que es alarmante el ritmo de expansión de las tierras de cultivo y de las zonas urbanizadas ejercerán una presión significativa sobre la biodiversidad y los servicios ecosistémicos de la zona, por lo que se deben implementar enfoques de conservación ecológicos lo antes posible para mantener la salud de los ecosistemas y fomentar el desarrollo sostenible (Sisay et al., 2023).

En el estudio de "Modelado de patrones espaciotemporales de cambio de uso y cobertura del suelo en Malawi central utilizando un modelo de red neuronal" desarrollaron una red neuronal de perceptrón multicapa (MLP) para examinar las transiciones de la cobertura terrestre en función de los impulsores; elevación, pendiente, textura del suelo, densidad de población y distancia a carreteras y ríos. Los resultados mostraron una previsión de que la agricultura dominará el paisaje para el año 2050. Dedza tiene una mayor probabilidad de conversión futura de tierras a la agricultura (0,45 a 0,70) que Ntcheu (0,30 a 0,45). Concluyendo, estos hallazgos sugieren que las futuras iniciativas de gestión de la tierra deberían centrarse en los patrones espaciotemporales de la cobertura terrestre y desarrollar políticas multidimensionales que promuevan la conservación de la tierra en el contexto local (Mungai et al., 2022).

2.1.2. A nivel nacional

La investigación doctoral del “Análisis de la cobertura boscosa en el Parque Nacional Tingo María - Perú utilizando algoritmos de inteligencia artificial” tuvo como objetivo analizar la dinámica de la cobertura boscosa del Parque Nacional Tingo María (PNTM) y su zona de amortiguamiento (ZA) ubicados en la selva alta de la región Huánuco, Perú utilizando algoritmos de inteligencia artificial (IA). Para lo cual se utilizó como insumo principal imágenes Sentinel-2 que fueron clasificadas utilizando el algoritmo de IA Random Forest. Como resultado, se elaboró los mapas de cobertura de la zona de estudio que corresponden a los años 2017, 2019 y 2021, con una exactitud temática considerable. Durante el periodo de evaluación, la tasa de cambio de bosque a no bosque dentro del PNTM se incrementó de -0,26 (2017 – 2019) a -1,24 (2019 – 2021) como consecuencia de fenómenos naturales. Mientras que los bosques de la ZA han sufrido una transición dinámica, con tasas de cambio de -2,97 a -4,39 derivados del cambio de uso de las tierras. Las métricas del paisaje sugieren que los bosques del PNTM se encuentran moderadamente fragmentados y los bosques de la ZA se encuentran fuertemente fragmentados, por lo que se concluye que el área natural protegida ha cumplido con el objetivo de mantener la cobertura vegetal (Puerta Tuesta, 2023).

La investigación de maestría titulada “Dinámica de cobertura y uso de tierras para sostenibilidad de tres comunidades Asháninkas, Río Negro”, se realizó en las comunidades nativas de Cushiviani, Shabashipango e Ipokiari, distrito de Río Negro, provincia de Satipo, para determinar los cambios en la cobertura vegetal boscosa y el uso de las tierras en el periodo 1984 - 2015 y, evaluar la influencia de los cambios en la situación actual de sus habitantes para su sostenibilidad. La recolección de datos se realizó mediante imágenes de satélite y cuestionarios de encuestas; se empleó el análisis espacial multitemporal. Los resultados identifican que, las tres comunidades han perdido bosques primarios superiores al 60 % de su superficie inicial, con tasas de deforestación de hasta 10,29 % anual, fuerte fragmentación que reflejan procesos de heterogeneidad de la cobertura vegetal, además, se evidencia el incremento de bosques secundarios, cultivos y suelos desnudos; las tasas de cambio de uso de tierras han sido negativas solo para los bosques primarios y en términos de superficie, un total de 68,66 % de coberturas han cambiado. La situación actual de los habitantes muestra en el aspecto económico condiciones de pobreza, dependencia de la agricultura familiar, parcelación de tierras y

rendimientos deficientes; en el aspecto social, los espacios urbanos se vienen ampliando con servicios básicos deficientes, se evidencia pérdida de las costumbres y tradiciones; en el aspecto ambiental se percibe la reducción de recursos maderables y disminución del caudal de agua en las fuentes naturales (Yupanqui, 2021).

En la investigación de maestría denominada "Análisis de los cambios de cobertura y uso del suelo en el departamento de Tacna, Periodo 2007, 2012 y 2017" se aplicó la fotointerpretación de imágenes satelitales LANDSAT para realizar la clasificación supervisada de los diferentes tipos de coberturas a través del Sistema de Clasificación Corine Land Cover (CLC). Los resultados mostraron 5 categorías de Nivel I, 12 categorías de Nivel II y 31 categorías de Nivel III. En algunas Unidades de Uso fue necesario llegar hasta el nivel IV (17). El análisis de la matriz de transición reveló una tendencia al incremento de superficies dedicadas a las actividades humanas (áreas agrícolas y áreas artificializadas presentando porcentajes de tasa de cambio de 3,10 % y 9,71 %, en un lapso de 10 años, respectivamente. En consecuencia, se observó una disminución de (-0,21 % tasa anual) de superficies de cobertura bosques y áreas mayormente naturales, específicamente áreas con poca vegetación, encontrándose similitudes con trabajos realizados a nivel nacional, donde se ha demostrado la transición de coberturas naturales por el incremento de actividades antropogénicas. Concluyendo que los resultados de la investigación serán útiles para futuros planes de desarrollo ambiental, planes de ordenamiento territorial, y en la planeación de estrategias de conservación de los recursos naturales en el departamento de Tacna (Callo, 2020).

En la investigación de maestría de "Impactos de los cambios de cobertura y uso de la tierra sobre los componentes ambientales en la provincia de San Pablo, entre los años 1996-2016" en la región de Cajamarca, aplicaron el sistema de información geográfico para el proceso de interpretación digital de imágenes satelitales, a la vez que utilizaron la metodología CORINE Land Cover – CLC para la clasificación de la cobertura y uso de la tierra, así mismo para identificar, calcular los impactos y clasificar por grado de severidad de impactos utilizaron la metodología de los Criterios Relevantes Integrados (CRI) de Buroz. Los resultados mostraron que el estudio se realizó en un área de 66549,69 ha, determinándose ocho categorías de clasificación de cobertura y uso de la

tierra, identificado que no hubo cambios en 56754,82 ha (85,28 %) y sí cambio en 9 794,87 ha (14,72 %). En las áreas de cambio se comprobó 45 impactos ambientales, de los cuales 35 son de carácter negativo (77,78 %) en 7162,86 ha afectadas; y 10 impactos son de carácter positivo de grado beneficioso (22,22 %) en 2632,01 ha. En los impactos negativos en la incidencia de afectación a los factores ambientales: Agua superficial, Paisaje, y Cobertura vegetal. Se encontró en primer lugar el Grado moderado de impacto, en 3911,44 ha, con 19 casos presentados (54,29 %), segundo el Grado severo de impacto en 2675,58 ha, con 13 casos (37,14 %), y en tercer lugar el Grado crítico de impacto ambiental en 575,84 ha promedio, con 3 casos (8,57 %). Comprobándose estadísticamente que los cambios de cobertura y uso de la tierra tienen moderado grado de incidencia en la generación de impactos sobre los factores ambientales (Godoy Aquino, 2019).

En la investigación de "Cambio de cobertura y uso de la tierra por actividades antrópicas en el distrito de Chota, periodo 2003-2019" se aplicó el análisis de imágenes satelitales Landsat con el uso de la metodología Corine Land Cover, en un nivel II y III. Los resultados identifican nueve coberturas de la tierra: tejido urbano continuo (TUC), cultivos transitorios (CT), pastos (PA), bosques plantados (BP), herbazal (HER), arbustal (AR), afloramientos rocosos (AFR), tierras desnudas (TD) y lagunas, lagos y ciénagas naturales permanentes (LLCN), donde el área de cambio total fue de 6804,06 ha (25,36 %) y el área que no experimento cambio es de 20022,77 ha (74,64 %). En el mismo periodo, las coberturas de la tierra que aumentaron su área fueron los cultivos transitorios (2934,35 ha), tierras desnudas (298,91 ha), el tejido urbano continuo (196,33 ha) y los bosques plantados (143,34 ha) y las coberturas que disminuyeron su área fueron el herbazal (1853,57 ha), el arbustal (1284,86 ha), los pastos (416,02 ha), los afloramientos rocosos (16,25 ha) y lagunas, lagos y ciénagas naturales permanentes (2,03 ha). Concluyendo que el factor principal de los cambios ocasionados sobre la cobertura y uso de la tierra en el distrito de Chota es el crecimiento poblacional, con una tendencia notoria hacia el incremento de las áreas agrícolas y crecimiento urbano (Deyner, 2020).

2.1.3. A nivel regional y/o local

En la investigación “Análisis y modelación de cambios de cobertura de la tierra en la reserva nacional salinas y aguada blanca - Arequipa, Moquegua” se analiza los cambios de cobertura de la tierra en dos periodos 1991-2006 y 2006-2021, valida el modelo del año 2021 y proyecta el modelo de cobertura de la tierra al año 2050; a partir de imágenes satelitales Landsat 5 y Landsat 8, con metodologías de teledetección y Sistemas de Información Geográfica. Los resultados identifican nueve categorías: bofedal, vegetación natural, pajonal, área agrícola, área artificial, superficie de agua, área sin o poca vegetación, salares y nevados. Del análisis realizado entre los años 1991 al 2021, se muestra un incremento de tasas de cambio anual en la cobertura de artificial con 7,05 % y superficie de agua con 1,81 %; mientras las coberturas que sufrieron disminución son los nevados con 4,60 %, los salares con 0,86 % y pajonales con 0,08 % de tasas de cambio anual. Para la proyección al año 2050 se utilizó el módulo de Land Change Modeler (LCM) que se ejecuta mediante el método de Cadenas de Markov, dando como resultado un 75,11 % de exactitud. La proyección al año 2050 demuestra un incremento en la categoría artificial con una tasa de cambio anual de 1,86 % y un área con poca o sin vegetación con una tasa de cambio anual de 0,36 %; mientras que las coberturas en decrecimiento serán las coberturas de nevados con una tasa de cambio anual de 4,89 %, bofedales con el 1,22 % y pajonales con el 0,48 %. Concluyendo que el crecimiento de las áreas artificializadas afectará a las coberturas vegetales, debiendo implementarse medidas de planificación para actuar de manera preventiva ante impactos negativos que puedan dañar la reserva (Quispetera Chambi, 2023).

En la investigación de “Comunidades vegetales del matorral desértico en las cuencas de los ríos Tambo y Moquegua en el sur de Perú” se realizaron 94 levantamientos fitosociológicos en campo siguiendo la metodología de Braun-Blanquet adaptada por Montesinos-Tubée, se aplicaron los softwares TWINSPAN para clasificar la vegetación y CANOCO para el análisis de DCA con variables ambientales. En la clasificación bioclimática se siguió la metodología de Rivas-Martínez. Los resultados registran 181 especies de plantas divididas en 132 géneros y 48 familias, de las cuales 32 especies son endémicas y 121 son nativas. El análisis y clasificación de la vegetación dan como resultado la descripción de tres asociaciones, cinco subasociaciones nuevas y dos comunidades dentro de la nueva alianza Ambrosio artemisioidis-Weberbauerocerion

torataensis perte- neciente al orden Oreocereo leucotrichi-Neoraimondietalia arequipensis y clase Opuntietea sphaericae. Se halló dos pisos bioclimáticos tropicales: Termotropical y Mesotropical en combinación con cuatro niveles de humedad u ombroclimas: Ultrahiperárido, Hiperárido, Árido y Seco. Concluyendo que la vegetación de los ambientes áridos en la región Moquegua es variada y restringida a las cuencas hidrográficas de los ríos Tambo y Moquegua, alcanzando una mayor diversidad y cobertura gracias a las precipitaciones extraordinarias del ciclo El Niño Oscilación Sur (Chicalla-Ríos, 2021).

En la investigación "Análisis espacio temporal de cambios de uso y cobertura de la tierra en la ciudad de Moquegua y el pueblo de Samegua de 1955 y 2023" se utilizó técnicas de geoprocesamiento y análisis espacial, con información tecnológica de percepción remota diferente en cada año, para 1955 se utilizó aerofotografías y para el 2023 se utilizó imágenes satelitales de Google Earth. Los resultados identifican cinco categorías de uso y cobertura de la tierra identificadas de acuerdo a la metodología Corine Land Cover adaptada por el Ministerio del Ambiente del Perú; para detectar los cambios de uso y cobertura de la tierra fue aplicando la metodología de la matriz de tabulación cruzada, identificando que la categoría que tuvo gran disminución es "Sin/Poca Vegetación" con 3882,59 hectáreas con una tasa de variación de -0,57 % por año, la categoría de "Cuerpo Agua" disminuyo 126,88 % con una tasa de variación de -0,62 %, y la categoría de "Yacimiento Arqueológico" disminuyo 59,88 hectáreas con una tasa de variación -0,35 % por año y la categoría que tuvo gran aumento es "Zona Agrícola" con 2469,72 hectáreas con una tasa de variación de 1,93 % por año, seguida por la categoría "Superficie Artificial" que aumento 1835,12 hectáreas con la tasa de variación más alta de 30,53 % por año. Concluyendo que el crecimiento de las áreas artificializadas afectará a las coberturas vegetales, debiendo implementarse medidas de planificación para actuar de manera preventiva ante impactos negativos que puedan dañar la reserva (Cuentas Toledo, 2019).

En el estudio "Análise Espaço Temporal da Bacia Hidrográfica do Alto do Río Moquegua no Perú" se analizó la dinámica espacio-temporal de la cuenca hidrográfica mencionada mediante el modelado topográfico e hidrométrico y la dinámica de uso y cobertura de la tierra se identifica que no se respetan las normas de conservación de las

áreas de la franja marginal del río. El no cumplimiento de dichas normas por parte de los habitantes proporcionó una tasa de variación anual del 29,38 % en la ocupación urbana, el 0,78 % en la agricultura, y el 1,73 % (171,99 ha) en la ocupación relativa a los centros de minería (Cuentas Toledo, 2017).

En el estudio de composición florística de la cuenca del río Ilo-Moquegua y Lomas de Ilo, se identifica que la flora vascular de la cuenca del río Ilo-Moquegua y las Lomas de Ilo está integrada por 63 familias, 233 géneros y 394 especies. Las formas biológicas dominantes son las hierbas (72 %), seguidas por los arbustos (21 %), plantas que pueden ser hierbas o arbustos (5 %), árboles (2 %) y plantas parásitas (menos del 1 %). De las 55 especies endémicas del Perú reportadas en el presente estudio, 10 están restringidas al departamento de Moquegua. Se presenta un total de 176 nuevas adiciones a la flora del departamento (Arakaki & Cano, 2003).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Cuenca Hidrográfica

La cuenca hidrográfica es una unidad natural controladora de los procesos de circulación cerrada del agua (ciclo hidrológico) para su aprovechamiento sostenible e implementación de políticas de gestión de los recursos hídricos, recursos naturales y servicios ecosistémicos, considerando las intensas actividades humanas que se desarrollan (Pouleurs, 2021; Silva et al., 2022).

La cuenca hidrográfica es el territorio delimitado naturalmente por él o parteaguas (línea imaginaria que une puntos de mayor altitud del relieve terrestre dividiendo la escorrentía superficial en direcciones opuestas) concentrando los flujos de escorrentía hacia un único punto de salida de la cuenca, desembocando en otro río mayor, lago o mar. Por lo tanto, la cuenca hidrográfica delimitada está estructurada por un número determinado de subcuencas que contribuyen a formar un solo curso de agua principal de la cuenca (Saavedra et al., 2023; Garay, D., & Agüero, 2018; Cruz, 2019).

La delimitación de la cuenca hidrográfica se logra aplicando netamente criterios topográficos e hidrográficos sobre las geoformas que existen en el ámbito de estudio (Garay, D., & Agüero, 2018), concretamente se identifica y delimita la geomorfología del terreno sobre la información topográfica altimétrica, resaltando que la precisión de la delimitación de la cuenca hidrográfica depende de la precisión de la información topográfica primaria utilizada es decir, para la información analógica (plano topográfico) depende de la escala, intervalos de curvas de nivel y precisión geodésica horizontal como vertical; mientras que para la información digital (modelos digitales del terreno) depende de la resolución espacial del pixel como de la precisión geodésica horizontal y vertical (Cruz, 2019).

Por lo tanto, para delimitar una cuenca se requiere información topográfica, siendo necesario un mapa a curvas de nivel para la delimitación manual (Villón, 2002) o productos satelitales derivados de la teledetección como los modelos digitales del terreno como ASTER o ALOS PALSAR para la delimitación por métodos de geoprocesamiento de sistemas de información geográfica (Ochoa-Tocachi et al., 2022). La tecnología de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite gestionar datos espaciales de manera eficiente, ya que facilita su captura, almacenamiento, procesamiento, análisis y representación visual (Singh & Fiorentino, 1996).

El conocimiento de ámbito de estudio de una cuenca hidrográfica inicia desde la demarcación de sus límites para conocer la superficie que ocupa y su localización, lo que nos permitirá tener una eficiente gestión del medio ambiente, con énfasis a los recursos hídricos como es mejorar la disponibilidad de agua a partir de fuentes superficiales, siendo importante para su otorgamiento o negación de los derechos de agua (Rentería-Guevara et al., 2019).

La cuenca hidrográfica es considerada como un ecosistema estratégico regional para el análisis territorial de dentro del grupo de espacios geográficos singulares como su geomorfología y suelos (SUBDERE, 2013), donde se identifica primeramente las coberturas de agua que están sometidas a dinámicas de la variabilidad climática y antrópica, reconociendo que antes que interactúe las actividades humanas en los sistemas natrales, los sistemas hidrográficos se encuentran generalmente en condiciones próximas al estado de equilibrio. Por lo que las actividades antrópicas deben desarrollarse de

manera racional, para conservar el ambiente y los recursos naturales de las cuencas hidrográficas, primordialmente las del medio rural (Braz et al., 2020).

2.2.2. Características topográficas y morfométricas de la cuenca hidrográfica

Según Monsalve Sáenz (1999), las características topográficas y morfométricas dependen de la morfología (forma, relieve, red de drenaje, entre otras morfologías), los tipos de suelos, la capa vegetal, geología, las prácticas agrícolas, entre otras características. Estos elementos físicos proporcionan la más conveniente posibilidad de conocer la variación en el espacio de los elementos del régimen hidrológico y la delimitación de la cuenca hidrográfica.

La morfometría aplicada al estudio de cuencas hidrográficas permite medir y analizar matemáticamente la configuración de las formas y dimensiones de sus accidentes geográficos e hidrográficos principalmente, proporcionando conclusiones importantes para determinar la dinámica del sistema de la red de drenaje, capacidad de erosión, susceptibilidad a inundaciones y posibles interacciones genéticas con las fallas tectónicas (Charizopoulos et al., 2019).

Trevisan et al. (2021), indican que las estrategias sobre el manejo de cuencas hidrográficas dependerán del conocimiento adecuado de los parámetros morfométricos de la cuenca hidrográfica, lo que permitirá analizar la dinámica ambiental y territorial en su área de estudio. Silva et al. (2022), clasifica los parámetros morfométricos de la cuenca hidrográfica en: físicos (área, perímetro, longitud del eje, coeficiente de compacidad, factor de forma, relación de elongación y relación de circularidad), parámetros hidrológicos (longitud del río principal, longitud y distribución de la red de drenaje, densidad de drenaje, densidad hidrográfica, constante de mantenimiento del canal, relación de textura, sinuosidad, tiempo de concentración y extensión del curso superficial) y relieve (mapa de pendiente y altitud).

2.2.3. Uso y cobertura de la tierra

La tierra alude a las características físicas de la superficie terrestre, mientras que el uso de la tierra se refiere a las modificaciones humanas en la cobertura de la tierra (Koko et al., 2022).

La FAO (2016) menciona que "La cobertura de la tierra es el estado biofísico de la superficie terrestre y la subsuperficie inmediata" como en tierras de cultivo, montañas, bosque, agua, o área construida; "El uso de la tierra implica tanto la manera en que se manipulan los atributos biofísicos de la tierra como la intención subyacente a esa manipulación y el propósito para el cual se utiliza la tierra" como por ejemplo, pecuaria, recreación, conservación y área residencial.

2.2.4. Cambio en el uso de la tierra y cambio en la cobertura de la tierra

El cambio de uso y cobertura de la tierra de una región se debe a la influencia de factores naturales y socioeconómicos y su utilización por parte del hombre en el tiempo y el espacio (Ocloo et al., 2024; Jing et al., 2024). En un nivel muy elemental, el uso de la tierra y el cambio en la cobertura de la tierra significan cambios (cuantitativos) en la extensión superficial (aumentos o disminuciones) de un tipo determinado de uso de la tierra o cobertura de la tierra, respectivamente. Es importante señalar que, incluso a este nivel, la detección y medición del cambio depende de la escala espacial; Cuanto mayor sea el nivel espacial de detalle, mayores serán los cambios en la extensión del área de uso de la tierra y cobertura del suelo que puedan ser detectados y registrados (Sandoval & Real, 2005).

2.2.5. Sistemas de clasificación de uso y cobertura de la tierra

La clasificación del uso de la tierra y la cobertura de la tierra iniciaron desde 1950 con procesos manuales y estos procesos fueron evolucionando al pasar el tiempo, en los cuales se utilizan datos de sensores remotos, con diferentes metodologías y técnicas, hasta que en la actualidad se utiliza procesos numéricos digitales y aplicando algoritmos de inteligencia artificial, en cuyos procesos se asigna clases de uso y cobertura terrestre a los píxeles y categorizarlos, por ejemplo urbano, pastizal, agricultura, agua entre otros que existan en la zona de estudio (Anderson et al., 1976; Alshari & Gawali, 2022).

En síntesis, podemos indicar que los sistemas de clasificación de uso y cobertura de la tierra, dependen de los métodos de clasificación a utilizar y la técnica de clasificación para extraer datos precisos del uso que se les da a las coberturas terrestres detectadas a partir de imágenes de teledetección (Alshari & Gawali, 2021). Los métodos básicos de estas clasificaciones son la clasificación basada en píxeles (Chen et al., 2018) y la clasificación basada en objetos (Hurskainen et al., 2019).

Para determinar las clases de uso y cobertura de la tierra de una zona en estudio, está en función de la actividad y ocupación que se desarrolla en la zona, existiendo diversos métodos y sistemas de clasificación, pero las que más se desarrollaron e implementaron en Latinoamérica son las metodologías: Corine Land Cover de la Unión Europea y Land Cover Clasification System (LCCS) de la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO) de las Naciones Unidas (Posada & Salvatierra, 2017).

El sistema de clasificación en nuestro país es Corine Land Cover como metodología para los procedimientos técnicos y metodológicos para la elaboración de estudios especializados en los "Análisis de los cambios de la cobertura y uso de la Tierra", que fue aprobado por el Ministerio del Ambiente para (RM N° 081-2016-MINAM, 2016).

2.2.6. Cartografía de uso y cobertura de la tierra

La cartografía es una disciplina ocupada del arte, la ciencia y la tecnología de crear y utilizar mapas, permitiendo representar elementos o características de la realidad geográfica (Rystedt et al., 2003), de hechos y fenómenos geográficos que acontecieron en un tiempo, relacionando su ubicación espacial y brindándonos información de forma, tamaño entre otras características de una área en estudio, como soporte para la clasificación, planificación y ordenación del territorio (Gomarasca, 2013). La representación cartográfica de una porción de la superficie terrestre o área de estudio en cartografía es conocido como el AOI del inglés *area of interest* (Fallas, 2003), mostrando rasgos y particularidades geográficas de la realidad en el mapa a escala reducida.

La escala reducida nos permite visualizar el objeto mínimo identificable de interés a un nivel de detalle constante, por lo que se debe determinar la unidad mínima cartografiable antes de crear un mapa. La unidad mínima cartografiable es definida como el área mayor a 4mm^2 del objeto a ser representado en el mapa (Lencinas & Siebert, 2009; Marquina & Mogollón R., 2023). Según el Reglamento de ejecución de levantamiento de suelos determina 0,5 cm^2 como tamaño mínimo de la unidad del mapa para todos los niveles de levantamiento de suelos en el Perú, por ejemplo, para el nivel de reconocimiento que corresponde al cuarto orden donde la escala de trabajo es a escala 1/100000 la unidad mínima cartografiable es 50 hectáreas (El Peruano, 2010).

Según Lambert & Zanin (2020) la representación cartográfica de los mapas se clasifican en dos grandes categorías: los **mapas topográficos** donde se representa lo que se observa directamente en una porción de la superficie terrestre en un momento dado como el relieve, cursos de agua, carreteras, asentamientos humanos entre otros y los **mapas temáticos** donde se representa fenómenos geográficos cuantitativos o cualitativos particulares localizables de la porción de superficie terrestre definida.

El mapa de uso y cobertura de la tierra es un mapa temático que nos permite identificar, localizar, caracterizar y cuantificar la distribución de sus clases o categorías, permitiendo responder a preguntas sobre el proceso de ocupación, estado del uso y cobertura de la tierra durante un periodo de tiempo (INEGI, 2015). Con la representación de la cartografía temática en mención podremos responder preguntas como: ¿cuál es el estado actual del uso y cobertura de la tierra?, ¿cuál fue el estado del uso y cobertura de la tierra hace 30 años?, ¿cómo está siendo afectado el cambio del uso y cobertura de la tierra por las diferentes actividades humanas?, ¿dónde se localizan los cambios de uso y cobertura?, ¿cuáles son las clases o categorías de uso y cobertura?, entre otras preguntas que nos permite conocer el espacio geográfico del área de estudio respecto a la unidad mínima cartografiable.

La cartografía digital y temática se concibe como el aporte de un proceso investigador, donde se almacena datos espaciales con la finalidad de manipular, consultar y representar la información geográfica, lo que llevó al nacimiento y especialización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) aplicados a los estudios de las ciencias del sistema terrestre, donde las funciones básicas son almacenar, visualizar, consultar y

analizar datos espaciales; permitiendo resolver problemas de toma de decisión en estudios de impacto ambiental, planificación urbana, ordenamiento territorial entre otros estudios de análisis espacial e incluso las aplicaciones de modelización con la integración de modelos matemáticos (Alonso-Sarría, 2013; Chang, 2019).

La generación de la cartografía digital aplicando las tecnologías de geoprocesamiento de la teledetección son rentables y útiles para extraer información terrestre, mapear los recursos del paisaje y analizar los cambios espaciales y dinámica del uso y cobertura terrestre de una región con respecto a los métodos topográficos tradicionales (Koranteng et al., 2021; Liang & Wang, 2020). Los métodos tradicionales seguirán siendo importantes en los procedimientos de verificación en el terreno para poder validar y calibrar los datos resultantes de teledetección, por lo que la aplicación de las tecnologías de la teledetección en el análisis espacial de series temporales brindan una excelente oportunidad para mapear y estimar las superficies de uso y cobertura de la tierra en áreas extensas (Congalton & Green, 2019; Faruque et al., 2022).

2.2.7. Evaluación de cambios en el uso y cobertura de la tierra

De acuerdo con Briassoulis (2020), la evaluación de los cambios en el uso y cobertura de la tierra, conllevan atribuir diferentes epistemologías, para comprender ¿Qué cambio?, ¿Por qué cambio?, entre otras preguntas, por lo que es fundamental y necesario conceptualizar el significado del cambio para detectarlo en situaciones del mundo real, permitiendo describir la estructura de los cambios en los usos de la tierra de una categoría a otra para explicar la ocurrencia de estos cambios a partir de sus causas. En un nivel muy elemental, el cambio del uso y cobertura de la tierra es el objeto directo de la investigación teórica, distinguiéndose seis fuentes de variación interrelacionadas que son:

1) Propósito de la investigación teórica.
2) Enfoque de la teorización a investigar.
3) Niveles de categorías espacial y escala espacial.
4) Categorías o clases de uso y cobertura para el análisis de cambios.
5) Tipos de determinantes que influencian el cambio de uso de la tierra

6) La dimensión temporal.

Cuantificar los cambios de uso y cobertura de la tierra en cualquier espacio geográfico permitirán a las autoridades locales, regionales y nacionales e instituciones internacionales abordar e interactuar en sus agendas sobre diversos temas sociales, económicos, biológicos, físicos entre otros (Camacho-Sanabria et al., 2017; Ellis & Ramankutty, 2008) para afrontar exitosamente los temas de seguridad alimentaria, cambio climático y pérdida de biodiversidad que dependen de los estudios de cambio de uso y cobertura de la tierra (Winkler et al., 2021).

Las evaluaciones sobre los cambios de uso y cobertura de la tierra a nivel global durante los 20 años iniciales del siglo XXI, realizados por Potapov et al. (2022), muestran la reducción de cobertura arbórea y tierras de cultivo, mientras que respecto al agua superficial en climas secos se identifica el agotamiento de lagos. Por otro lado, las coberturas de nieve y hielo perenne están disminuyendo de forma drástica. Motivando el interés y aumento de investigaciones sobre el cambio de uso y cobertura de la tierra.

Las evaluaciones del cambio de uso y cobertura de la tierra en un espacio de estudio nos permite comprender que el crecimiento y disminución de algunos usos y coberturas de la tierra que se dan dos o más instancias de tiempo, identificando ciertos indicadores como tasas de cambio, cuantificación de áreas y direcciones del crecimiento significativo y/o la perdida de una clasificación de uso y cobertura de la tierra (Pradhan et al., 2017); una de las metodologías básicas e iniciales para obtener estos indicadores y la detección de cambios categóricos importantes en el uso y cobertura de la tierra es la matriz de tabulación cruzada, metodología propuesta por Pontius et al., (2004).

Los métodos de detección de cambio de uso y cobertura de la tierra así como la evaluación de la precisión, cada vez están siendo más precisos por el trabajo a diferentes escalas y a los avances tecnológicos en la teledetección y herramientas de los sistemas de información geográfica, que contribuyen con grandes beneficios a la comunidad científica, facilitando el monitoreo espacio temporal de cambios en el uso y cobertura de la tierra del pasado al presente (Chughtai et al., 2021).

2.2.8. La urbanización y los cambios de uso y cobertura de la tierra

El crecimiento de las ciudades es un proceso global que está influenciado por el aumento de la población en el mundo, que crecen desmesuradamente en todas las direcciones de norte a sur y de este a oeste, está naturalizado a una cultura de beneficio económico importante para la transformación social, política y económica de las ciudades, comprometiendo la sostenibilidad del medio ambiente (ONU-Hábitat, 2016; Jordán et al., 2017).

La tendencia del rápido incremento de urbanización global fue ralentizada temporalmente por la pandemia del COVID-19, debido a que ocurrió migración de corto plazo de las ciudades hacia las zonas rurales o poblaciones pequeñas, las ciudades siempre continuarán creciendo y los principales focos de oportunidad para las personas que buscan las mejores oportunidades laborales, educación y capacitación; actualmente los estudios indican que la población mundial continua creciendo a un promedio de 2,2 billones de personas para el 2050 (UN-Hábitat, 2022); mientras que en las ciudades del Perú la expansión urbana fue del 50 % en las dos últimas décadas (Rivarola et al., 2020).

La urbanización inclusiva y sostenible junto a las capacidades para planificar y gestionar los asentamientos humanos con características participativas, integradas y sostenibles en todos los países tendrán una mejora para el 2030, considerado como la meta número 3; todo ello con respecto al objetivo 11 sobre las ciudades y comunidades sostenibles de los objetivos del desarrollo sostenible (ODS) los que se encuentran integrados en la agenda 2030 de la ONU (Rienow et al., 2022).

Los estudios del proceso de urbanización es uno de los factores principales para proyectar el desarrollo del crecimiento urbano y comprender los procesos de cambio de uso y cobertura de la tierra para optimizar su uso y promover una expansión urbana sostenible (Zheng et al., 2022; Terfa et al., 2019). La expansión urbana no planificada e inesperada causa desorden provocando cambios negativos y deficientes, dando como resultado una infraestructura y una provisión de instalaciones deficientes (Pradhan et al., 2017), afectando a la calidad de vida de sus habitantes como a los servicios básicos de transporte, saneamiento, habilitaciones urbanas entre otros sobre planificación urbana (Fernández-Maldonado, 2019).

La expansión urbana es evaluada por diversas técnicas con la finalidad de realizar un análisis cuantitativo espacial de áreas edificadas en dos periodos de tiempo, aplicando matrices espaciales para la disponibilidad de datos y obtener la tasa anual de expansión urbana, índice de intensidad de expansión urbana, índice de diferenciación de expansión urbana entre otras métricas del paisaje (Alam et al., 2023; Xu & Min, 2013; Bhatta et al., 2012). Actualmente, la tecnología de la teledetección es utilizada también para la observación a gran escala y adquirir datos desde imágenes satelitales para la obtención de información actualizada sobre expansión urbana (Zheng et al., 2022), dentro del procesamiento digital de imágenes satelitales de mayor uso son las imágenes Landsat, por su disponibilidad temporal desde 1972 con Landsat 1 de 1972, calidad que se fue mejorando hasta el actual uso de imágenes por satélite Landsat 9 (Con et al., 2022; Watson et al., 2022; Do et al., 2022).

Las tecnologías de la teledetección integradas con las técnicas de SIG se han convertido en herramientas importantes en la evaluación del logro de los indicadores del objetivo 11 del desarrollo sostenible (ODS) establecidos por los estados, miembros de las Naciones Unidas (ONU), para garantizar que todos los países tengan asentamientos humanos y ciudades seguras, inclusivas, resilientes y sostenibles, considerando que el cumplimiento de la meta del ODS 11 es fundamental para la consecución de las metas de los demás ODS (Asuquo Enoh et al., 2022). Los principales probables factores determinantes clave del cambio en el uso de la tierra en sus diferentes escalas espaciales y temporales son los escenarios de cambio climático (Hussain et al., 2022; Majeed, M.; Tariq et al., 2021; Näschen et al., 2019), socioeconómicos (Ondiek et al., 2020) la disponibilidad de agua (Junk, 2013), las políticas agrarias referente a la expansión agrícola (Foley et al., 2011; Barbosa et al., 2023), las industrias extractivas como la minera (Bebbington et al., 2008; Rivera, 2020) y la rápida urbanización (Seto et al., 2012; Hao et al., 2023; K. Shi et al., 2023).

2.2.9. Modelamiento de cambios en el uso y cobertura de la tierra

El modelamiento de cambio de uso y cobertura de la tierra es una herramienta importante para comprender las tendencias espaciales y temporales con la finalidad de proteger los recursos terrestres de manera sostenible (Girma et al., 2022). La

identificación de cambios en el uso y cobertura de la tierra en el presente con respecto al pasado y la predicción a futuro, se ha convertido en preocupación para los ambientalistas, funcionarios de conservación de recursos y planificadores del uso de la tierra, dándoles un reto para mitigar los impactos negativos en los diferentes ecosistemas y generar nuevos planes de sostenibilidad ambiental a largo plazo (Kafy et al., 2021).

Los cambios del uso de la tierra y la cobertura de la tierra están generados por una variedad de diferentes factores, mecanismos y fenómenos que crean diferenciación espacial, segregación y discontinuidades (Koomen et al., 2007), existiendo una relación directa entre la organización de una sociedad y la configuración de su espacio, por lo que el modelamiento de fenómenos y procesos espaciales requieren de la combinación de conocimientos y habilidades de otros campos provenientes de la informática, estadística, matemática entre otros, implementándose diversos modelos espaciales (Sanders, 2007), el término "modelo" puede entenderse como una representación abstracta y simplificada de ciertos aspectos seleccionados de la realidad que se consideran importantes para comprender y explicar un problema de dominio de aplicación particular (Acevedo-Díaz et al., 2017; J. Gao, 2022).

Según Gao (2022) los modelos espaciales son un subconjunto de modelos que se ocupan de las relaciones espaciales y las dependencias entre las variables espaciales inherentes, clasificando los principales tipos de modelos espaciales respecto a cuatro criterios:

1. **Primer criterio: En términos de implementación de las reglas de decisión, pueden ser estadísticos o matemáticos.** Los modelos estadísticos contienen muchos componentes estadísticos y se pueden dividir en dos tipos: modelos de probabilidad (tienen al menos un proceso aleatorio representado por una o más variables aleatorias y la salida también es aleatoria) y modelos deterministas (no contiene variables aleatorias y las salidas son únicas para un conjunto dado de entradas). Los modelos matemáticos capturan la realidad dentro del marco de un aparato matemático para explorar mejor sus propiedades de la vida real, donde la variable de interés es la función matemática de sus factores de influencia, ya sean modelos lineales (representado por un modelo de regresión geográfica construido sobre la variable dependiente de todas las variables explicativas en la base de datos, modelo lineal se

representa como la suma aritmética de todas las variables candidatas) o modelos no lineales (Pueden tomar la forma de funciones exponenciales o logarítmicas entre las variables dependientes y explicativas (independientes) que son ampliamente utilizados en la vida real).

2. **Segundo criterio: En términos de la funcionalidad del modelado, pueden ser descriptivos o predictivos.** Los modelos descriptivos se ocupan principalmente de describir y posiblemente explicar los patrones espaciales resultantes del análisis espacial. Los modelos predictivos tienen como objetivo predecir el resultado futuro de una variable o fenómeno espacial. Los modelos predictivos son más poderosos que los modelos descriptivos. Esto se debe a que no solo explica lo que ya se ha observado, sino que también hace predicciones sobre distribuciones y patrones futuros.
3. **Tercer criterio: En términos de la naturaleza del espacio de modelado, pueden ser heterogéneos u homogéneos.** Los modelos heterogéneos ignoran la variación espacial, lo que lleva a un espacio homogéneo, o en la escala de modelado, el espacio se trata como internamente homogéneo. A diferencia de los modelos homogéneos, el espacio de los modelos heterogéneos puede ser gradientes continuos o parches del entorno.
4. **Cuarto criterio: En términos de la naturaleza del tiempo de modelado, pueden ser discretos y continuos.** En los modelos discretos, el espacio no es continuo y comprende cuadrículas o celdas discretas que no se superponen. Los modelos discretos se implementan en el entorno ráster, en el que el espacio se puede incrementar en una celda a la vez. En los modelos continuos, tanto el espacio como el tiempo se consideran un continuo.

De acuerdo con Lambin (1994), la estructura general de los modelos de procesos del paisaje se clasifican en tres tipos: *a) Los modelos empíricos* porque están limitados al estudio relacional entre las variables reales que interactúan en el estudio para explicar el cambio de uso, basándose en el supuesto de que las relaciones observadas entre las variables se proyectarán en el escenario futuro, es decir, la estacionariedad del proceso; *b) Los modelos mecanicistas* porque se fundamentan en la creencia de conocer los

procedimientos en los que funciona un sistema, donde los procesos individuales se modelan aplicando leyes o fundamentos científicos descritas por ecuaciones simples, a partir de datos y la idoneidad de las ecuaciones deben ser verificables mediante observaciones y *c) Los modelos de sistemas* porque son descripciones matemáticas de varios procedimientos complejos que interactúan entre los componentes de un ecosistema.

Revisando artículos, tesis y textos especializados sobre modelamiento espacial, encontramos diferentes enfoques de categorizar los modelos espaciales, pero una de las diferencias más importantes con respecto al estado de la variable dependiente, un modelo, puede ser estático o dinámico (Gao, 2022). Un modelo estático (o transversal) calcula directamente la situación en un momento dado y no puede mostrar procesos espaciales debido a la ausencia de la componente temporal, mientras que un modelo dinámico opera en pasos de tiempo intermedios, teniendo un componente de tiempo explícito, cada uno de los cuales puede ser un punto de partida para el cálculo de situaciones posteriores. Por lo tanto, el modelado dinámico espacial tiene en cuenta las posibles evoluciones durante el período de simulación, ofreciendo un comportamiento más histórico y la posibilidad de imitar mejor las evoluciones espaciales reales (Koomen et al., 2007).

El modelamiento dinámico espacial se implementa comúnmente como simulación espaciotemporal, es un tipo especial de modelado predictivo donde el tiempo está incluido explícitamente en el proceso de modelado y los resultados modelados dependen del tiempo, identificándose que por lo menos una de las variables independientes debe cambiar con el tiempo. Esto se puede expresar matemáticamente en términos de reglas de transición que determinan cómo cambia el estado de una celda. Estas funciones se pueden lograr en dos entornos, autómatas celulares (CA) y modelado basado en agentes (ABM), o mediante una combinación de ambos utilizando algoritmos avanzados de aprendizaje automático (Gao, 2022). El modelamiento y simulación de datos de cambios espacio temporales como los de uso y cobertura de la tierra son complejos, por lo que amerita aplicar e integrar procedimientos metodológicos de teledetección, sistemas de información geográfica y modelado de sistemas complejos (Kafy et al., 2021), proponiéndose diferentes modelos dinámicos donde el espacio-tiempo y su estado son discretos como Cellular Autómata (CA) (L. Xu et al., 2022).

El método del autómata celular (CA) es ampliamente utilizado en el modelado de uso y cobertura de la tierra, siendo una de las herramientas más efectivas para modelar el comportamiento dinámico de sistemas complejos, son ampliamente utilizados en los mecanismos complejos del desarrollo urbano y se han convertido en una herramienta importante para la planificación y gestión del uso del suelo. Los autómatas celulares consisten principalmente en celdas, espacio de celdas, reglas de transformación y configuración de vecindad. Las reglas de transformación se definen para determinar la función dinámica del estado de la celda en el momento siguiente de acuerdo con el estado actual de la celda y su entorno, que es una parte importante de los autómatas celulares, aplicándose diversos métodos para calibrar las reglas de transformación, como modelo de cadena de Markov de autómatas celulares (CA-MC), Modelo CA basado en Random Forest (RF-CA), cadena de Markov de perceptrón multicapa (MLP-MC), regresión logística (logistic-CA), evaluación multicriterio (MCE-CA), máquina de vectores de soporte (SVM-CA), red neuronal artificial (ANN-CA) y Multi Layer Perceptron Neural Network (MLPNN) (Tiné et al., 2020; Guo et al., 2020; X. Zhang et al., 2020; Girma et al., 2022; L. Xu et al., 2022).

El modelo de cadena de Markov (MC) analiza una imagen de zonificación del uso de la tierra proporcionando resultados en forma de una posible matriz de cambios, como también una imagen de resultados de una posible matriz de cambios para el último año. Una matriz de cambio posible indica la probabilidad de que cada clase de uso o cobertura de la tierra cambie a otro uso o cobertura de la tierra en el futuro. También se reconoce como un método bidimensional útil para representar la dinámica espacio-temporal y espacial del lugar, considerado como un modelo fácil de usar para predicciones futuras, mediante la identificación de dinámicas de sistemas complejos (Jafarpour Ghalehteimouri et al., 2022). El modelo MC es utilizado para proyecciones a corto plazo, porque ofrece la magnitud correcta, pero para modelos a largo plazo no ofrece la dirección correcta del cambio, por lo que esa deficiencia se logra mitigar con un nuevo modelo combinando (CA-MC) entre el modelo Autómata Celular y el modelo de Cadenas de Markov (S. W. Wang et al., 2021).

El modelo integrado CA-MC es una técnica de modelado más eficaz y efectiva para la predicción y simulación de cambios futuros de uso y cobertura de la tierra, donde

el modelo de la Cadena de Markov calcula el cambio futuro basado en el pasado, y el modelo Autómata Celular detecta las ubicaciones espaciales de los cambios (Kesaulija et al., 2021). Es comúnmente utilizado para conocer la planificación y gestión del crecimiento urbano en diferentes países, identificando la conversión de coberturas en periodos de tiempo como lo realizado por Rimal et al. (2023), Mohamed y Worku (2020), Koko et al. (2022) entre otros.

El modelo de red neuronal artificial del inglés *Artificial Neural Network (ANN)* es uno de los modelos más potentes basados en inteligencia artificial, definiéndose simplemente como nodos o neuronas controlados en múltiples capas, donde la disposición de las neuronas en capas y los patrones de conexión en esas capas se denomina arquitectura. ANN puede capturar relaciones no lineales entre factores y manejar modelos complejos como el crecimiento urbano y los cambios en el uso de la tierra de manera muy efectiva, teniendo la provisión de no linealidad y capacidad para manejar datos faltantes o desordenados, permitiendo mejorar la capacidad del modelo CA-MC al integrarlo con el modelo ANN (Gharaibeh et al., 2020). Aunque se han desarrollado muchas redes neuronales, el Multi Layer Perceptron Neural Network (MLPNN) se usa ampliamente en varias aplicaciones para la detección de cambios de uso y cobertura de la tierra (Saha et al., 2022).

Los modelos de predicción de cambio de uso y cobertura de la tierra en la actualidad y con perspectivas futuras usan la tecnología de la geomática o geoinformática (Padmaja & Giridhar, 2022; Gillins et al., 2022), los mismos que están integrados en sistemas de información geográfica y algunos están disponibles como una aplicación o software independiente, con la finalidad de lograr mejores prácticas de gestión de la tierra, que ayudará a lograr el Objetivo de Desarrollo Sostenible-15. Los softwares, bibliotecas y complementos para el modelado y predicciones de cambio de uso y cobertura de la tierra disponibles en la actualidad son diversos como CLUE-S, DYNAMIC EGO, Land Change Modeler (LCM), SLEUTH, Netlogo, StarLogo, LanduseSim, MOLUSCE, FUTURES y algunas librerías como LULCC, SIMCOL y SIMLANDER en R y Janus en Python (Gaur & Singh, 2023), describimos a continuación 04 softwares más utilizados en la predicción de cambio de uso y cobertura de la tierra:

a) **CLUE-S** del inglés *Conversion of Land Use and its Effects*, uno de los modelos más utilizados a nivel mundial en sus diferentes versiones desde 1996, que incluyen simulación de degradación de la tierra, deforestación, urbanización y evaluación integrada del cambo de cobertura de la tierra (Veldkamp & Fresco, 1996)(Verburg, 2010) (Kiziridis et al., 2023), CLUE está disponible gratuitamente desde el sitio web https://www.environmentalgeography.nl/site/data-models/data/clue-model/ (consultado el 01 de mayo del 2023).

b) **DYNAMIC EGO** es una plataforma de aplicaciones de geomodelado ambiental, ampliamente utilizado en sus diferentes versiones desde 1998, para modelar y predecir emisiones de carbono, deforestación, crecimiento urbano, cambio climático y regímenes de incendios (Ferreira et al., 2019), DYNAMIC EGO está disponible gratuitamente desde el sitio web https://csr.ufmg.br/dinamica/ (consultado el 01 de mayo del 2023).

c) **Land Change Modeler (LCM)** es un modelador de cambio de la tierra, simplificando las complejidades del análisis de cambios en la cobertura de la tierra y modelar con variables explicativas para la simulación de escenarios futuros, modela la reducción de emisiones de deforestación y degradación forestal (REDD) y estrategias al cambio climático (Eastman, 2016) (Eastman & He, 2020), su sistema innovador está integrado en el software TerrSet (IDRISI) siendo compatible con ArcGIS desde la versión 10,2. TerrSet ofrece una variedad de métodos de entrenamiento de modelos, que incluyen redes neuronales artificiales (ANN), regresión logística, peso de la evidencia (WoF) y evaluación de criterios múltiples (MCE) (Asori & Adu, 2023). TerrSet está disponible desde el sitio web https://clarklabs.org/terrset/ (consultado el 01 de mayo del 2023)

d) **SLEUTH** es un modelo de autómata celular modificado con dos componentes principales son el modelo de crecimiento urbano de Clarke (UGM) y el modelo de cobertura terrestre Deltatron; SLEUTH está disponible desde el sitio web http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig/Dnload/download.htm (consultado el 01 de mayo del 2023).

En la presente investigación se utiliza TerrSet tanto para la evaluación y modelamiento de cambios del uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, aplicando métodos modernos de modelamiento para el pronóstico de escenarios futuros como el Multi Layer Perceptron Neural Network (MLPNN), que es uno de los métodos de redes neurales más precisos en el estudio de las dinámicas espacio temporales de uso y cobertura de la tierra.

2.3. Definición de términos

2.3.1. Modelado.

Según la Real Académica Española (RAE), la palabra **modelado** es "acción y efecto de modelar", teniendo como sinónimo la palabra **modelación**.

Cabe resaltar que la palabra **modelamiento** no está en el diccionario de la RAE, por lo que evitamos de utilizar palabras que se consideran tecnicismos o neologismos.

2.3.2. Predicción.

Según la Real Académica Española (RAE), predicción es "acción y efecto de predecir".

2.3.3. Espaciotemporal.

Según la Real Académica Española (RAE), la palabra espaciotemporal es un adjetivo "Perteneciente o relativo al espacio y al tiempo".

2.3.4. DEM.

El término DEM es la abreviatura del inglés d*igital elevation model*, que traducido al español es modelo digital de elevación. El DEM es un conjunto de información digital en formato ráster que representa las altitudes del terreno para ubicaciones en la superficie, con intervalos horizontales uniformemente espaciados (Soza & Falaschi, 2020). Un DEM representa los niveles más altos de la superficie, donde se incluyen las coberturas de

vegetación y áreas construidas como casas y edificios; entonces, no se representa la superficie real terrestre; pero de ser necesario se modifica el DEM, eliminando las alturas de áreas construidas y vegetación para obtener un modelo terrestre desnudo, al que se denomina modelo de terreno digital conocido como DTM del inglés *digital terrain model* o DSM de *digital surface model*, por lo general en aras de simplicidad se utiliza el acrónimo DEM, a todas las formas de datos digitales de superficie (J. G. Liu & Mason, 2016).

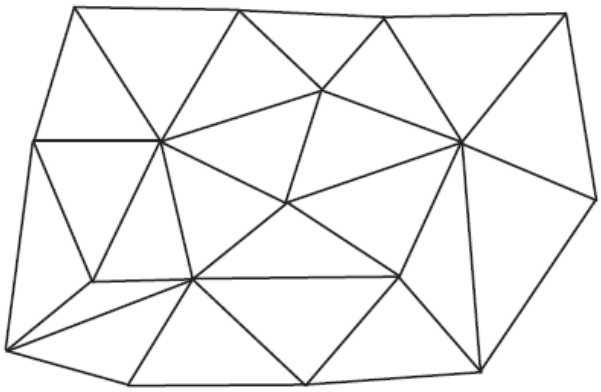
Existen diferentes formas de expresión para los Modelos Digitales de Elevación (DEM), pero las dos estructuras más comunes son el DEM de cuadrícula regular y el DEM de red irregular triangulada (TIN). En el caso del **DEM de cuadrícula regular**, el terreno se divide en una serie de celdas de cuadrícula de forma regular. Cada celda se representa mediante un punto de elevación en un objeto, como se muestra en la Figura 1.a. Este tipo de DEM se puede comprimir fácilmente debido a su estructura regular, lo que lo hace adecuado para la gestión informática. La estructura más común de los DEM satelitales como ASTER, SRTM, ALOS- PALSAR entre otros, está en el formato de cuadrícula regular. Por otro lado, el DEM de red irregular triangulada (TIN) utiliza los puntos de muestra originales para formar una serie de triángulos no superpuestos que cubren toda la región, siguiendo un conjunto de reglas. La superficie del terreno se describe aproximadamente mediante estos triángulos, como se muestra en la Figura 1.b. Debido a la naturaleza irregular del TIN, la organización, el almacenamiento y la aplicación de sus datos son más complejos que los del DEM de cuadrícula regular. Además de almacenar la elevación de los puntos, también se registra la posición planimétrica y la relación topológica entre triángulos adyacentes (Liang & Wang, 2020).

Figura 1

Modelos de elevación digital

57	82	84	83	81	88
55	54	53	82	87	83
59	57	55	56	89	84
35	59	58	52	57	63
33	35	30	34	64	64
87	89	34	65	66	68

a)



b)

Nota. La Figura 1 muestra las estructuras más comunes de los modelos de elevación digital: a) El modelo de elevación digital de cuadrícula regular. b) El modelo de elevación digital de red irregular triangulada. Fuente: (Liang & Wang, 2020).

Los datos DEM pueden ser primarios o secundarios, generados a partir de mediciones satelitales, aviones tripulados y no tripulados, tecnología LIDAR o escaneo terrestre, con la finalidad de obtener modelos de datos topográficos precisos y extraer atributos del terreno (Sena et al., 2020a). Los DEM satelitales son recursos altamente efectivos cuando no existe otra fuente de información topográfica, se acceden libremente, son económicos y están vinculados a diversas aplicaciones como cartografía, planificación urbana, gestión del agua, simulación de inundaciones, análisis de pendientes diseño de obras viales entre otras (Meza, 2020).

CAPÍTULO III
MARCO FILOSÓFICO

Las actividades humanas han configurado el paisaje durante siglos, utilizando los servicios del ecosistema para el sustento de las sociedades (Schulp et al., 2019). Desde las primeras representaciones gráficas hasta las modernas imágenes satelitales, se evidencia cómo el uso y cobertura de la tierra han cambiado a lo largo del tiempo. En la actualidad, gracias a los avances en la ciencia y tecnología, es posible planificar y gestionar el uso de la tierra de manera más eficiente, utilizando datos obtenidos de satélites como Landsat 1 (1972) y Sentinel-2A (2023) en esta investigación.

El marco filosófico de la presente investigación establece los principios y fundamentos teóricos que guían el estudio. En el contexto de la modelación y evaluación de cambios en el uso y cobertura de la tierra, este marco se construye a partir de conceptos en geografía, ecología, ciencias ambientales y tecnologías de teledetección y la información geográfica. Estos principios no solo orientan la metodología, sino que también justifican las decisiones tomadas a lo largo del proceso investigativo no solo es desde la perspectiva metodológica, también desde la perspectiva de la ontología, epistemología, axiología y paradigma de investigación, sustentadas a continuación:

3.1. Perspectiva de la ontología

La ontología es un término originado en la filosofía que describe la naturaleza de las cosas y se considera generalmente como la ciencia del ser o el estudio filosófico de la existencia; la ontología es una interpretación o explicación de una realidad objetiva, enfocándose en la naturaleza abstracta de dicha realidad, y se sitúa dentro del ámbito de la teoría metafísica. Este concepto, que ha estado presente en la filosofía occidental por más de 2000 años, continúa siendo un tema de intenso debate entre los filósofos (H. Li, 2021; Bellone & Mussio, 2018); resumiendo la ontología se refiere a la naturaleza del ser y la realidad que se estudia, en esta investigación nos referimos a la naturaleza del paisaje

terrestre y su dinámica sobre el cambio de uso y cobertura de la tierra, donde el estudio de caso es la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua.

En este contexto, se asume que el paisaje es un sistema complejo, compuesto por múltiples elementos interconectados, tales como el suelo, la vegetación, el agua y las actividades humanas (Turner II et al., 1995; Tambassi, 2019; Silvennoinen et al., 2023). Estos elementos interactúan entre sí y con factores externos como el clima, dando lugar a patrones espaciales y temporales específicos. Esta visión holística permite considerar el paisaje no solo como un conjunto de elementos físicos, sino también como un espacio donde ocurren procesos ecológicos y socioeconómicos. La cuenca hidrográfica es vista como un sistema dinámico y cambiante, influenciado tanto por procesos naturales como por intervenciones humanas (Lambin, 1994; Meyfroidt & Lambin, 2011).

3.2. Perspectiva de la epistemología

La epistemología de esta investigación se basa en el positivismo, que sostiene que el conocimiento sobre los cambios en el uso y cobertura de la tierra puede ser obtenido de manera objetiva y cuantificable a través de la observación y el análisis de datos. En este enfoque la teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG) son herramientas fundamentales para la investigación en información geoespacial (Bill et al., 2022), permitiendo la recolección y análisis de grandes volúmenes de datos espaciales y temporales para la representación de la realidad geográfica (Galton, 2019). Estas herramientas proporcionan datos precisos y detallados que son esenciales para el análisis de patrones históricos y la predicción de cambios futuros.

El positivismo se complementa con un enfoque pragmático, que busca utilizar el conocimiento adquirido para desarrollar modelos predictivos y proponer estrategias de manejo sostenible (Creswell & Creswell, 2022). En la presente investigación el uso de imágenes satelitales desde el año 1972 con Landsat 1 hasta el año 2023 con Sentinel-2A refleja este enfoque del desarrollo continuo de nuevos sensores ha aumentado la resolución espacio-temporal-espectral de los datos de observación aplicados a los estudios del cambio de uso y cobertura de la tierra (Shao et al., 2021; Hokkanen, 2024), proporcionando una continuidad de datos que permite evaluar los cambios en el uso y

cobertura de la tierra durante décadas. Además, el análisis de estos datos a través de técnicas de teledetección y SIG facilita una comprensión profunda de las dinámicas espaciales y temporales en la cuenca hidrográfica del río Moquegua. Este enfoque reconoce la necesidad de aplicar los resultados de la investigación para resolver problemas prácticos relacionados con la gestión de las cuencas hidrográficas.

La aplicación de la topología en la dinámica espacio temporal del cambio de uso y cobertura de la tierra va mucho más allá del ámbito de la geoinformática; de hecho, la topología podría transformar nuestra percepción de ciertos fenómenos y procesos geográficos (Huang, 2017). Desde la geografía del tiempo hasta las nociones topológicas de conexidad y homotopía, un enfoque filosófico de diversos teoremas topológicos (como los teoremas de Brouwer y Borsuk-Ulam, el teorema de geometrización de Thurston y la demostración de la conjetura de Poincaré) demuestra cómo la adopción de métodos y perspectivas topológicas puede ser esclarecedora, fascinante e incluso desafiante para el pensamiento geográfico (Papadimitriou, 2023).

3.3. Perspectiva de la axiología

En términos de axiología, esta investigación valora la precisión, la objetividad y la aplicabilidad. La precisión se busca a través del uso de modelos digitales de elevación y técnicas avanzadas de teledetección para delimitar la cuenca y analizar los cambios en el uso y cobertura de la tierra con la mayor exactitud posible. La objetividad se asegura mediante métodos cuantitativos y la validación de modelos con datos históricos utilizando sistemas de apoyo a la toma de decisiones espaciales (Svoray, 2022).

La aplicabilidad se manifiesta en la intención de utilizar los hallazgos de la investigación para mejorar la gestión de la cuenca hidrográfica. Los conflictos por el uso y cobertura de la tierra y el crecimiento desordenado de los centros urbanos influyen notablemente en los aspectos sociales, económicos y políticos. Por ejemplo, la ocupación de áreas urbanas cerca de los ríos puede resultar en problemas de inundaciones, mientras que la expansión minera puede alterar significativamente los hábitats locales, por lo que se valora la capacidad de los modelos predictivos para informar políticas y prácticas que

promuevan la sostenibilidad ambiental y el bienestar socioeconómico de los hábitats locales (Meyfroidt et al., 2010).

3.4. Paradigma de investigación

El paradigma de investigación dominante en este estudio es el cuantitativo, basado en la recolección y análisis de datos numéricos. Este enfoque permite medir y modelar los cambios en el uso y cobertura de la tierra de manera precisa y objetiva (Kitchin, 2014). Además, se emplea un diseño longitudinal, que analiza los cambios a lo largo del tiempo, comparando los datos de 1972, 2012 y 2023 y proyectando escenarios futuros hasta el 2040 (Longley et al., 2015).

El enfoque cuantitativo se complementa con métodos de modelación espaciotemporal, que integran datos históricos y actuales para prever cambios futuros (Batty, 2018). Esto implica el uso de técnicas estadísticas avanzadas y herramientas de simulación espacial para construir y validar los modelos a partir del aprendizaje profundo basado en geociencias siendo un nuevo paradigma para la teledetección (Ge et al., 2022).

3.5. Conclusión filosófica

El marco filosófico de esta tesis se fundamenta en una visión holística del paisaje, un enfoque positivista y pragmático del conocimiento, y una valoración de la precisión, objetividad y aplicabilidad. Este marco guía la investigación hacia un análisis riguroso y útil de los cambios en el uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, proporcionando una base sólida para el desarrollo de estrategias de manejo sostenible.

CAPÍTULO IV
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Caracterización o tipo del diseño de investigación

Para poder sustentar y caracterizar el tipo de investigación que se realiza en una investigación, dependerá del enfoque o rutas del conocimiento sobre el método de investigación a aplicar para resolver problemas (Arias & Covinos, 2021), de acuerdo con los enfoques que realiza Hernández Sampieri & Mendoza (2023) y Hernández Sampieri et al. (2014), la ruta de la presente investigación utiliza el **enfoque cuantitativo** porque mide y analiza cuantitativamente el cambio de las coberturas en diferentes periodos con un nivel evaluativo.

El diseño de la investigación está relacionada y concatenada desde el primer objetivo específico, que es generar un nuevo modelo de la delimitación de la cuenca hidrográfica, con la validación de modelos digitales del terreno y líneas de perfiles longitudinales, siendo un problema de investigación poco estudiado en la región y después continuamos con un alcance de **investigación descriptiva** para cumplir con el segundo y tercer objetivo, porque se describen los datos, características y sucesos de los cambios de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, culminando con el cuarto objetivo específico que es modelar y predecir escenarios futuros del cambio de uso y cobertura de la tierra al 2040.

Según los enfoques de Hernández Sampieri & Mendoza (2023) y Hernández Sampieri et al. (2014), el tipo del diseño de investigación se caracteriza como **No-experimental, cuantitativa, de corte longitudinal o evolutiva, De tendencia *(trend)*** debido a que no variamos intencionalmente la variable independiente para observar el efecto sobre otras variables, es así que recolectamos datos de fotografías aéreas e imágenes de satélite para cartografiar los mapas de los años 1972, 2012 y 2023 y poder analizar los cambios al paso del tiempo en las seis clases de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua.

4.2. Población y muestra

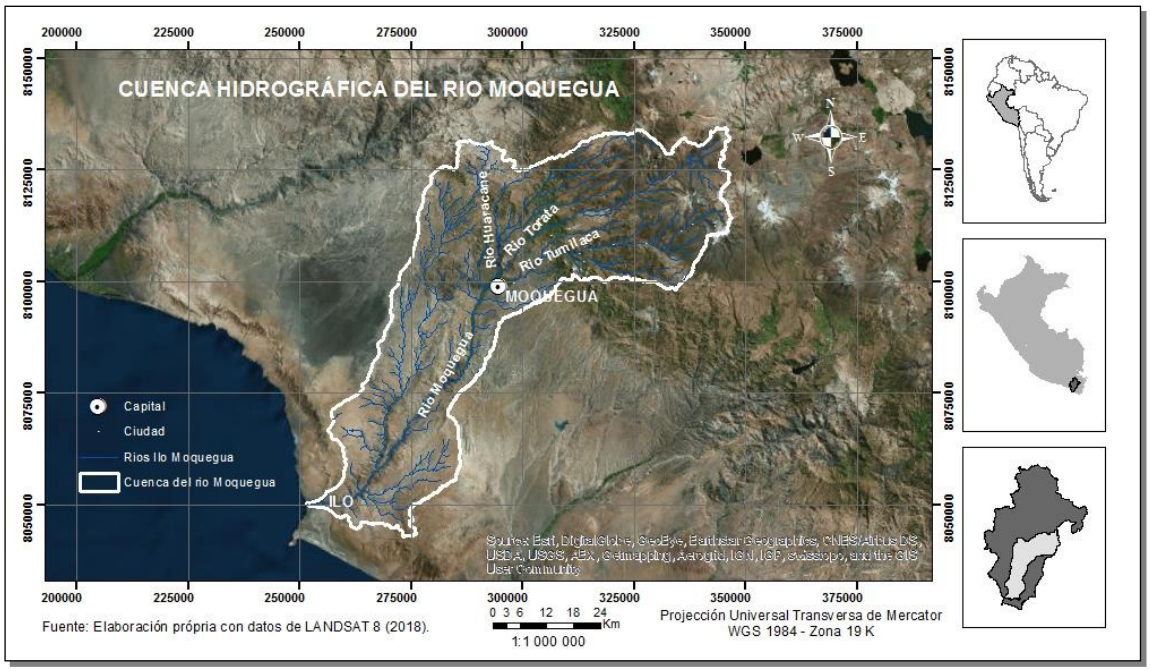
Dentro de los procesos de la investigación cuantitativa la **población** está formada por el total de los elementos que intervienen en el estudio (Arias & Covinos, 2021; Hernández Sampieri & Mendoza, 2023), en la presente investigación la población está formada por la superficie delimitada de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua.

Hernández Sampieri & Mendoza (2023) indican que la **muestra** es un subgrupo de la población. En la presente investigación, la muestra es similar a la población, permitiendo estudiar el cambio de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua.

La cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua se encuentra localizada al sur del Perú, en el departamento de Moquegua, ocupando en gran parte la provincia de Mariscal Nieto. El río Moquegua formado por tres ríos Tumilaca, Torata y Huaracane que confluyen a una altitud de 1300 m s. n. m. a la altura de la ciudad de Moquegua, cuyo recorrido es de 74 km desde la confluencia hasta la desembocadura en el Océano Pacífico, en su recorrido va tomando los nombres de río Moquegua, río Osmore y río Ilo (Oficina Sectorial de Planificación Agraria, 1968). Geográficamente, se encuentra entre los 250000 a 350000 metros Este y 8040000 a 8 135000 metros al Norte en la proyección universal transversal de Mercator (UTM) del sistema geodésico mundial WGS 84, como se puede observar en la Figura 2.

Figura 2

Mapa de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua



Nota. Mapa realizado por el tesista. Fuente: Dato vectorial en formato *shapefile* (ANA, 2009a).

4.3. Operacionalización de variables

4.3.1. Identificación de las variables

Se considerarán las siguientes variables de estudio:

Variable independiente:

Uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua.

Variable dependiente:

Cambios en el uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua.

4.3.2. Caracterización de las variables

Variable independiente:

Es el uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, por lo que se debe caracterizar:

a. **Delimitación y caracterización topográfica y morfométrica.**
   Las características topográficas y morfométricas de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua a estudiar se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1

Características topográficas y morfométricas de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua

Características Topográficas y morfométricas	**Símbolo**	**Unidad**
PLANIMETRÍA		
Superficie de la cuenca	A	km²
Perímetro de la cuenca	P	km
FORMA DE LA CUENCA		
Índice de Gravelius o Coef. de Compacidad	Kc	
Factor de Forma	Ff	
CARACTERÍSTICAS DEL RELIEVE		
Pendiente de la cuenca	Sm	m/m
Elevación Media de la cuenca	E	m s. n. m.
Nivel mínimo		m s. n. m.
Nivel máximo		m s. n. m.
Rectángulo Equivalente		
Lado mayor	L	km
Lado menor	l	km
Pendientes del Río Principal	Sp	%
Pendiente media	Sp1	%
Pendiente media ponderada	Sp2	%
Pendiente equivalente constante	Sp3	%
Altura media del curso principal	Hmr	m s. n. m.
Coeficiente de Masividad	Cm	m s. n. m./km²
SISTEMA DE DRENAJE		

Número de Cursos de Agua de 1° orden	r1	
Número total de corrientes	Nt	
Longitud total de corrientes	Lt	km
Longitud del Río Principal	Lr	km
Longitud del valle del río principal	Lv	km
Densidad de Corriente	Dc	
Densidad de Drenaje	Dd	km/km²
Extensión Media de la escorrentía	Em	km
Sinuosidad de la corriente principal	S	
Coeficiente de Torrencialidad	Ct	

Nota. Elaborado por el autor.

b. Uso y cobertura de la tierra

Las variables a ser analizadas son seis clases mostradas en la Tabla 2.

Tabla 2

Clases de uso y cobertura de la tierra de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua

Leyenda genérica con 06 clases de uso y cobertura de la tierra	**Leyenda detallada con 24 clases de uso y cobertura de la tierra**
Infraestructura urbana	Áreas urbanizadas
	Áreas industriales e infraestructura
	Áreas peri urbanas
Minería	Minería metálica
	Minería no metálica
Agricultura	Cultivos transitorios
	Cultivos permanentes
	Áreas agrícolas heterogéneas
Bofedal	Bofedal
Agua	Ríos (50 m)
	Lagunas, lagos y ciénagas naturales
	Cuerpos de agua artificiales
Natural	Bosque denso bajo

	Bosque abierto bajo
	Bosque denso alto
	Bosque abierto alto
	Plantación Forestal
	Herbazal
	Vegetación arbustiva / herbácea
	Áreas arenosas naturales
	Afloramientos rocosos
	Tierras desnudas
	Áreas quemadas
	Glaciares

Nota. Elaborado por el tesista.

4.3.3. Definición operacional de las variables

Para cumplir con el objetivo de analizar y modelar espacialmente el uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua entre los años 1972, 2012 y 2023, para el análisis de sus cambios históricos y la predicción de escenarios al año 2040, es preciso definir la operacionalización de variables que se muestra a continuación.

Operacionalización de las variables

Objetivo Específico	**Variable**	**Definición Conceptual**	**Definición Operacional**	**Dimensión**	**Indicadores**	**Escala de medición**
Delimitar de manera más precisa y realista la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua utilizando un modelo digital de elevación, evaluado y validado con estándares de exactitud posicional de datos espaciales.	Delimitación y caracterización topográfica y morfométrica de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua.	El análisis morfométrico permite delimitar y caracterizar cuantitativamente la topografía y morfometría de una cuenca hidrográfica a través de variables numéricas que se pueden obtener directamente de un modelo digital del terreno. El proceso de extracción de estas variables se realiza automáticamente a partir de modelos numéricos de terreno (MNT), utilizando las	Delimitar la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua a partir del modelo digital del terreno más preciso y realista, que puede ser de ASTER, ALOS PALSAR o SRTM, validado por estándares de exactitud posicional de datos espaciales EMAS, NMAS y NSSDA.	Exactitud horizontal	Estándar NMAS (National Map Accuracy Standard)	Ordinal
					Estándar EMAS (Engineering Map Accuracy Standard)	Ordinal
					Estándar NSSDA (National Standard for Spatial Data Accuracy)	Ordinal
				Exactitud vertical	Estándar NMAS (National Map Accuracy Standard)	Ordinal
					Estándar EMAS (Engineering Map Accuracy Standard)	Ordinal
					Estándar NSSDA (National Standard for Spatial Data Accuracy)	Ordinal
				Planimetría	Superficie de la cuenca.	Ordinal

		herramientas disponibles en gran parte de los sistemas de información geográfica. (Li et al., 2019; Shit et al., 2022; Soille & Ansoult, 1990)	Caracterizar la topografía y morfometría de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua por parámetros hidrográficos a partir del modelo digital del terreno más preciso y realista con herramientas de geoprocesamiento espacial. Las ecuaciones para cada parámetro hidrográfico se muestran en la tabla 1.		Perímetro de la cuenca	
				Forma de la Cuenca	Índice de Gravelius o Coef. de Compacidad.	
					Factor de Forma	
				Características del relieve	Pendiente de la cuenca	
					Elevación Media de la cuenca	
					Nivel mínimo	
					Nivel máximo	
					Rectángulo Equivalente	
					Pendientes del Río Principal	
					Altura media del curso principal	
					Coeficiente de Masividad	
				Sistema de drenaje	Número de Cursos de Agua de 1° orden	
					Número total de corrientes	
					Longitud total de corrientes	

					Longitud del Río Principal	
					Longitud del valle del río principal	
					Densidad de Corriente	
					Densidad de Drenaje	
					Extensión Media de la escorrentía	
					Sinuosidad de la corriente principal	
					Coeficiente de Torrencialidad	
					Tiempo de concentración	
Analizar las tendencias espaciales de los cambios en el uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua entre	Clases del uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua.	La cobertura de la tierra alude a las características físicas de la superficie terrestre, mientras que el uso de la tierra se refiere a las modificaciones humanas en la	Cartografiar las clases del uso y cobertura por métodos de teledetección y geoprocesamiento espacial de fotografías aéreas, imágenes satelitales Landsat, RapidEye y	Modelado espacial de las superficies ocupadas por las clases de uso y cobertura de la tierra en los años: 1972, 2012 y 2023.	Infraestructura urbana	Ordinal
					Minería	
					Agricultura	
					Bofedal	
					Agua	
					Natural	

los años 1972, 2012 y 2023.		cobertura de la tierra (Koko et al., 2022) El cambio de uso y cobertura de la tierra de una región se debe a la influencia de factores naturales y socioeconómicos y su utilización por parte del hombre en el tiempo y el espacio (Ocloo et al., 2024; Jing et al., 2024)	Sentinel 2 correspondientes a los años 1972, 2012 y 2023.			
			Analizar la variación espaciotemporal y tendencias de cambio de uso y cobertura de la tierra de 1972 al 2023.	Datos espaciotemporales resultantes de la matriz de tabulación cruzada en los periodos 1972-2012, 2012-2023 y 1972-2023.	Estadísticas de aumento o reducción de superficies de uso y cobertura de la tierra.	Ordinal
					Tasa del cambio de uso y cobertura de la tierra (% ano)	
					Índice de dinámica de uso y cobertura de la tierra, a partir del índice de dinámica del tiempo e índice de la dinámica espacial.	
Construir, comparar y validar un modelo de cambios de uso y cobertura de la tierra en la	Modelamiento de cambios de uso y cobertura de la tierra 1972-2012.	El modelado de Cambios en el Uso y Cobertura de la Tierra - Land Change Modeler (LCM) se presenta en una estructura	Construir el modelo cambios de uso y cobertura de la tierra, identificando los potenciales de transición 1972-	Modelado espacial de potenciales de transición del periodo 1972-2012.	Infraestructura urbana	Ordinal
					Minería	
					Agricultura	
					Bofedal	
					Agua	

cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, del mapa espacial 2023.		fija que divide el modelado en etapas como: análisis de los cambios de cobertura de la tierra, cálculo de los potenciales de transición, simulación de cambios futuros además de herramientas para la evaluación de intervenciones planificadas en el uso de la tierra e impactos para la biodiversidad (Eastman, 2012)	2012 y selección de variables explicativas por medio de Red Neural de percepción multicapa, logrando obtener el mapa predicho para el 2023, para validar con el mapa espacial histórico del año 2023.		Natural	
				Modelado espacial de las variables explicativas que influyen en los cambios de uso y cobertura de la tierra para el proceso de pronóstico.	Mapa de distancia a carreteras	Ordinal
					Modelo digital de elevación del terreno	
					Mapa de pendientes en porcentaje	
					Mapa de geología	
					Mapa de suelos	
					Mapa de capacidad de uso mayor de las tierras	
					Mapa de distancia a ríos perennes	
					Mapa de distancia a centros poblados	
				Modelo espaciotemporal de cambio de uso y cobertura de la tierra. Simulado y validado al comparar el mapa	Infraestructura urbana	Ordinal
					Minería	
					Agricultura	
					Bofedal	
					Agua	

				espacial histórico del año 2023 con el mapa predicho por el modelo para el mismo año. Aplicando el índice de Kappa.	Natural	
Predecir escenarios futuros del cambio de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua para el año 2040, utilizando técnicas de modelación espaciotemporal.	Escenarios de uso y cobertura de la tierra para el año 2040	Los escenarios estacionarios utilizan el diagnóstico de las alteraciones pretéritas para direccionar los cambios que ocurrirán en el futuro. Pueden ser propuestos por medio de modelos markovianos simples, conjugados a autómatas celulares,	Predecir escenarios de uso y cobertura de la tierra para el año 2040.	Modelado de las superficies ocupadas por los posibles escenarios de uso y cobertura de la tierra para el año 2040.	Infraestructura urbana	Ordinal
					Minería	
					Agricultura	
					Bofedal	
					Agua	
					Natural	
			Analizar la variación espaciotemporal y tendencias de cambio de uso y cobertura de la tierra al año 2040.	Datos espaciotemporales resultantes de la matriz de tabulación cruzada en el	Estadísticas de aumento o reducción de superficies de uso y cobertura de la tierra.	Ordinal
					Tasa del cambio de uso y cobertura de la tierra (% ano).	

		auxiliando en la evaluación de los cambios de cobertura y uso de la tierra (d'Aquino et al, 2001; (Zhao et al., 2014)		periodo 1972-2040.	Índice de dinámica de uso y cobertura de la tierra, a partir del índice de dinámica del tiempo e índice de la dinámica espacial.	

4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Las técnicas e instrumentos de recolección de datos aplicados en esta investigación son distintos, con la finalidad de cumplir los objetivos planteados, los mismos que se describen a continuación:

4.4.1. Para el primer objetivo

Se utilizan diferentes **técnicas de recolección de datos** en este primer objetivo de la investigación siendo proceso progresivo, iniciando desde la *técnica de la observación* para detectar hechos y fenómenos al momento de recopilar y registrar la información documentaria del área de estudio (Useche et al., 2019), Para los procesos específicos de este objetivo se utiliza *técnicas de teledetección o sensoramiento remoto* de sensores activos, aplicados al tratamiento de datos ráster de modelos digitales de elevación (Chuvieco, 1990; Valentina & Matar, 2016; Alves et al., 2021; Rocha et al., 2020); *técnicas de geoprocesamiento espacial* inmersas en la aplicación de herramientas geoespaciales incluidos los procesos de sistemas de información geográfica (Cámara & Jiménez Ortiz, 1998; Buffara, 2018) y *técnicas de modelamiento hidrológico* aplicados desde la delimitación de cuencas hidrográficas como Arc Hydro Tools y Hec-GeoHMS y posterior análisis de los diferentes parámetros físicos y morfométricos de la cuenca hidrográfica (Fleming & Doan, 2013; US Army Corps of Engineers, 2021).

Los **primeros instrumentos de recolección datos** en este objetivo se inician con los *modelos digitales de elevación para la delimitación de la cuenca hidrográfica*, que son las representaciones digitales tridimensionales de la superficie terrestre, producto de las imágenes de satélite que proporcionan información precisa en altura y forma del terreno. Los datos de los modelos digitales de elevación utilizados fueron: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) y The Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (ALOS PALSAR), los mismos que están disponibles gratuitamente en sus respectivas plataformas de descarga, cuyas características, identificación y links de descarga se encuentran en la Tabla 3.

Tabla 3

Principales características e identificación de Modelos Digitales de Elevación (DEMs)

Características	**ASTER**	**SRTM**	**ALOS PALSAR**
Tamaño del píxel	30 metros	30 metros	12,5 metros
Datum horizontal/vertical	WGS84/EGM96	WGS84/EGM96	WGS84/EGM96
ID DEM (04 DEM)	ASTGDEMV2_0S17W071	SRTM1S17W071V3	AP_26607_FBS_F6840_RT1
	ASTGDEMV2_0S17W072	SRTM1S17W072V3	AP_27030_FBS_F6830_RT1
	ASTGDEMV2_0S18W071	SRTM1S18W071V3	AP_27030_FBS_F6840_RT1
	ASTGDEMV2_0S18W072	SRTM1S18W072V3	AP_27278_FBS_F6830_RT1
Plataformas de descarga	https://earthexplorer.usgs.gov/	https://earthexplorer.usgs.gov/ https://explorer.earthengine.google.com/#workspace	https://vertex.daac.asf.alaska.edu/#

Nota. Los DEM utilizados del área de estudio corresponden al cuadrilátero de coordenadas: -17,74° a -16,8° Latitud Sur y -71,4 a -70,4° longitud Oeste.

Seguidamente, para el proceso validación de la delimitación de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua referente a la exactitud posicional de datos espaciales (Datos a evaluar), es necesario contar con las bases de datos espaciales oficiales (Datos de referencia), por el cual dentro de los **segundos instrumentos de recolección de datos** *para validar la delimitación de la cuenca hidrográfica* se requiere de puntos de control cartográfico oficial del Instituto Geográfico Nacional (Datos de referencia), los mismos que están localizados en la cartografía básica oficial en el Perú a escala 1/100000 (formato vector shape) como 1/25000 (representación cartográfica en la red WMS), lo que conlleva realizar la delimitación manual de la cuenca hidrográfica Ilo-Hidrográfica sobre La cartografía básica oficial en el Perú. La cartografía básica oficial en el Perú, en formato vector a escala 1/100000 para el ámbito de estudio, corresponden a 07 cartas nacionales, las mismas que están identificadas por nombre y código, que son: Puquina (34-t), Omate (34-u), Hualtire (34-y). Clemesi (35-t), Moquegua (35-u), Tarata (35-y) e Ilo (36-t); representadas en la Figura 3 para su localización.

Figura 3

Cuadro de empalme de las cartas nacionales a escala 1/100000



Nota. Cuadro de empalme de la zona de estudio donde se identifican las 07 de 501 cartas nacionales que forman la cartografía básica oficial en el Perú. Fuente: (IGN, 2021).

La información cartográfica de las 07 cartas nacionales en formato shape (*.shp) a escala 1/100000, fue descargada de la plataforma de descargas del Ministerio de Educación https://sigmed.minedu.gob.pe/descargas/, que tiene información de datos geoespaciales, que incluyen capas instituciones educativas, centros poblados, hidrografía e hipsografía del Perú en escala 1:100000 (MED, 2015).

Así mismo se utilizó la cartografía oficial del ámbito de estudio en formato a escala 1/25000, que está disponible en el GeoPortal de Datos Fundamentales del Instituto Geográfico Nacional del Perú (IGN, 2021), específicamente del servicio *Web Map Service* (WMS) o servicio de publicación de mapas, con dirección *Uniform Resource Locator* (URL) o localizador de recursos uniforme para la escala del cartográfico

1/100000 es: https://www.idep.gob.pe/geoportal/services/MAPA_BASE/PERÚ_RASTER_100K/MapServer/WMSServer? y para la cartografía a 1/25000 es: https://www.idep.gob.pe/geoportal/services/MAPA_BASE/PER%C3%9A_RASTER_25K/MapServer/WMSServer?request=GetCapabilities&service=WMS.

Para cuantificar las diferencias de áreas entre la delimitación real y la delimitación de la ANA sobre la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, se requiere del **tercer instrumento de recolección de datos**, que es la información de datos geoespaciales de las unidades hidrográficas del Perú (ANA, 2009b) referente a delimitación de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua para su evaluación, fue descargada del Observatorio Nacional de Recursos Hídricos en formato shape que se encuentra disponible en https://snirh.ana.gob.pe/onrh/, que fue aprobada con Resolución Ministerial N° 033-2008-AG donde incluye la Metodología de Codificación de Unidades Geográficas de Pfastetter, la memoria descriptiva y el plano de delimitación y codificación de las Unidades Hidrográficas del Perú (INRENA, 2008), como también la publicación se localiza en el repositorio de recursos hídricos de la Autoridad Nacional del Agua, a escala 1/100000 en formato vector shape como la representación cartográfica en la red WMS (ANA, 2009a).

4.4.2. Para el segundo objetivo

Con el propósito de alcanzar el segundo objetivo, se aplicaron diversas **técnicas de recolección de datos**, comenzando por la *técnica de la observación* para seleccionar las fotografías aéreas e imágenes satelitales correspondientes al área de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, con el fin de recopilar y registrar la información documentaria relevante (Useche et al., 2019). Para el tratamiento específico de los datos, se emplearon *técnicas de teledetección o sensoramiento remoto* mediante sensores pasivos, orientadas al procesamiento de datos ráster provenientes de imágenes ópticas (Chuvieco, 1990; Valentina & Matar, 2016; Alves et al., 2021; Rocha et al., 2020). Además, se integraron **técnicas de geoprocesamiento espacial** a través del uso de herramientas geoespaciales, incluyendo procesos vinculados a los **sistemas de**

información geográfica (SIG) (Cámara & Jiménez Ortiz, 1998; Buffara, 2018), lo que permitió estructurar y analizar de forma eficiente la información espacial recopilada.

Los **primeros instrumentos de recolección datos** en este objetivo se inician con:

1. Preparación del Proyecto

- **Definición del área de estudio**: en este caso, utilizamos la delimitación manual de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua que se determinó en el primer objetivo.
- **Selección de periodos a comparar**: Seleccionamos el periodo de 1972, porque tenemos información del primer satélite de observación terrestre Landsat 1, que comenzó a operar en 1972, seleccionamos el periodo 2012 para determinar los cambios después de 40 años a partir de imágenes satelitales Landsat 7 y seleccionamos el periodo 2023 porque se tiene información reciente y evaluar a los 51 años a partir de imágenes satelitales de Sentinel-2 A.

2. Recolección de Datos Espaciales por Periodo

Periodo 1972

1. Descarga de Imágenes Landsat 1 (MSS) desde la plataforma Earth Explorer.
2. Obtención de fotografías aéreas del MINAGRI de archivos en físicos.

Periodo 2012

1. Descarga de imágenes Landsat 7 (ETM+) desde Earth Explorer.
2. Captura de imágenes satelitales desde Google Earth Pro.

Periodo 2023

1. Descarga de imágenes Sentinel-2A de la plataforma Copernicus Open Access Hub.
2. Acceso a imágenes de alta resolución de ArcGIS: Descarga de datos actuales disponibles en la plataforma online de ArcGIS.

A continuación, presentamos la Tabla 4, donde se identifica a las imágenes de satélite utilizadas en la investigación, junto a sus principales características.

Tabla 4

Principales características de las imágenes de satélite Landsat y Sentinel-2A.

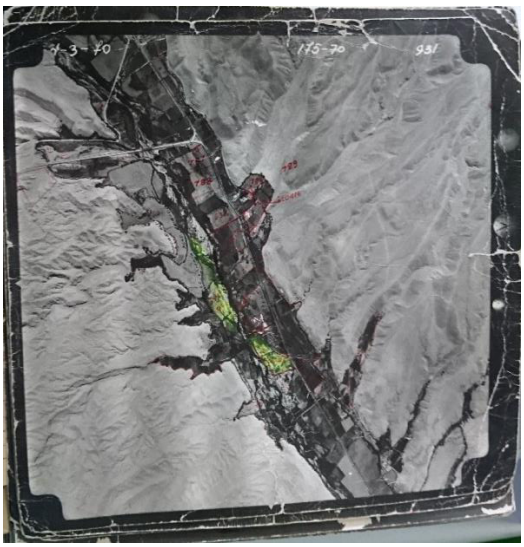
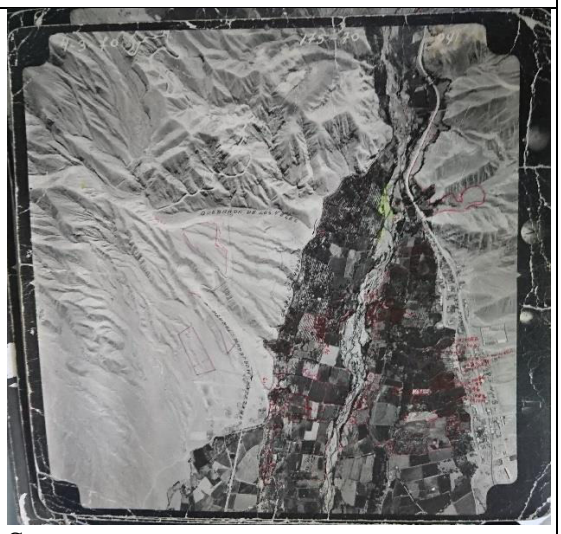
Número	Fecha de Adquisición	Satélite	Identificador de producto	Resolución Espacial	Banda Espectral	Ubicación WRS (Path,Row)	Indicador día/noche	Formato de Archivo	Fuente de Datos	Zona UTM	Datum
1	1972-11-02	Landsat 1	LM01_L1TP_002072_19721102_20200909_02_T2	60 metros	MSS (Multispectral Scanner)	002, 072	día	GeoTIFF	USGS Earth Explorer	19	WGS84
2	2012-06-02	Landsat 7	LE07_L2SP_002072_20120602_20200908_02_T1	30 metros	ETM (Enhanced Thematic Mapper)	002, 072	día	GeoTIFF	USGS Earth Explorer	19	WGS84
3	2012-05-24	Landsat 7	LE07_L2SP_003072_20120524_20200908_02_T1	30 metros	ETM (Enhanced Thematic Mapper)	003, 072	día	GeoTIFF	USGS Earth Explorer	19	WGS84
4	2023-08-22	Sentinel-2 A	S2A_MSIL2A_20230822T145731_N0509_R039_T19KBA_20230822T212103.SAFE	30 metros	MSI	002, 072	día	GeoTIFF	USGS Earth Explorer	19	WGS84
5	2023-08-19	Sentinel-2 A	S2A_MSIL2A_20230819T144731_N0509_R139_T19KCA_20230820T151352.SAFE	30 metros	MSI	002, 072	día	GeoTIFF	USGS Earth Explorer	19	WGS84
6	2023-08-22	Sentinel-2 A	S2A_MSIL2A_20230822T145731_N0509_R039_T19KBB_20230822T212103.SAFE	30 metros	MSI	002, 072	día	GeoTIFF	USGS Earth Explorer	19	WGS84
7	2023-08-19	Sentinel-2 A	S2A_MSIL2A_20230819T144731_N0509_R139_T19KCB_20230820T151352.SAFE	30 metros	MSI	002, 072	día	GeoTIFF	USGS Earth Explorer	19	WGS84

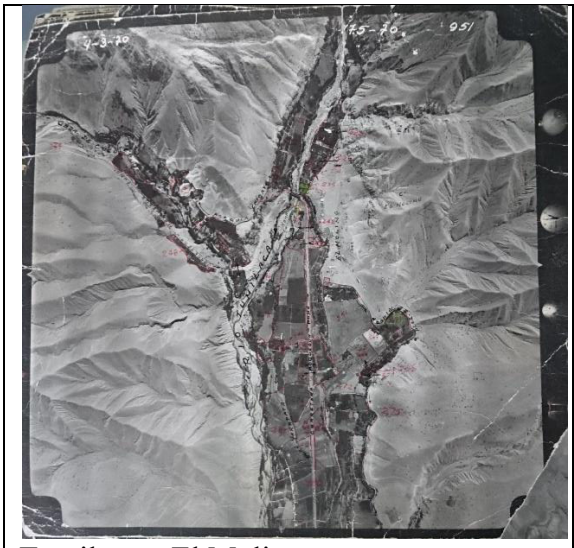
NOTA: Están en la Zona UTM 19 Datum WGS 84, tipo de WRS 1, Fuente USGS Earth Explorer

También presentamos la Tabla 5 de las principales fotografías aéreas escaneadas con resolución de 600 DPI del mosaico de fotografías aéreas entre 1970 y 1972 recabadas de la Dirección de Saneamiento de la Propiedad Agraria y Catastro Rural autorizada por la Dirección Regional de Agricultura Moquegua, que corresponden a nuestra área de estudio.

Tabla 5

Principales fotografías aéreas.

 Ciudad de Moquegua y aeropuerto. Fecha: 04-03-1970	 Ciudad de Ilo y Algarrobal. Fecha: 04-03-1972
 Puente Montalvo y valle de Moquegua Fecha: 04-03-1970	 Samegua Fecha: 04-03-1970



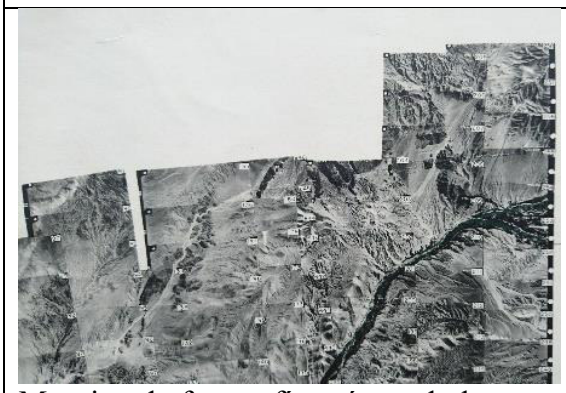
Tumilaca – El Molino

Fecha: 04-03-1970



Distrito de Torata

Fecha: 10-03-1970



Mosaico de fotografías aéreas de la parte alta Nor-oeste de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua

Fecha: 04-03-1970



Mosaico de fotografías aéreas de la parte alta Nor-oeste de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua

Fecha: 04-03-1970

El mosaico de imágenes satelitales capturado desde Google Earth Pro para el año 2012 se muestra en la Tabla 6, y las imágenes satelitales descargadas para los periodos 1972, 2012 y 2023 se presentan en la Tabla 7.

Tabla 6

Mosaico de imágenes satelitales de Google Earth Pro del año 2012.

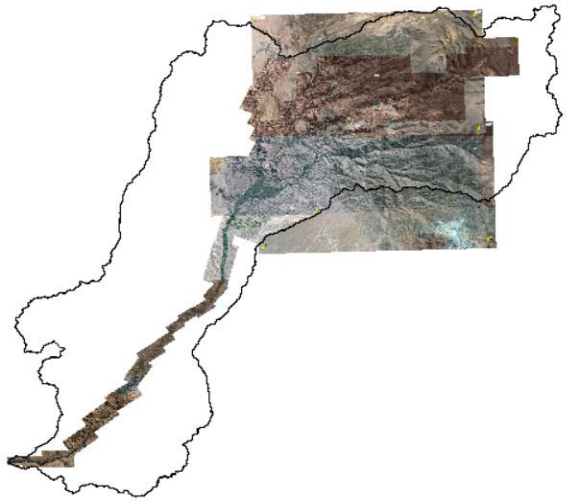
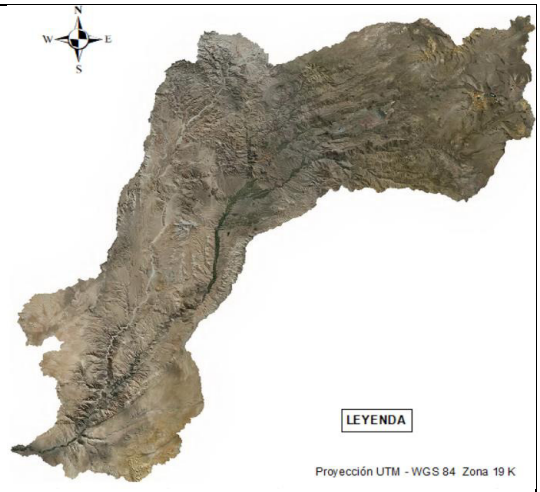
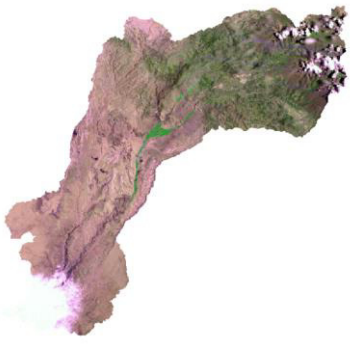
	
Mosaico de imágenes satelitales de Google Earth Pro del año 2012 de zonas cercanas a los ríos de la cuenca Ilo Moquegua.	Mosaico de imágenes satelitales de Google Earth Pro del año 2012 para la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua.

Tabla 7

Imágenes de satélite Landsat y Sentinel-2A.

Periodo 1972	**Periodo 2012**	**Periodo 2023**
		
Imágenes de satélite Landsat 1 en color natural. Combinación de bandas: 3,2,1.	Imágenes de satélite Landsat 7 en color natural. Combinación de bandas: 3,2,1.	Imagen de satélite Sentinel2-A en color natural. Combinación de bandas: 4,3,2.

4.4.3. Para el tercer objetivo

Para alcanzar el tercer objetivo específico, tras evaluar los cambios en la cobertura de la tierra, se emplearon las técnicas de geoprocesamiento disponibles en el software TerrSet. Estas técnicas permitieron identificar los potenciales de transición, realizar pruebas y seleccionar las variables explicativas mediante el uso de una Red Neuronal de Percepción Multicapa (MLP). Esto posibilitó modelar las transiciones potenciales para los períodos 1972 y 2012, y posteriormente simular y validar el modelo de uso y cobertura de la tierra correspondiente al año 2023, comparando el mapa histórico de 2023 con el mapa proyectado al 2023, utilizando como referencia la clasificación de campo de ese mismo año. Las variables explicativas consideradas fueron:

1. Mapa de carreteras en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, obtenido del Mapa Vial del Perú por Distritos - Shapefile (MTC, 2016)
2. Modelo de elevación digital (DEM) de *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) obtenido de los resultados del objetivo 1.
3. Mapa de distancia euclidiana a carreteras, obtenido del geoprocesamiento de datos del Mapa Vial de carreteras de la cuenca hidrográfica Ilo Moquegua.
4. Mapa de Pendientes en porcentaje, obtenido del geoprocesamiento del DEM del objetivo 1.
5. Mapa de geología de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua. Fuente:

   Mapa Geológico del Perú a escala 1:1 000 000 (INGEMMET, 2016).
6. Mapa de capacidad de uso mayor de las tierras

   Mapa de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor (ONERN, 2009).
7. Mapa de suelos, realizado con la actualización de (ONERN, 2020).
8. Mapa de Ríos Perennes, desde la cartografía base del Perú que contiene la capa de ríos en escala 1:100000 (MED, 2015)
9. Mapa de distancia euclidiana a ríos perennes, obtenido del geoprocesamiento del Mapa de Ríos Perennes.

10. Mapa de Centros poblados, obtenido del Ministerio de Educación que tiene información de centros poblados en formato Shapefile (MED, 2015).
11. Mapa de distancia euclidiana a centros poblados, obtenido del geoprocesamiento del mapa de centros poblados.

4.4.4. Para el cuarto objetivo

Para alcanzar el cuarto objetivo específico, se emplearon técnicas de geoprocesamiento avanzadas disponibles en el software TerrSet, utilizando como base los resultados de la simulación y validación del modelo de uso y cobertura de la tierra, que comparó el mapa histórico de 2023 con el mapa proyectado al mismo año. A partir de este modelo validado, se desarrollaron escenarios prospectivos de uso y cobertura de la tierra para el año 2040, integrando las transiciones identificadas y considerando diferentes posibles tendencias y factores de cambio.

4.5. Procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de datos varían según los objetivos de la investigación, que son descritos a continuación:

4.5.1. Para el primer objetivo

Este objetivo conlleva realizar dos etapas; la primera es determinar el límite topográfico y morfométrico, hidrológicamente consistente, más próximo a la realidad, y la segunda sobre la caracterización topográfica y morfométrica de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua.

4.5.1.1. Primera Etapa: Delimitación de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua.

Primer procesamiento: se procede a delimitar la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua a partir de los datos DEM, en cada producto ASTER, SRMT y ALOS PALSAR. Se inicia con el uso de técnicas de geoprocesamiento para la *corrección geométrica* de los datos de modelos digitales de elevación (DEM) Advanced Spaceborne

Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) y The Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (ALOS PALSAR), en el sistema de coordenadas cartesianas UTM (Universal Transversa de Mercator) del Sistema Geodésico Mundial 1984 denominado WGS 84 (World Geodetic System 84), analizando la localización y georreferenciación correcta del hemisferio y zona UTM en cada imagen de satélite, seguidamente se unen las imágenes correspondientes a cada modelo digital de elevación ASTER, SRTM y ALOS-PALSAR, al que se denomina *mosaico* de imágenes de satélite.

En cada mosaico de imágenes ASTER, SRTM y ALOS PASAR se efectúa la delimitación hidrológicamente consistente de la cuenca Ilo Moquegua, utilizando la herramienta de geoprocesamiento Arc Hydro Tools desarrollado por el Centro de Investigación de Recursos Hídricos de la Universidad de Texas en Austin en colaboración con el *Environmental Systems Research Institute (ESRI)* para personalizar la aplicación de ArcGIS para recursos hídricos ESRI (2019) y corroboradas con la herramienta de geoprocesamiento HEC-GeoHMS que fue desarrollado en forma paralela por el Hydrologic Engineering Center de la U.S. *Army Corps of Engineers* y el *Environmental Systems Research Institute* (US Army Corps of Engineers, 2021). Ambas herramientas de geoprocesamiento hidrológico se aplicaron con la finalidad de tener mayor confiabilidad y validez de los modelos que se generan, los mismos que se instalaron en el ArcGIS 10,5, los cuales tienen procedimientos similares e incluso los mismos nombres de las herramientas utilizadas que se detallan en sus manuales uso (ESRI, 2011; Fleming & Doan, 2013), tal como se describen a continuación:

A) Proceso con Arc Hydro Tools:

1. Eliminar las imperfecciones de datos en el mosaico con la herramienta *Fill* generando un archivo Fill.
2. Establecer la dirección del flujo con el procesamiento de la herramienta *Flow Direction* generando un archivo Fdr
3. Cálculo de flujo acumulado con la herramienta *Flow Accumulation*, generando un archivo Fac. En las propiedades de la capa del flujo acumulado se aumenta o

disminuye la visualización de las redes de drenaje, para trabajar a nivel de sub cuencas o microcuencas a escala 1/25000.

4. Definir la red de drenaje con la herramienta *Stream Definition*, generando un archivo Str, la definición de celdas es muy importante (Se debe definir el número de celdas para determinar el tamaño del área de sub cuencas).
5. Segmentar la corriente con la herramienta *Stream Segmentation* que dará como resultado del archivo StrLnk de *Stream Link Grid*.
6. Delimitación de cuencas con la herramienta *Catchment Grid Delineation* en formato ráster con el archivo Cat.
7. Vectorizar las cuencas delimitadas con la herramienta *Catchment Polygon Processing* con el resultado Cat y generar el archivo Catchment.
8. Vectorizar la red de drenaje de formato ráster a vector con la herramienta *Drainage Line Processing* con los resultados de StrLnk y Fdr, saliendo el archivo *Drainage Line*.
9. Procesamiento de Sub cuencas y redes de drenaje con la Herramienta *Adjoint Catchment Processing* y los datos obtenidos de *DrainajeLine* y *Catchment* para generar la salida del archivo *Adjoint Catchment*.
10. El último proceso es delimitar la cuenca de interés, es indicar el punto de salida de la cuenca con la herramienta *PointDelineation,* Además nos piden los datos Fdr, Str, StrLnk, Catchment, AdjointCatchment logrando generar la cuenca de interés sin inconvenientes.

B) Proceso con HEC-GeoHMS:

1. Eliminar las imperfecciones de datos en el mosaico con la herramienta *Fill Sinsks* generando un archivo Fill.
2. Establecer la dirección del flujo con el procesamiento de la *herramienta Flow Direction* generando un archivo Fdr
3. Cálculo de flujo acumulado con la herramienta *Flow Accumulation*, generando un archivo Fac. En las propiedades de la capa del flujo acumulado se reclasifica para

aumentar o disminuir la visualización de las redes de drenaje, para trabajar a nivel de sub cuencas o microcuencas a escala 1/25000.

4. Definir la red de drenaje con la herramienta *Stream Definition*, generando un archivo Str, la definición de celdas es muy importante (Se debe definir el número de celdas para determinar el tamaño del área de sub cuencas).
5. Segmentar la corriente con la herramienta *Stream Segmentation* que dará como resultado del archivo StrLnk de *Stream Link Grid*.
6. Delimitación de cuencas con la herramienta *Catchment Grid Delineation* en formato ráster con el archivo Cat.
7. Vectorizar las cuencas delimitadas con la herramienta *Catchment Polygon Processing* con el resultado Cat y generar el archivo Catchment.
8. Vectorizar la red de drenaje de formato ráster a vector con la herramienta *Drainage Line Processing* con los resultados de StrLnk y Fdr, saliendo el archivo *Drainage Line*.
9. Procesamiento de Sub cuencas y redes de drenaje con la herramienta *Adjoint Catchment Processing* y los datos obtenidos de *DrainajeLine* y *Catchment* para generar la salida del archivo *AdjointCatchment*.
10. Por último, se debe definir el proyecto con un nombre para delimitar la cuenca de interés y para generar el proyecto se debe marcar la ubicación del punto de salida de la cuenca sobre la capa de referencia de Str e ingresar datos Fdr, Str, StrLnk, Catchment, AdjointCatchment; logrando generar la cuenca de interés sin inconvenientes.

Segundo procesamiento: se evalúa las delimitaciones realizadas por los tres DEM ASTER, SRTM y ALOS PALSAR sobre las 07 cartas nacionales con curvas de nivel a escala 1/100000 (formato shape) y se realiza la delimitación manual de la *cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua*, dibujando el perímetro con las herramientas de geoprocesamiento del ArcMap 10,5 con la sobreposición de información cartográfica de la carta nacional a escala 1/25000 (servicio wms), obteniendo la línea del *divortium aquarum* o divisoria de aguas, la cual es una línea imaginaria que divide a las

cuencas adyacentes, con la percepción que el escurrimiento originado por una precipitación se distribuya hacia un punto de salida de la cuenca.

Tercer procesamiento: se procede a vectorizar puntos de control dentro de la delimitación manual de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, los valores de los puntos de control (datos de referencia) son puntos que tienen la identificación de las alturas en la carta nacional a escala de 1/25000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2021). A partir de los puntos control vectorizados, mediante herramientas de procesamiento geoespacial en el software ArcMap 10,5, se procede a extraer los valores de las alturas para cada modelo digital de elevación (datos a evaluar), es decir, puntos con valores de altura de ASTER, SRMT y ALOS PALSAR.

Cuarto procesamiento: Es la evaluación de exactitud posicional de las cinco delimitaciones de cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, es decir: la delimitación por la Autoridad Nacional del Agua, delimitación manual y la delimitación por los DEM ASTER, SRTM y ALOS PALSAR. Este **análisis de datos** nos permite establecer el modelo de delimitación real topográfica e hidrológicamente consistente de la cuenca hidrográfica Ilo–Moquegua a escala 1/60000. En la Tabla 8 se explica la metodología del estándar National Map Accuracy Standard (NMAS), en la Tabla 9 sobre la metodología de Engineering Map Accuracy Standard (EMAS) y en la Tabla 10 se presenta la metodología National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA), descritas en la "Guía para la evaluación de la exactitud posicional de datos espaciales" publicada por el Instituto Panamericano de Geografía e Historia – IPGH (Ariza-López et al., 2021), siendo importante contar con datos de referencia y datos a evaluar, por lo que se identifica puntos con valores de altura topográfica obtenidos de la carta nacional que forman el conjunto de datos de referencia (CDR) y puntos de valores de altura en cada DEM ASTER, SRTM y ALOS PALSAR que forman el conjunto de datos a evaluar (CDE), para lo cual presentamos las tablas mencionadas:

Tabla 8

Estándar NMAS

Método de comparación	Con fuentes de mayor exactitud.

Componente posicional	Horizontal y vertical, separadamente.
Clase de elementos	Puntos bien definidos.
Estándar de exactitud	El estándar propone exactitudes en relación con las escalas del mapa. Exactitud horizontal: • 1/30 de pulgada para mapas en escalas de publicación mayores que E20k (HTol1). • 1/50 de pulgada para mapas en escalas de publicación de E20k o más pequeñas (HTol2). Exactitud vertical: • La mitad del intervalo entre curvas de nivel para todas las escalas de publicaciones (VTol). Al verificar las elevaciones, el error vertical aparente puede disminuirse, suponiendo un desplazamiento horizontal dentro del error horizontal permisible para un mapa de esa escala. **Informe:** Los productos que cumplan con estos requisitos deberán anotar este hecho en sus leyendas de la siguiente manera: «Este mapa cumple con el NMAS»
Descripción	El producto (p) se compara con una referencia de mayor exactitud. Los componentes horizontales y verticales se pueden evaluar por separado. La evaluación vertical está sujeta a la evaluación horizontal. Se utiliza una muestra de n puntos de control bien definidos (sin especificar el valor de n). Exactitud horizontal: no más del 10 por ciento de los puntos probados tendrán un error superior a Tol1 o Tol2 (según la escala). Exactitud vertical: no más del 10 por ciento de los puntos probados tendrán un error superior a VTol.
Procedimiento	1. Seleccionar una muestra. 2. Calcular el error de cada punto en cada componente: $e_{x_i} = x_{p_i} - x_i \qquad e_{y_i} = y_{p_i} - y_i \qquad e_{z_i} = z_{p_i} - z_i$ siendo: x_i, y_i, z_i las coordenadas en el CDR. $x_{p_i}, y_{p_i}, z_{p_i}$ las coordenadas en el CDE. 3. Calcular la componente horizontal de los errores en x, y en cada punto: $e_{H_i} = \sqrt{e_{x_i}^2 + e_{y_i}^2}$ 4. Establecer cuáles son los errores máximos tolerables: Horizontal: 0,085 cm (1/30") en mapas de escala mayor de E20K o de 0,05 cm (1/50") en mapas a escala menor o igual a E20K.

	Vertical: La mitad de la equidistancia entre curvas de nivel. 5. Contar cuántos puntos tienen un error horizontal e_H superior a la tolerancia que aplica al caso de la escala. El control es superado en la componente horizontal si el número de puntos que tienen un error superior a la tolerancia no supera el 10 % de los casos. 6. Contar cuántos puntos tienen un error vertical, e_z, superior a la tolerancia vertical. El control es superado en la componente vertical si el número de puntos que tienen un error superior a la tolerancia no supera el 10 % de los casos.
Fuente	USBB (1947). United States National Map Accuracy Standards. U.S. Bureau of the Budget. Washington, USA, citado por (Ariza-López et al., 2019)

Nota. Tabla del estándar NMAS. Fuente: USBB 1947 citado por (Ariza-López et al., 2019)

Tabla 9

Estándar EMAS

Método de comparación	Con fuentes de mayor exactitud.
Componente posicional	Cada componente, X, Y, Z, separadamente.
Clase de elementos	Puntos bien definidos. Bien distribuidos: separación entre puntos en el rango [1/12, 1/4] de la dimensión diagonal de la cobertura del mapa. Al menos el 15 % de los puntos en cada cuadrante.
Estándar de exactitud	El estándar propone exactitudes en relación con las escalas del mapa. **Informe:** Los productos que cumplan con estos requisitos de exactitud deberán tener en cuenta este hecho en sus leyendas de la siguiente manera: «Este mapa cumple con el EMAS para una escala ____ con límites de error que no excede de ____ metros. Tipo de error X Y Z σ_0 __ __ __ $\lvert\delta_0\rvert$ __ __ __»
Descripción	El producto (p) se compara con una referencia de mayor exactitud. Las componentes X, Y, Z se pueden evaluar por separado. Se utiliza una muestra de al menos 20 puntos de control bien definidos y bien distribuidos. Se utiliza un error absoluto medio límite $\lvert\delta_0\rvert$) en una prueba T-Student para el sesgo. Se considera un valor de desviación típica límite (σ_0) como hipótesis nula de la prueba Chi cuadrado relativa a la dispersión.
Procedimiento	1. Seleccionar una muestra de n puntos, siendo n ≥ 20. 2. Calcular el error de cada punto en cada componente: $e_{x_i} = x_{p_i} - x_i \qquad e_{y_i} = y_{p_i} - y_i \qquad e_{z_i} = z_{p_i} - z_i$

siendo:

x_i, y_i, z_i las coordenadas en el CDR.

x_{p_i}, y_{p_i}, z_{p_i} las coordenadas en el CDE.

3. Calcular el error medio de cada componente:

$$\bar{\bar{e}}_x = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} e_{x_i} \qquad \bar{\bar{e}}_y = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} e_{y_i} \qquad \bar{\bar{e}}_z = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} e_{z_i}$$

4. Calcular la desviación típica muestral en cada componente:

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(e_{x_i} - \bar{\bar{e}}_x\right)^2} \qquad S_y = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(e_{y_i} - \bar{\bar{e}}_y\right)^2}$$

$$S_z = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(e_{z_i} - \bar{\bar{e}}_z\right)^2}$$

5. Efectuar, para cada componente, el test de cumplimiento del estándar para determinar si el error medio es aceptable (que implica ausencia de sesgo). Para ello, se realizará un test sobre la media, bajo el supuesto de varianza poblacional desconocida, estableciendo las siguientes hipótesis:

$$H_0: \mu_\rho = 0 \qquad H_1: \mu_\rho \neq 0$$

El mapa superará el test con un nivel de significación $\propto$ si se cumple que:

$$|t_x| \leq t_{n-1,\alpha/2} \qquad |t_y| \leq t_{n-1,\alpha/2} \qquad |t_z| \leq t_{n-1,\alpha/2}$$

donde:

$t_{n-1,\alpha/2}$ Valor de la distribución t de Student, con n-1 grados de libertad.

t_x, t_y, t_z Resultado de calcular los siguientes estadísticos:

$$t_x = \frac{\bar{\bar{e}}_x\sqrt{n}}{S_x} \qquad t_y = \frac{\bar{\bar{e}}_y\sqrt{n}}{S_y} \qquad t_z = \frac{\bar{\bar{e}}_z\sqrt{n}}{S_z}$$

6. Efectuar, para cada componente, el test de cumplimiento del estándar para determinar si la desviación típica muestral se encuentra entre los límites aceptables. Para ello se realizará un test sobre la varianza, estableciendo las siguientes hipótesis, en relación con un máximo valor de varianza ${\sigma_{0x}}^2$, ${\sigma_{0y}}^2$, ${\sigma_{0z}}^2$ preestablecido y concretado sobre cada componente:

$$H_0: {\sigma^2}_\rho \leq {\sigma_0}^2 \qquad H_1: {\sigma^2}_\rho > {\sigma_0}^2$$

El producto superará el control con un nivel de significación α si se cumple que:

$${X^2}_x \leq {X^2}_{n-1,\alpha} \qquad {X^2}_y \leq {X^2}_{n-1,\alpha} \qquad {X^2}_z \leq {X^2}_{n-1,\alpha}$$

siendo:

${X^2}_{n-1,\alpha}$ Valor teórico de la distribución Chi cuadrado, con n-1 grados de libertad.

${X^2}_x, {X^2}_y, {X^2}_z$ Resultado de calcular los siguientes estadísticos:

	$X_x^2 = \frac{X_x^2(n-1)}{\sigma_{0x}^2};\ X_y^2 = \frac{X_y^2(n-1)}{\sigma_{0y}^2};\ X_z^2 = \frac{X_z^2(n-1)}{\sigma_{0z}^2}$
Fuente	ASCE (1983). Map Uses, scales and accuracies for engineering and associated purposes. American Society of Civil Engineers, Committee on Cartographic Surveying, Surveying and Mapping Division, New York, USA, citado por (Ariza-López et al., 2019)

Nota. Tabla del estándar EMAS. Fuente: ASCE 1983 citado por (Ariza-López et al., 2019)

Tabla 10

Estándar NSSDA

Método de comparación	Con fuentes de mayor exactitud.
Componente posicional	Horizontal y vertical, separadamente.
Clase de elementos	Puntos bien definidos.
Estándar de exactitud	No hay tolerancias, valores limitantes o restricciones similares. Se proporciona un resultado y el usuario debe considerar si es adecuado o no para su propósito. Informe: Se informa de la exactitud estimada al 95 % de confianza tanto para el caso horizontal como vertical. En el producto se debe incluir la leyenda: «Probado __ metros de exactitud horizontal con un nivel de confianza del 95% Probado __ metros de exactitud vertical con un nivel de confianza del 95%»
Descripción	El producto (p) se compara con una referencia de mayor exactitud. Las componentes horizontales y verticales se evalúan por separado. Se utiliza una muestra de al menos 20 puntos de control bien definidos y distribuidos. El NSSDA usa el ECM para estimar la exactitud posicional. La exactitud se informa en distancias terrestres al nivel de confianza del 95 %. Se supone que los errores sistemáticos se han eliminado lo mejor posible. Se supone que los errores se distribuyen normalmente y son independientes en cada componente de error. Se limita la falta de homocedasticidad.
Procedimiento	1. Seleccionar una muestra de n puntos, siendo n ≥ 20. 2. Calcular el error de cada punto en cada componente: $e_{x_i} = x_{p_i} - x_i \qquad e_{y_i} = y_{p_i} - y_i \qquad e_{z_i} = z_{p_i} - z_i$ siendo: x_i, y_i, z_i las coordenadas en el CDR. $x_{p_i}, y_{p_i}, z_{p_i}$ las coordenadas en el CDE. 3. Calcular el error medio cuadrático de cada componente: $ECM_X = \sqrt{\frac{\sum e_{x_i}^2}{n}} \qquad ECM_Y = \sqrt{\frac{\sum e_{y_i}^2}{n}} \qquad ECM_Z = \sqrt{\frac{\sum e_{z_i}^2}{n}}$ 4. Obtener el valor $NSSDA_H$ horizontal:

	si $ECM_X = ECM_Y$	$NSSDA_H = 2{,}4477 \,/\, 2^{1/2} \cdot ECM_r = 2{,}4477 \cdot ECM_X$ donde: $ECM_r = (ECM_X{}^2 + ECM_Y{}^2)^{1/2}$
	si $ECM_X \neq ECM_Y$ y $0{,}6 < (ECM_{min} \,/\, ECM_{max}) < 1{,}0$	$NSSDA_H = 2{,}4477 \cdot 0{,}5 \cdot (ECM_X + ECM_Y)$

5. Obtener el valor NSSDAZ vertical según la siguiente expresión:

$$NSSDA_Z = 1{,}9600 \times ECMZ$$

Fuente	FGDC (1998). FGDC-STD-007: Geospatial Positioning Accuracy Standards, Part 3. National Standard for Spatial Data Accuracy. Federal Geographic Data Committee, Reston, USA. citado por (Ariza-López et al., 2019)

Nota. Tabla del estándar NSSDA. Fuente: FGDC 1998 citado por (Ariza-López et al., 2019)

Quinto procesamiento: Es el análisis de hipsometría por superposición cartográfica y perfiles longitudinales de las cinco delimitaciones de cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, es decir: delimitación manual, delimitación por la Autoridad Nacional del Agua y las delimitaciones por los DEM ASTER, SRTM y ALOS PALSAR, por este segundo **análisis de datos** podremos confirmar y establecer el modelo de delimitación real topográfica hidrológicamente consistente de la cuenca hidrográfica Ilo–Moquegua a escala 1/60000.

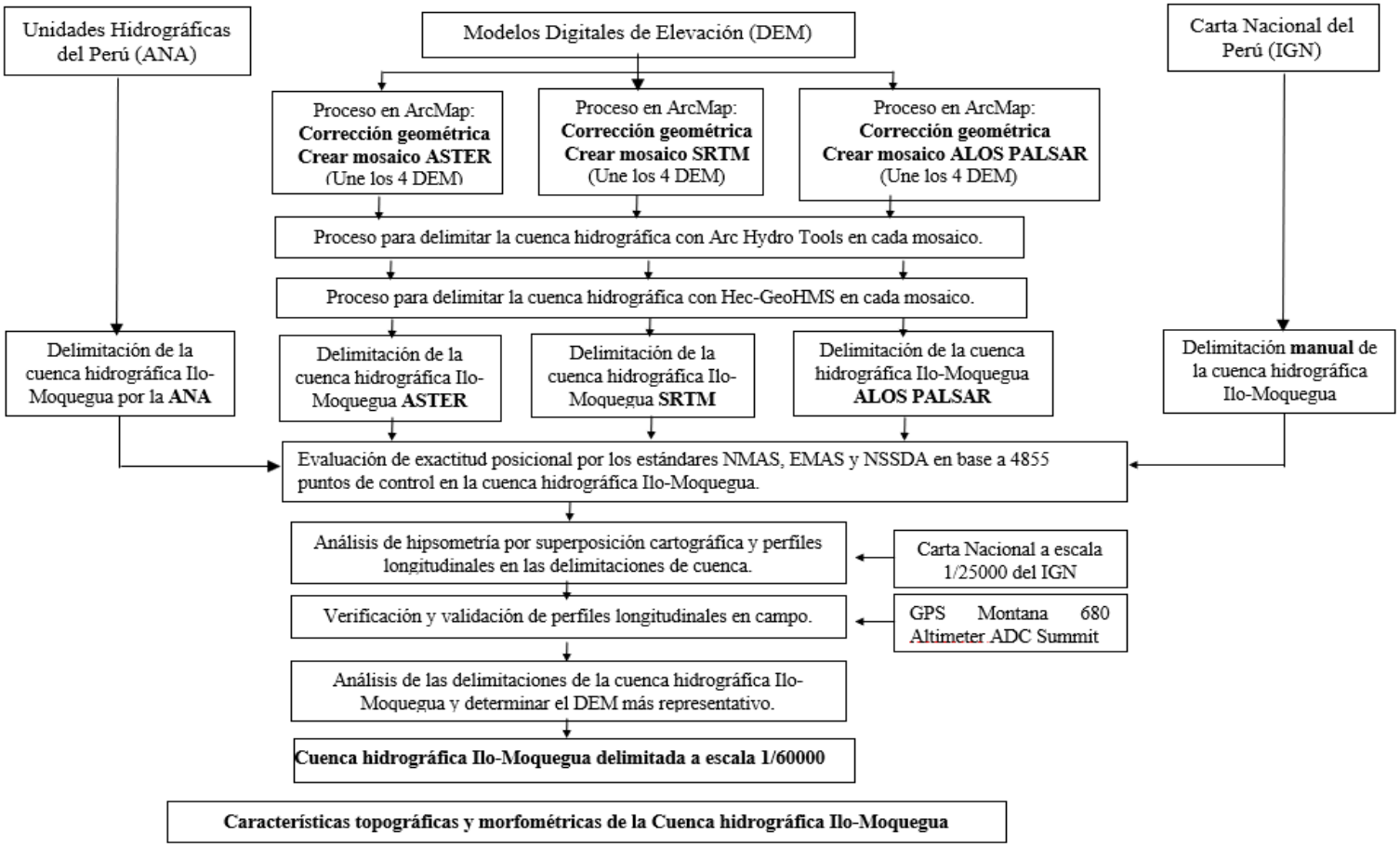
El análisis topográfico, morfométrico e hipsométrico, inicia en la *proyección horizontal* o planta sobre la carta nacional 1/25000, aplicando el método de superposición cartográfica propuesto por McHarg (1969), para identificar las zonas que tengan mayor discrepancia en coincidir entre las cinco delimitaciones de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua. Seguidamente, realizamos el análisis topográfico, morfométrico e hipsométrico en *proyección vertical*, en las zonas identificadas (proyección en planta), donde se trazan líneas de corte sobre la carta nacional con curvas de nivel, para generar las abstracciones de los perfiles longitudinales correspondientes.

Sexto procesamiento: Es la verificación *in-situ* con las salidas a campo sobre las zonas identificadas en gabinete, zonas que tienen mayor discrepancia en coincidir con las cinco delimitaciones de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua. Para ello se utilizó el sensor GPS navegador *Magellan Explorist 510* y el aplicativo *RaceChrono Pro* que permite trazar ruta y perfiles al recorrer las líneas de corte en el terreno.

Séptimo procesamiento: con la validación de los **modelos en gabinete y campo** se determina el límite topográfico, morfológicamente e hidrológicamente consistente de la cuenca hidrográfica Ilo – Moquegua, siendo el más óptimo a la realidad a una escala de 1/60000. Todo el proceso de delimitación real de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, como se observa en la Figura 4.

Figura 4

Metodología para delimitar y determinar las características topográficas de la Cuenca Hidrográfica Ilo-Moquegua



4.5.1.2. Segunda etapa: Caracterización topográfica y morfométrica de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua.

Generada la delimitación real de la cuenca hidrografía Ilo-Moquegua, es posible estudiar sus características topográficas y morfométricas de la cuenca, indicadores importantes sobre la planimetría, forma de la cuenca, características del relieve y sistemas de drenaje, que se obtiene a través de las herramientas de geoprecesamiento espacial y la aplicación de fórmulas sustentadas en los conceptos hidrológicos y topográficos de la cuenca, como Villela & Mattos (1975), Horton (1932), Horton (1945), Schumm (1956), Strahler (1957), entre otros. A continuación, describimos los indicadores:

a) PLANIMETRÍA

Considera los siguientes parámetros:

1° Área de la cuenca (A)

Es el área delimitada por sus divisores topográficos o parteaguas de un sistema de escorrentía que se dirige a un mismo punto de salida, proyectada sobre el plano horizontal (Monsalve Sáenz, 1999). El área de la cuenca hidrográfica es uno de los parámetros básicos que nos permiten calcular otras características físicas de la cuenca y para cuantificar se aplican métodos cartográficos manuales como el método de cuadrícula o el uso de instrumentos mecánicos como un planímetro y en la actualidad mediane software de CAD o SIG (Collischonn & Tassi, 2008). Las áreas de grandes cuencas generalmente se miden en kilómetros cuadrados, mientras que las cuencas más pequeñas generalmente se miden en hectáreas.

2° Perímetro de la cuenca hidrográfica (P)

Es el resultado de la medición longitudinal de la línea formada por el parteaguas, que se expresa en metros o kilómetros (Aristizábal Murillo et al., 2012).

b) FORMA DE LA CUENCA

Es un indicador importante respecto al tiempo de concentración que lleva el agua precipitada desde la delimitación de la cuenca hasta el punto de salida. Se determinó mediante los siguientes parámetros:

3° Índice de Gravelius o Coeficiente de Compacidad (Kc)

Es la relación entre el perímetro de la cuenca y la longitud de la circunferencia de un círculo con un área igual a la cuenca (Monsalve Sáenz, 1999). Determinada por la siguiente ecuación:

$$Kc = 0{,}2821\ P / \sqrt{A} \qquad [1]$$

Donde:

P es el perímetro en Km.

A es el área de cuenca en Km^2

Según Villela & Mattos (1975), si Kc = 1 la forma de la cuenca es un círculo, cuanto más irregular es la cuenca, mayor es el valor de este coeficiente de compacidad y menos sujeto a inundaciones.

4° Factor de forma (Kf)

Es otro índice que indica mayor o menor susceptibilidad a las inundaciones en una cuenca, en la que el K_f más bajo está menos sujeto a inundaciones en comparación con otra del mismo tamaño con un factor de forma más grande (Villela & Mattos, 1975). Está determinada por la siguiente expresión:

$$K_f = A / Lr^2 \qquad [2]$$

Donde:

A = es el área de cuenca en Km^2.

Lr = Longitud axial de la corriente principal (L_c).

c) CARACTERÍSTICAS DEL RELIEVE

La descripción del relieve de una cuenca hidrográfica está representada en los planos o mapas topográficos mediante curvas de nivel y modelos digitales de elevación. El relieve de la cuenca hidrográfica tiene gran influencia en los factores meteorológicos e hidrológicos, así como la velocidad de la escorrentía superficial está determinado por la pendiente del terreno, mientras que la temperatura, precipitación, evaporación entre otras están en función de la altitud de la cuenca, con estas consideraciones se resalta la importancia de los siguientes parámetros:

5° Pendiente media de la cuenca (Dm)

Se determinó mediante el método de cuadrados asociados a un vector. Este método consiste en determinar la distribución porcentual de las pendientes del terreno, mediante una muestra estadística de las pendientes normales a las curvas de nivel de un gran número de puntos dentro de la cuenca (Monsalve Sáenz, 1999) expresada por:

$$Dm = \frac{\sum_{i=1}^{k} (\text{No. de ocurrencias x pendiente media})}{\sum_{i=1}^{k} (\text{No. de ocurrencias i})} \quad [3]$$

Dm = Pendiente media (m / m)

La pendiente que ocurre en un punto i hace que un punto de una intersección de las cuadrículas sea el mismo dado por:

$$Dmi = \frac{\text{Diferencia de elevación entre curvas de nivel}}{\text{Longitud horizontal entre dichas curvas}} \quad [4]$$

6° Curva hipsométrica

Es la curva de área-elevación, información importante y útil para saber la distribución de la cuenca en función de la elevación (Linsley, 1943). Está construida con los valores de las áreas que tienen las curvas de nivel en el mapa topográfico, determinándose respecto al intervalo de curvas definido para su estudio, a ser representado posteriormente en un gráfico de la zona acumulado por encima o por debajo de una cierta elevación y en función de ella. Para la construcción de la curva hipsométrica en la presente investigación, se convirtió los valores encontrados en porcentaje respecto al área total.

7° Polígono de frecuencia de altitudes

Para realizar la representación gráfica se consideró distribuir los porcentajes de las áreas ocupadas por diferentes intervalos de altitud (Chereque Morán, 1989).

8º Elevación media de la cuenca hidrográfica (E)

La elevación media se define por la ordenada promedio de la curva Hipsométrica con respecto al rectángulo equivalente que representa la elevación. Es esta altitud a la que el 50 % del área de la cuenca se ubica por encima de esta altitud y el 50 % por debajo de ella (Villela & Mattos, 1975), que se expresa de la siguiente manera:

$$E = \frac{\sum ea}{A} \quad [5]$$

Donde:

e = elevación media entre dos curvas de nivel contiguas

a = área entre las curvas de nivel contiguas

A = área de la cuenca.

9° Rectángulo equivalente

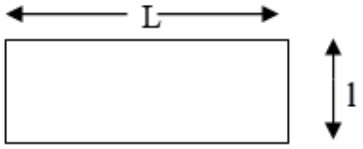
Para construir el rectángulo equivalente al área de la cuenca, se consideró que el lado menor es "l" y el lado mayor es "L". Se elevaron las curvas de nivel paralelas al lado "l", respetando la hipsometría de la cuenca, características del área y perímetro de la cuenca; en estas condiciones tiene el mismo coeficiente de compacidad Kc (Monsalve Sáenz, 1999).

$$A = L * l$$

Donde:

$$L = \frac{kc\sqrt{A}}{1{,}12}\left[1 + \sqrt{\left(1 - \frac{1{,}12^2}{kc^2}\right)}\right] \quad [6]$$

$$l = \frac{kc\sqrt{A}}{1{,}12}\left[1 - \sqrt{\left(1 - \frac{1{,}12^2}{kc^2}\right)}\right] \quad [7]$$



L = Lado más largo del rectángulo (km)

l = Lado pequeño del rectángulo (km)

10° Pendiente del cauce o corriente principal (Sp)

Este parámetro se obtuvo de tres formas según la metodología explicada por (Monsalve Sáenz, 1999).

1. *Pendiente media (S1),* se determina al dividir el desnivel total del cauce entre los puntos superior e inferior del tramo evaluado por su longitud horizontal. Esto se representa en la Figura 5, y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$S_1 = \frac{h_1 - h_0}{L_1 - L_0} \quad [8]$$

h_1 - h_0 = Diferencia de altura del cauce principal
L_1 - L_0 = Longitud horizontal entre los puntos de h1 y h0.

2. *Pendiente media ponderada (S2),* para este cálculo, se utiliza una línea que representa el promedio de la pendiente, de modo que el área delimitada entre esta línea y los ejes sea equivalente al área bajo el perfil real del cauce principal. Este método es útil para reflejar la forma real del perfil longitudinal (Figura 5). La fórmula para la pendiente media ponderada *(S2)* es.

$$S_2 = \frac{h_2 - h_0}{L_1 - L_0} \quad [9]$$

h_2 - h_0 = Diferencia de altura del cauce principal
L_1 - L_0 = Longitud horizontal entre los puntos de h1 y h0.

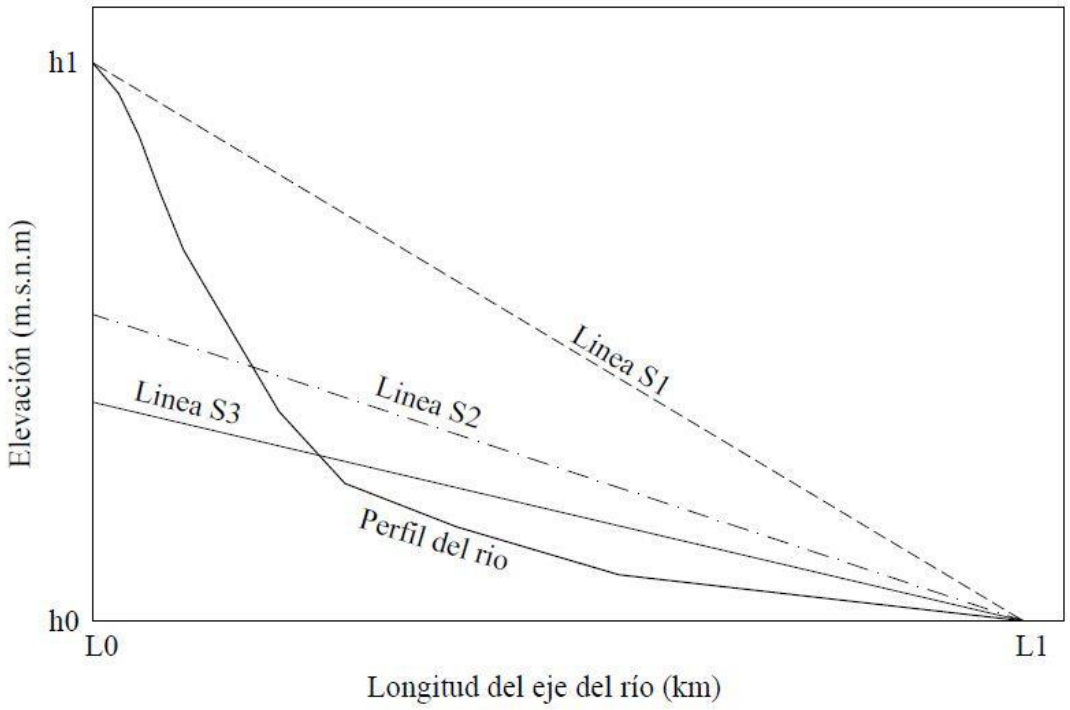
3. *Pendiente equivalente constante (S3)*, este valor proporciona una medida para aproximar el tiempo que el flujo de agua tomaría en recorrer el cauce principal. Para calcular esta pendiente, se descompone el perfil en segmentos lineales, aplicando una media armónica ponderada sobre las raíces cuadradas de las pendientes de cada segmento, usando como ponderación la longitud de cada uno *(S3)* (Figura 5). La pendiente viene dada por:

$$S_3 = \left(\frac{\sum L_i}{\sum \frac{L_i}{\sqrt{s_i}}} \right)^2 \quad [10]$$

Li = Longitud inclinada correspondiente a cada segmento del perfil.
Si = Pendiente por segmento

Figura 5

Pendiente del cauce principal



11º Perfil longitudinal del curso principal

Esta representación gráfica (Figura 6), se realizó con las pendientes que tiene el curso principal en sus diferentes tramos (Linsley et al., 1977).

12º Coeficiente de masividad (Cm)

El índice de este Coeficiente es la relación entre la altitud media de la cuenca y la superficie total de la cuenca (Trujillo et al., 2010; Mármol, 2008). Se determinó con la siguiente fórmula:

$$Cm = \frac{E}{A} \qquad [11]$$

En que:

E = Altitud media de la cuenca (m s. n. m.)

A = Área (km^2)

d) SISTEMA DE DRENAJE

13º Clasificación de cursos de agua

De acuerdo con Villela & Mattos (1975), el conocimiento del sistema de drenaje es de gran importancia para el estudio de las cuencas hidrográficas. Comúnmente se identifican tres tipos de cursos de agua:

a) Perenes: cursos de agua que contienen agua permanente en todo el tiempo del año.

b) Intermitentes: cursos de agua que tienen escurrimiento solo en temporadas de lluvia y están secas durante las temporadas de estiaje.

c) Efímeros: cursos de agua que solo existen durante los periodos de precipitación.

14° Orden de corrientes o cursos de agua

Denominado también número de orden de los ríos que fue introducido por Horton (1945) donde las corrientes de agua reflejan el grado de ramificación dentro de una cuenca, iniciando por cursos de agua no ramificados denominados de primer orden, que forman cursos de segundo orden (cuando se unen dos corrientes de primer orden) y estos forman cursos de tercer orden (cuando se unen dos corrientes de segundo orden) hasta el orden n del orden del río principal que sale de la cuenca.

15° Densidad de corrientes o frecuencia de los ríos (Ds)

Como lo hace notar Aparicio (1992), la densidad de corrientes es la relación entre el número de corrientes o cursos de agua y el área de la cuenca, identificando que las corrientes son perenes e intermitentes, expresado como:

$$D_S = \frac{N_S}{A} \qquad [12]$$

En que:

Ns = Número de corrientes

A = Área de la cuenca (kilómetros cuadrados)

16º Densidad de drenaje (Dd)

Es una expresión de la composición del sistema de cursos de agua en la cuenca, como un factor fisiográfico cuantitativo definido por Horton (1945), que se obtiene

dividiendo la longitud total de corrientes o cursos de agua de la cuenca en kilómetros, entre el área A de la cuenca en kilómetros cuadrados, expresado por:

$$Dd = \frac{Lt}{A} \quad [13]$$

Donde:

Lt = longitud total de corrientes de agua (Km)

A = Área (kilómetros cuadrados)

Desde el punto de vista de Monsalve Sáenz (1999), sostiene que los valores de Dd entre 0.5 km/km2 representan cuencas con drenaje pobre, hasta 3.5 km/km2 para cuencas con buen drenaje.

17° Extensión media de la escorrentía superficial (Em)

Según Monsalve Sáenz (1999), la extensión media de la escorrentía superficial es la distancia promedio que debería escurrir el agua de lluvia en la cuenca, considerándose que el área A de la cuenca representa el área de escorrentía rectangular y Lt la longitud total de corrientes de agua pasando por su centro, en la que la extensión media de la escorrentía es determinada por la siguiente ecuación:

$$Em = \frac{A}{4Lt} \quad [14]$$

Donde:

Lt = longitud total de los ríos (Km)

A = Área (kilómetros cuadrados)

18° Sinuosidad del curso de agua principal (Sc)

Definida como la relación entre la longitud del cauce del río principal, Lc, y la longitud del valle del río principal, Lt, se considera como factor controlador de la velocidad de escorrentía del agua (Villela & Mattos, 1975).

$$Sc = \frac{Lc}{Lt} \quad [15]$$

Donde:

Lc = longitud del río principal (km)

Lt = longitud del valle del río principal (km)

Desde el punto de vista de Linsley et al. (1977), cuando Sc es inferior a 1.25 indica que el curso de agua presenta baja sinuosidad, definiéndose como un curso de agua *de alineamiento recto*.

19° Coeficiente de torrencialidad (Ct)

Es una variable de intensidad fluvial que determina la influencia de la torrencialidad en la cuenca; está representada por la relación entre el número de cursos de agua de primer orden y el área total de la cuenca (Romero Díaz & López Bermúdez, 1987), expresado como:

$$\mathrm{Ct} = \frac{\mathrm{R1}}{\mathrm{A}} \qquad [16]$$

En que:

R1 = Número de cursos de agua de primer orden

A = Área (km2)

20. Tiempo de concentración (Tc)

Es uno de los parámetros utilizados para el cálculo de la precipitación-escorrentía en la cuenca, se define como el tiempo que transcurre una gota de agua de lluvia en escurrir superficialmente, desde el momento en que cae en el punto más lejano del límite de cuenca al punto de salida (Fattorelli & Fernández, 2011). Existen varias fórmulas planteadas por diversos investigadores; como referencia presentamos la ecuación de Témez, aplicado a cuencas hidrográficas con superficies desde 1 a 3000 km2 y tiempos de concentración desde 0,25 a 24 horas (Témez Peláez, 1992).

$$Tc = 0{,}3 \times \left(\frac{L}{S^{0{,}25}}\right)^{0{,}76} \qquad [17]$$

En que:

Tc = tiempo de concentración en horas.

L = longitud del cauce principal en km.

S = pendiente promedio del cauce principal m/m.

4.5.2. Para el segundo objetivo

Para cumplir con el segundo objetivo se considera dos etapas, la primera es el cartografiado de la distribución espacial de las clases del uso y cobertura correspondientes a los años 1972, 2012 y 2023 y segunda el análisis de tendencias espaciales de los cambios en el uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua entre los años 1972, 2012 y 2023:

4.5.2.1 Cartografiado de la distribución espacial de las clases del uso y cobertura de la tierra para los años 1972, 2012 y 2023.

Para esta etapa del cartografiado de la distribución espacial se debe ejecutar diferentes geoprocesamientos, agrupados en dos grandes procesamientos:

Primer procesamiento: Preparación de los datos

Después de haber recolectado la información de fotografías aéreas e imágenes satelitales correspondientes a cada periodo, se procede a realizar la **preparación de datos** o el **preprocesamiento de datos** que comprende geoprocesamientos diferentes para fotografías aéreas e imágenes de satélite.

a) Para fotografías aéreas:

1. Georreferenciación de las fotografías aéreas

Identificación de Puntos de Control (GCPs): Selecciona puntos de referencia visibles en las imágenes de 1972 escaneadas con resolución de 600 DPI y que se mantengan identificables en mapas o imágenes georreferenciadas actuales, que en nuestro caso utilizamos las imágenes georreferenciadas disponibles en ArcMap.

Asignación de Coordenadas a los GCPs: Registra las coordenadas correspondientes para cada punto en un sistema adecuado, como UTM.

Aplicación de transformación geométrica: Utilizamos el software ArcGIS para transformar las imágenes en función de los GCPs, asegurando una precisión adecuada en la georreferenciación.

Validación de la georreferenciación: La transformación de la aerofotografía se realiza por el método ***spline***, de siete métodos en base al cálculo del error cuadrático medio (RMS) y ajusta los GCPs para mejorar la precisión.

2. Generación de mosaico

Ajuste de brillo y contraste: Igualar el brillo y el contraste entre imágenes adyacentes para minimizar las diferencias visuales.

Empalme y superposición: Organizar las imágenes para que se alineen correctamente en las áreas de solape y aplicar un empalme que minimice los bordes visibles.

Creación del mosaico: Generar un archivo de mosaico continuo en un formato como GeoTIFF, el cual será la base para el análisis.

3. Preparación para la clasificación mediante vectorización

Mejora de contraste y filtrado de ruido: Ajusta el contraste y aplica filtros suaves para mejorar la visibilidad de los bordes en las imágenes en blanco y negro.

b) Para imágenes de satélite:

El preprocesamiento de imágenes satelitales se realizó ArcMAP, aplicando varias herramientas específicas que facilitan la corrección, mejora y preparación de las imágenes para el análisis.

1. Selección de bandas

Con la descarga de las imágenes de satélite Landsat 1 (19172), Landsat 7 (2012) y Sentinel2-A (2023), asegurándonos de que cubran completamente el área de estudio, iniciamos la clasificación precisa, con la recomendación de utilizar las bandas que resaltan las características específicas de las clases de cobertura. Las B**andas**

recomendadas: Las bandas visibles (rojo, verde y azul), NIR (infrarrojo cercano) y SWIR (infrarrojo de onda corta) son útiles para la discriminación de coberturas de suelo, por ejemplo, para el color natural:

Para imágenes Landsat 1: se utiliza la combinación de bandas 3, 2, 1.

Para imágenes Landsat 7: se utiliza la combinación de bandas 3, 2, 1.

Para imágenes Sentinel2-A: se utiliza la combinación de bandas 4, 3, 2.

2. Corrección radiométrica

Ajusta los valores de reflectancia de las bandas para reducir errores asociados a la iluminación y las condiciones atmosféricas. La corrección atmosférica es esencial para obtener resultados más consistentes y precisos. Utilizamos las siguientes herramientas:

Radiometric Correction (Corrección Radiométrica): herramienta para corregir efectos atmosféricos y mejorar la precisión de los valores de reflectancia.

*Raster Calculator (Calculadora Ráster)***:** Permite aplicar fórmulas y expresiones para convertir los valores digitales en reflectancia de superficie. Por ejemplo, convertir valores de píxeles Landsat en reflectancia utilizando fórmulas específicas.

Composite Bands (Composición de Bandas): Una vez corregidas las bandas, esta herramienta te permite combinarlas en una sola imagen multibanda, útil para la clasificación y el análisis.

3. Corrección geométrica

Las imágenes Landsat y Sentinel2-A suelen estar georreferenciadas, es prioritario verificar que las coordenadas se ajusten al sistema de referencia utilizado previamente (por ejemplo, UTM Zona 19 Sur). Utilizamos las siguientes herramientas:

Georeferencing (Georreferenciación): para ajustar la imagen en función de puntos de control que tengan coordenadas conocidas. Esto es útil para asegurar que la imagen esté correctamente alineada en el espacio.

Warp (Deformación): realiza la transformación geométrica a la imagen para ajustarla a un sistema de coordenadas específico. Es útil si la imagen no se alinea correctamente con otros datos geoespaciales.

4. Composición de bandas y creación de índices

Composición en Falso Color: Crea una combinación de bandas (por ejemplo, NIR, rojo y verde) que realce la vegetación y las características del suelo, facilitando la diferenciación entre clases como agricultura, agua, y áreas naturales.

Para la lo cual se utiliza la herramienta *Composite Bands (Composición de Bandas)* permitiendo combinar múltiples bandas en una sola imagen multibanda. Es especialmente útil en Landsat y Sentinel2-A, para crear combinaciones de bandas en falso color (como NIR, rojo y verde) que mejoran la diferenciación de coberturas.

Índices Espectrales: Calcula índices como NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) y NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada) para mejorar la identificación de clases específicas.

- **NDVI:** Es útil para distinguir la vegetación natural y agrícola.
- **NDWI:** Facilita la identificación de cuerpos de agua.

Para la lo cual se utiliza la herramienta *Raster Calculator (Calculadora Ráster)* para calcular índices espectrales, como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) o el NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada), lo cual ayuda a resaltar características específicas como vegetación y agua.

- **Ejemplo de fórmula para NDVI:** (NIR - Red) / (NIR + Red)
- **Ejemplo de fórmula para NDWI:** (Green - NIR) / (Green + NIR)

5. Filtrado y suavizado

Focal Statistics (Estadísticas Focales): Permite aplicar filtros para suavizar o resaltar detalles en la imagen. Se usa el filtro promedio para reducir el ruido en áreas homogéneas o aplicar un filtro de mediana para preservar bordes.

Filter (Filtro): ArcMAP cuenta con filtros específicos, como el filtro de mediana y el filtro de mayoría, que son útiles para suavizar la imagen sin perder detalles importantes. Estos filtros ayudan a reducir el ruido antes de la clasificación.

6. Reproyección y Ajustes de Coordenadas

Project Raster (Proyectar Ráster): Esta herramienta reproyecta la imagen en un sistema de coordenadas específico. Es crucial para asegurar que las imágenes estén en el mismo sistema de referencia espacial que otros datos, como las imágenes de 1972.

Define Projection (Definir Proyección): En caso de que la imagen no tenga información de proyección, esta herramienta asigna una proyección sin reproyectar los píxeles. Es una herramienta preliminar importante en el preprocesamiento.

7. Ajuste de Contraste y Brillo

Stretch (Estiramiento): Para mejorar el contraste de la imagen, se aplica diferentes tipos de estiramiento (mínimo-máximo, percentil, desviación estándar) que realzan los detalles de la imagen, mejorando la visibilidad de los elementos para la interpretación visual y la clasificación.

Image Analysis Window (Ventana de Análisis de Imágenes): En esta ventana de ArcMAP, se realiza ajustes de contraste y brillo en tiempo real. Esto es útil para visualizar y mejorar detalles antes de proceder con la clasificación o la exportación de la imagen.

8. Creación de Mosaico

Mosaic To New Raster (Mosaico a Nuevo Raster): Como se tiene múltiples imágenes que cubren un área de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, esta herramienta une las imágenes en un solo ráster. Permite ajustar el brillo y color en las áreas de solape para obtener una transición suave entre imágenes.

Mosaic Dataset (Conjunto de Datos de Mosaico): como se tiene varias imágenes que cubren cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, se crea un dataset de mosaico, lo cual facilita la gestión de grandes volúmenes de datos satelitales sin generar un archivo único de gran tamaño.

9. Máscaras y Recorte del área de estudio

Extract by Mask (Extraer por Máscara): aplicamos esta herramienta para recortar el mosaico de la imagen satelital a una zona específica de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, utilizando la capa vectorial como máscara. Esta herramienta es útil para delimitar el área de análisis a la zona de estudio, reduciendo así el tamaño del archivo y acelerando los procesos de análisis.

Clip Raster (Recortar Raster): Similar a la anterior, esta herramienta recorta la imagen satelital a un área definida, lo cual facilita el análisis centrado en la zona de interés.

Segundo procesamiento: Clasificación y vectorización de las imágenes

Para la clasificación del uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua se utilizó la **Clasificación Supervisada con el Algoritmo de Máxima Verosimilitud** en ArcMap, siendo una técnica robusta para clasificar imágenes en clases de uso y cobertura de la tierra, como las seis categorías en análisis (Infraestructura urbana, Minería, Agricultura, Bofedal, Agua y Natural). A continuación, se detallan los pasos específicos que se aplica a este proceso en ArcMap:

1. Preparación del proyecto y selección de imágenes

- Aseguramos tener las bandas necesarias de la imagen satelital de acuerdo al periodo de análisis 1972, 2012 o 2023 ya preprocesadas en la etapa anterior, considerando las características de cada sensor:

  Landsat 1 (1972): La resolución espacial es de 60 metros y cuenta con cuatro bandas (visible e infrarrojo cercano). Esta resolución limita la precisión en la clasificación, especialmente para identificar detalles en coberturas pequeñas como

infraestructura urbana. Por ello, se realizan las correcciones de precisión con las fotografías aéreas.

Landsat 7 (2012): La resolución espacial es de 30 metros, y ofrece bandas adicionales en el infrarrojo medio (SWIR) y térmico, además del infrarrojo cercano, lo que mejora la capacidad para diferenciar entre coberturas como agua, vegetación y suelo expuesto, por ello se realiza las correcciones de precisión con el mosaico de imágenes de satélite del Google Earth.

Sentinel-2A (2023): La resolución espacial es de 10 metros en bandas visibles y de infrarrojo cercano, con otras bandas en 20 metros para SWIR y red-edge. Esta resolución y el número de bandas facilitan la clasificación detallada y precisa de coberturas.

- Cargamos las imágenes preprocesadas del periodo a clasificar en ArcMap y selecciona una combinación de bandas adecuada para diferenciar las clases de cobertura, de acuerdo a las características del sensor:

  Landsat 1 (1972): Dado que cuenta solo con cuatro bandas, utiliza las disponibles en el visible e infrarrojo cercano. Calculamos los índices básicos como el NDVI para diferenciar áreas de vegetación, aunque la falta de bandas en SWIR y red-edge limita la diferenciación precisa.

  Landsat 7 (2012): Aprovechamos las bandas como el SWIR (banda 5 y 7) para diferenciar mejor entre vegetación y suelo expuesto o áreas mineras. El uso del NDVI y del NDWI puede mejorar la clasificación de vegetación y cuerpos de agua, respectivamente.

  Sentinel-2A (2023): Utilizamos las bandas de 10 metros para las áreas de interés más detalladas. Los índices de vegetación (NDVI) y agua (NDWI) son más precisos gracias a la alta resolución, y las bandas red-edge permiten diferenciar mejor entre distintas clases de uso y cobertura de la tierra.

2. Definición de áreas de entrenamiento

- **Creación de una clase de entidades de entrenamiento (Training Samples):**

  En **ArcCatalog** o al **Catálogo en ArcMap** y creamos un nuevo Shapefile o una Geodatabase para almacenar las áreas de entrenamiento. Define el tipo de geometría como **polígono**.

- **Dibujo de áreas representativas para cada clase:**

  En el **Editor** de ArcMap, creamos polígonos en áreas de la imagen que sean representativas y homogéneas para cada una de las clases de cobertura (Infraestructura urbana, Minería, Agricultura, Bofedal, Agua y Natural).

  Aseguramos de incluir múltiples áreas de muestra para cada clase para mejorar la precisión del modelo. Es importante que las muestras sean lo más representativas y puras posibles.

3. Asignación de atributos a las áreas de entrenamiento

- **Atributo de clase:**

  En la tabla de atributos del archivo de entrenamiento, creamos un campo llamado "Clase" o similar. Asignamos a cada polígono un valor numérico o una etiqueta que identifique la clase de cobertura a la que pertenece (por ejemplo, 1 para Infraestructura urbana, 2 para Minería, etc.).

- **Verificación de muestras:**

  Revisamos cada polígono para asegurarnos de que represente correctamente su clase y que no incluya píxeles de otras coberturas.

4. Herramienta de clasificación supervisada con máxima verosimilitud

- **Abrir la herramienta de clasificación de imágenes:**

  Nos dirigimos a Arctoolbox > Spatial Analyst Tools > Multivariate > Maximum Likelihood Classification.

- **Configuración de la herramienta:**

  Ráster de entrada: Seleccionamos el ráster compuesto que contiene las bandas de la imagen preprocesada.

  Archivo de entrenamiento (Training Samples): Seleccionamos el shapefile o clase de entidad que contiene las áreas de entrenamiento.

  Número de clases: Indicamos el número de clases de cobertura (en este caso, 6 clases) que representan el uso y cobertura de la tierra en nuestra área de estudio.

5. Ejecución y generación del ráster clasificado

- Ejecutamos la herramienta para aplicar el algoritmo de Máxima Verosimilitud. El resultado será un ráster clasificado donde cada píxel se asigna a una de las seis clases de cobertura en función de la probabilidad estadística.

- **Revisión del ráster clasificado:** Visualizamos el ráster clasificado en ArcMap para verificar que las clases de cobertura se hayan asignado correctamente en las áreas de interés.

6. Evaluación de la precisión de la clasificación

- **Creación de puntos de verificación:** Seleccionamos una muestra de puntos de verificación en el ráster clasificado y comparamos con datos de referencia (por ejemplo, verificando áreas conocidas en el campo o usando datos de mapas previos).

- La verificación de la interpretación del primer período de 1972 y 2012 se realiza con fotografías aéreas e imágenes de alta resolución de Google Earth Pro respectivamente.

- Para la verificación e interpretación del segundo período en 2023 con las imágenes de Sentinel2-A, realizamos salidas a campo para verificar la exactitud de la interpretación temática de acuerdo a la Tabla 11.

Tabla 11

Clave de interpretación de las clases de uso y cobertura.

Clase de uso y cobertura	Polígonos verificados	Imagen
Agricultura		
Agua		
Bofedal		
Infraestructura Urbana		

Minería		
Natural		

Para la selección de puntos se utiliza el Método de Congalton y Green (Congalton & Green, 2019) que se considera mínimo de 50 puntos por clase:

Puntos totales =Numero de clases × 50

En nuestro caso tenemos 6 clases por lo que tendremos 300 puntos totales.

Y la precisión general está dado por:

Precisión General = (Puntos Correctos / Total de Puntos) × 100

7. Exportación de la clasificación

- **Exportación del ráster clasificado:** Guardamos el resultado en formato GeoTIFF o en una geodatabase para realizar más análisis en ArcGIS o compartir los datos con otros softwares y la conversión a formato vector.

8. Post-procesamiento de la clasificación

- **Filtrado de píxeles aislados:** Aplicamos un filtro de mayoría (majority filter) para eliminar píxeles aislados y unificar áreas contiguas dentro de la misma clase de cobertura.
- **Corrección manual de errores:** En caso de errores evidentes en la clasificación, realiza ajustes manuales para asegurar que las áreas grandes y homogéneas estén correctamente clasificadas. Para estas correcciones se convierten datos ráster en

capas vectoriales y delimitar clases de uso y cobertura de la tierra con apoyo de las fotografías aéreas o imágenes de Google Earth, dependiendo del periodo 1972 o 2012.

9. Generación de mapas temáticos

- **Mapas temáticos de 1977, 2012 y 2023:** Creamos los mapas temáticos para cada periodo 1977, 2023 y 2023.

4.5.2.2 Análisis de tendencias espaciales de los cambios en el uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua entre los años 1972, 2012 y 2023.

Para el análisis de variación espaciotemporal y tendencias de cambio de uso y cobertura de la tierra en los periodos 1972-2012-2023 utilizando el software TerrSet y Microsoft Excel. A continuación, describo los pasos principales:

1. Preparación de datos y preprocesamiento

- *Organización de mapas clasificados*: Verificamos que los mapas de uso y cobertura de 1972, 2012 y 2023 estén en el mismo sistema de referencia y con la misma resolución espacial. Los mapas deben tener las mismas clases de cobertura en todos los periodos.
- *Exportación a formato compatible*: Convertimos los mapas a formato GeoTIFF o IDRISI (.rst), que es el formato nativo de TerrSet. La conversión se realiza desde ArcMAP antes de importarlos a TerrSet.

2. Importación y Configuración de los Mapas en TerrSet

- *Importar mapas clasificados*: Usamos la herramienta Import/Export de TerrSet para cargar los mapas de cada periodo.
- *Asignación de clases de cobertura*: En TerrSet se dispone del módulo Land Change Modeler (LCM), donde se definen las clases de cobertura en los mapas, asegurándonos de que tengan el mismo código de clase y nomenclatura en todos los periodos (por ejemplo, 1 = Infraestructura urbana, 2 = Agricultura, etc.).

3. Análisis de cambios espaciotemporales

- *Acceder a la herramienta CROSSTAB del software de TerrSet*: En TerrSet, se selecciona la herramienta CROSSTAB y selecciona los mapas de uso y cobertura para los periodos 1972-2012 y 2012-2023. También se puede realizar el análisis de cambios por medio del modelo Land Change Modeler (LCM).
- *Evaluación de cambios por clases*:
    - CROSSTAB genera un análisis de cambios de uso y cobertura mostrando las transiciones entre clases. Configura el análisis para obtener una tabla que muestre las áreas de cambio entre clases de 1972 a 2012 y de 2012 a 2023.
    - Observa las transiciones más significativas (por ejemplo, de “Natural” a “Infraestructura urbana” o de “Agricultura” a “Infraestructura urbana”).
- Mapas de cambios y matrices de transición: Genera mapas de cambio para visualizar las áreas que experimentaron transformación. El LCM también permite construir matrices de transición que detallan los cambios entre cada clase, lo cual es fundamental para identificar patrones y calcular tasas de cambio.
- *Matriz de tabulación cruzada*: Propuesta por Pontius et al. (2004), conocida también como matriz de transición o matriz de confusión, para identificar los patrones de cambio de uso y cobertura de la tierra. Esta matriz se presenta en la Tabla 12, donde cada fila representa una categoría del mapa en el primer tiempo (T1) y cada columna representa una categoría del mapa en el segundo tiempo (T2). La diagonal principal muestra las áreas que permanecen sin cambios entre T1 y T2, mientras que los valores fuera de la diagonal indican las transiciones que ocurrieron entre T1 y T2 en cada categoría. La fila denominada "Total Tiempo 2" resume el total de área ocupada por cada categoría en T2 (P+nP+nP+n), y de forma similar, la columna "Total Tiempo 1" muestra el total ocupado por cada categoría en T1 (Pn+Pn+Pn+). La última fila indica los valores de incremento en cada categoría entre T1 y T2, mientras que la última columna muestra los valores de decremento para cada categoría en el mismo periodo.

Tabla 12

Matriz de tabulación cruzada

	Tiempo 2				Total Tiempo 1	Disminución
	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4		
Tiempo 1						
Categoría 1	P11	P12	P13	P14	P1+	P1+ - P11
Categoría 2	P21	P22	P23	P24	P2+	P2+ - P22
Categoría 3	P31	P32	P33	P34	P3+	P3+ - P33
Categoría 4	P41	P42	P43	P44	P4+	P4+ - P44
Total	P+1	P+2	P+3	P+4	1	
Tiempo 2						
Aumento	P+1 - P11	P+2 - P22	P+3 - P33	P+4 - P44		

Nota. Esta tabla ilustra el método de tabulación cruzada utilizado para detectar cambios temporales en las categorías de uso de la tierra y sus transiciones.

- *Coeficiente Kappa*: Se utilizó el coeficiente Kappa para medir la solidez de la concordancia, con valores que oscilan entre -1 y +1. Cuanto más próximo a 1 sea el valor, mayor es la concordancia, indicando una correspondencia perfecta. En cambio, un valor cercano a 0 refleja una concordancia débil (Cerda y Villarroel, 2008). En la tabla 13 se presentan los valores del coeficiente de Kappa.

Tabla 13

Valores del coeficiente de Kappa

Coeficiente Kappa	Fuerza de Concordancia
<0,20	Pobre
0,21 – 0,40	Débil
0,41 – 0,60	Moderada
0,61 – 0,80	Buena
0,81 – 1,0	Casi Perfecta

*Nota. Información t*omada de Cerda y Villarroel (2008).

4. Cálculo del Índice de Dinámica Temporal y Tasas de cambio anual de uso y cobertura de la tierra

Para calcular las Tasas de cambio anual en ha/año y tasa de cambio anual en %/año y el Índice de Dinámica Temporal (IDT), se utiliza algunas fórmulas específicas. Estas permiten cuantificar el ritmo y la dinámica de las transiciones entre clases de cobertura en los periodos de tiempo identificados. A continuación, se detallan las fórmulas:

- *Cambio de categoría (ha)*: se utiliza para calcular la diferencia entre los periodos identificados. Es especialmente útil para comparar la intensidad de cambio entre diferentes periodos.

$$\text{Cambio de categoría (ha)} = (S^2 - S^1) \quad [18]$$

Donde:

S^2: superficie en la fecha 2

S^1: superficie en la fecha 1

- *Índice de Dinámica Temporal*: Este índice integra componentes temporales y espaciales del cambio, indica la proporción de superficie que cambia anualmente en relación con el área inicial. Se usa la siguiente fórmula:

$$IDT = \frac{(S^2 - S^1)}{S^1 \times t} \times 100 \quad [19]$$

Donde:

S^2: superficie en la fecha 2

S^1: superficie en la fecha 1

t: intervalo de tiempo en años

- *Tasa de cambio anual ha/año*: es una métrica absoluta (en hectáreas), indica la magnitud promedio del cambio en términos absolutos por año.

$$\text{Cambio anual (ha/año)} = \frac{(S^2 - S^1)}{t} \quad [20]$$

Donde:

S^2: superficie en la fecha 2

S^1: superficie en la fecha 1

t: intervalo de tiempo en años

- *Tasa de cambio anual %/año*: es una métrica fundamental que describe el ritmo de cambio relativo de una categoría de uso y cobertura de la tierra, utilizaremos la fórmula de la FAO (1996), ampliamente respaldada científicamente, utilizada en análisis a largo plazo, ya que considera el cambio de manera acumulativa o compuesta. Se ajusta bien a datos donde el crecimiento o disminución no es lineal.

$$T_c = \left(\left(\frac{S^2}{S^1}\right)^{\frac{1}{n}} - 1\right) \times 100 \quad [21]$$

Donde:

T_c: tasa de cambio anual en %

S^2: superficie en la fecha 2

S^1: superficie en la fecha 1

n = número deaños de diferentcia entre los dos fechas

4.5.3. Para el tercer objetivo

Para la validación de los resultados de la simulación y validación del modelo de uso y cobertura de la tierra del 2023, será con la clasificación de campo del 2023.

Para la simulación y validación del modelo de 2023 se debe considerar:

- Usar los mapas de potencial de transición para simular las coberturas del año 2023.
- Comparar el mapa proyectado de 2023 con el mapa histórico de 2023 para evaluar la precisión del modelo.
- Utilizar métricas de validación como:

- **Índice Kappa**: Para medir la concordancia entre los mapas.
- **Matriz de confusión**: Para identificar los errores de omisión y comisión.

4.5.4. Para el cuarto objetivo

Una vez obtenida la proyección del mapa de uso y cobertura de la tierra para 2040 mediante el Land Change Modeler de TerrSet IDRISI, recopilamos los datos del área en hectáreas para seis categorías (Agricultura, Agua, Bofedal, Infraestructura Urbana, Minera y Natural) correspondientes a los años 1972, 2012, 2023 y 2040. Estos datos fueron procesados en Google Colab utilizando Python, donde se estandarizaron y se ajustó un modelo de regresión cuadrática, considerado más adecuado que los modelos lineal y cúbico, ya que permite capturar aceleraciones y desaceleraciones en los cambios. Finalmente, se representó la línea de regresión cuadrática ajustada para visualizar la tendencia proyectada.

CAPÍTULO V
RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

5.1. Delimitación y caracterización topográfica y morfométrica de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua

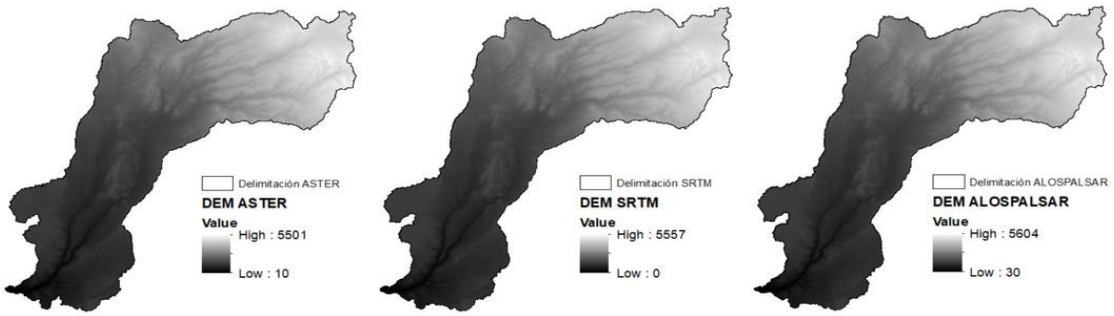
Los resultados se presentan de acuerdo a las etapas descritas en el proceso metodológico, mostrando primero el límite topográfico y morfométrico, hidrológicamente consistente, más próximo a la realidad, y después las características topográficas y morfométricas de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua.

5.1.1. Delimitación de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua.

Los resultados del **primer procesamiento** sobre la delimitación de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua a partir de los tres modelos digitales del terreno mostradas en la Figura 6, se identifica que los valores de altitudes extremas son diferentes, es decir, las altitudes mínimas que se encuentran próximas al Océano Pacífico y altitudes máximas en la Cordillera Occidental de los Andes, encontrándose ASTER de 10 a 5501 metros, en SRTM de 0 a 5557 metros y en ALOS PALSAR de 30 a 5604 metros.

Figura 6

Delimitación de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua por modelos digitales del terreno



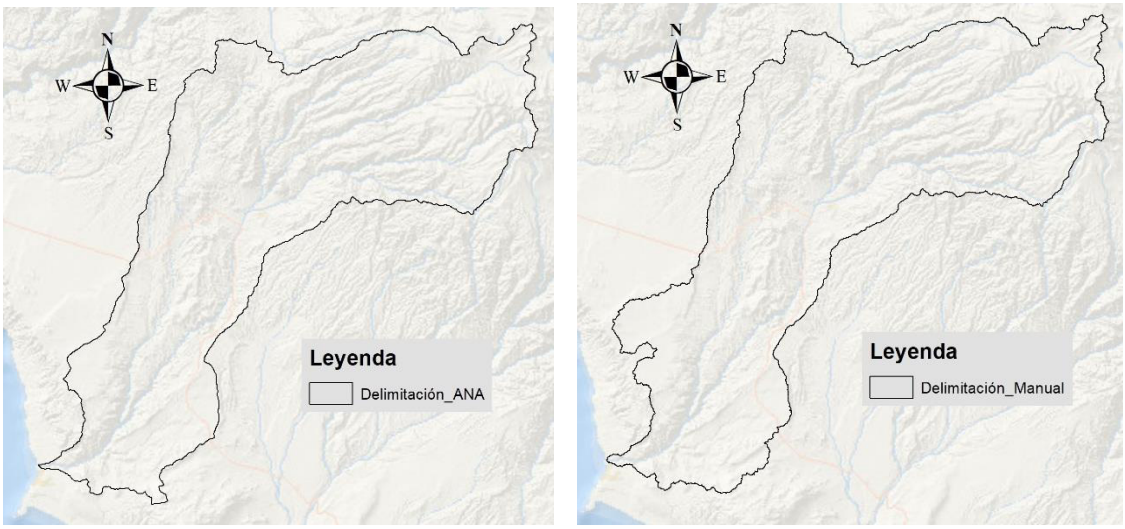
Nota. a) Delimitación por el DEM ASTER, b) Delimitación por el DEM SRTM y c) Delimitación por el DEM ALOS PALSAR

Las delimitaciones de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua en los DEM ASTER, SRMT y ALOS PALSAR determinaron áreas de 3523,35 km^2, 3532,49 km^2 y 3530,69 km^2

respectivamente, cantidades que son grandes y próximas con una media de 3528,84 km^2 y desviación estándar de 3,95 km^2, comparadas con la delimitación realizada por la ANA que tiene un área de 3406,57 km^2 y el **resultado del segundo procesamiento** sobre la delimitación manual tiene un área de 3535,31 km^2, mostradas en la Figura 7.

Figura 7

Delimitación de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua por la ANA y delimitación manual



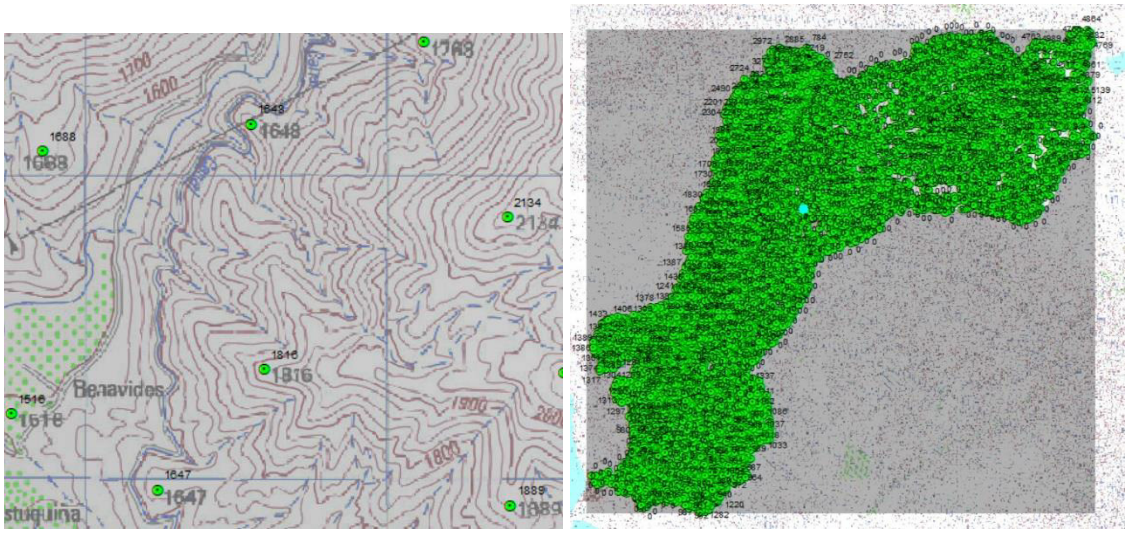
(a) (b)

Nota: a) Delimitación de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua por la ANA. b) Delimitación manual de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua.

Los resultados del **tercer procesamiento**, es la vectorización de 7245 puntos de control como se observa en la Figura 8, que forman parte del conjunto de datos de referencia, son puntos que tienen la identificación de las alturas en la carta nacional a escala de 1/25000, así mismo se extrajo los valores de las alturas para cada modelo digital de elevación (datos a evaluar) es decir 7245 puntos de ASTER, 7245 puntos de SRMT y 7245 puntos de ALOS PALSAR y posterior tratamiento de datos en las hojas de cálculo de Microsoft Excel tal como se aprecia en la Figura 9.

Figura 8

Vectorizado de los puntos de control



Nota. a) Vectorizado de los puntos de control sobre la carta nacional 1/25000. b) 7245 puntos de control vectorizados en la delimitación manual de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua.

Figura 9

Tratamiento de datos de puntos de control

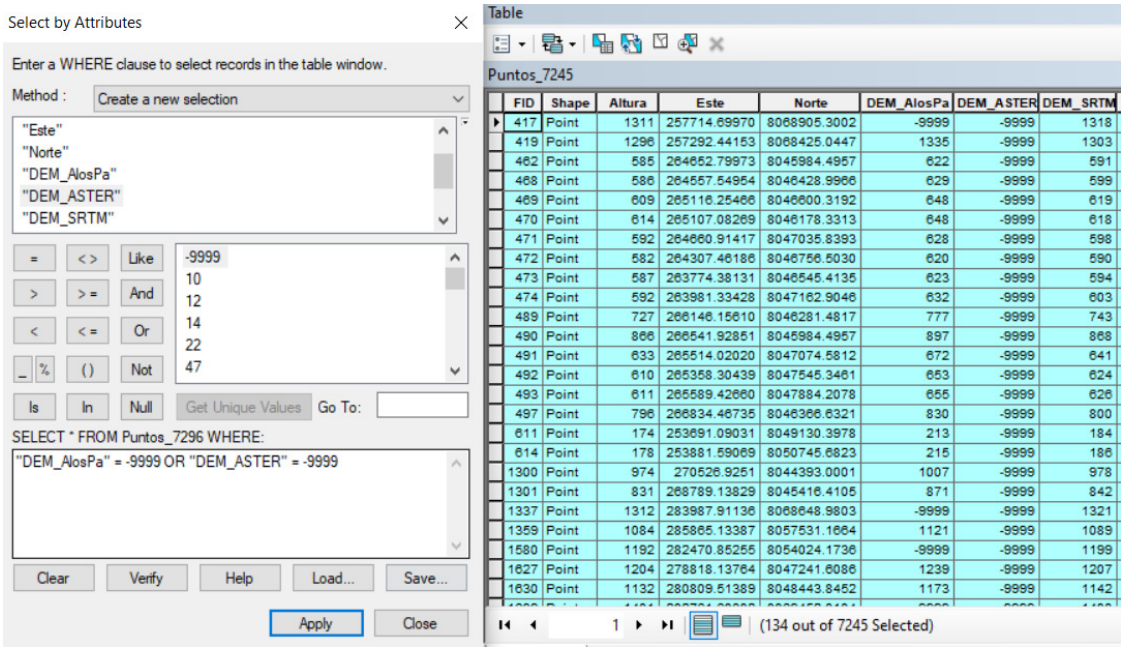
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Altura	geometry	SRTM	AlosPalsa	ASTER	Diff_SRTM	Diff_AlosPa	Diff_ASTI
2	156	POINT (264031	171	201	157	15	45	1
3	177	POINT (264254	189	217	163	12	40	-14
4	178	POINT (265127	194	224	188	16	46	10
5	197	POINT (265648	211	242	208	14	45	11
6	202	POINT (265838	217	248	206	15	46	4
7	207	POINT (266044	222	253	216	15	46	9
8	222	POINT (266736	239	271	224	17	49	2
9	226	POINT (267121	242	273	232	16	47	6
10	237	POINT (263872	246	275	243	9	38	6
11	238	POINT (265868	247	274	227	9	36	-11
12	242	POINT (264795	253	283	245	11	41	3
13	259	POINT (267185	273	304	268	14	45	9
14	260	POINT (268418	268	299	261	8	39	1
15	263	POINT (268456	270	301	262	7	38	-1
16	263	POINT (267813	273	302	266	10	39	3
17	264	POINT (264437	276	304	267	12	40	3
18	267	POINT (266839	281	312	275	14	45	8
19	277	POINT (269321	287	318	282	10	41	5
20	295	POINT (267147	306	337	303	11	42	8
21	303	POINT (264776	319	344	288	16	41	-15
22	309	POINT (263558	313	341	305	4	32	-4
23	309	POINT (268218	316	343	311	7	34	2
24	310	POINT (267150	318	350	317	8	40	7
25	312	POINT (269825	326	353	327	14	41	15
26	342	POINT (264165	340	369	340	-2	27	-2
27	343	POINT (270591	356	388	347	13	45	4

Los resultados del **cuarto procesamiento** es la evaluación posicional de los puntos por los estándares NMAS, EMAS y NSSDA mostradas en las tablas 8, 9 y 10, respectivamente, indican que la componente horizontal y vertical de los puntos es evaluada separadamente. Por lo que en nuestra evaluación posicional de los puntos dentro de las cinco delimitaciones de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, en la **componente horizontal** tiene el mismo valor de coordenadas en Este y Norte, debido a que estamos utilizando la cartografía oficial del Perú a escala 1/25000 para vectorizar los 7245 puntos, como se aprecia en la figura 8. Además, se conoce que el Mapa de Guía de las Unidades Hidrográficas del Perú de la ANA está realizada en base a las cartas digitales a escala 1:250000 (ANA, 2012) y los DEM ASTER, SRTM, ALOS PALSAR tienen las resoluciones de pixel de 30 metros, mientras ALOSPALSAR de 12,5 metros y todos los puntos están georreferenciados en el Sistema Geodésico Mundial de 1984 (WGS 84) y al ser comprobados en el terreno con el GPS Navegador están en el error de +/- 3 metros, siendo este error despreciable para la escala de trabajo 1/60000. Escala calculada a partir de la resolución del píxel fundamentado por Tobler (1987); donde la escala del mapa es igual a la resolución del ráster * 2 * 1000.

Para la evaluación posicional de la **componente vertical** se vectorizó 7245 puntos con sus respectivos valores de altura y forman el conjunto de datos de referencia (CDR), que a partir de ellos se extrae las alturas de cada DEM ALOS PALSAR, ASTER y RSTM, identificando 134 puntos del conjunto de datos a evaluar (CDE) con valores de -9999 en los modelos ALOS PALSAR (40 puntos) y ASTER (114 puntos), mientras que en el modelo SRTM no se presentó estos valores, quedándonos con 7111 puntos tanto en el CDR y CDE, que son el resultado del geoprocesamiento en ArcMAP, tal como se observa en la Figura 10.

Figura 10

Identificación de puntos con valores -9999



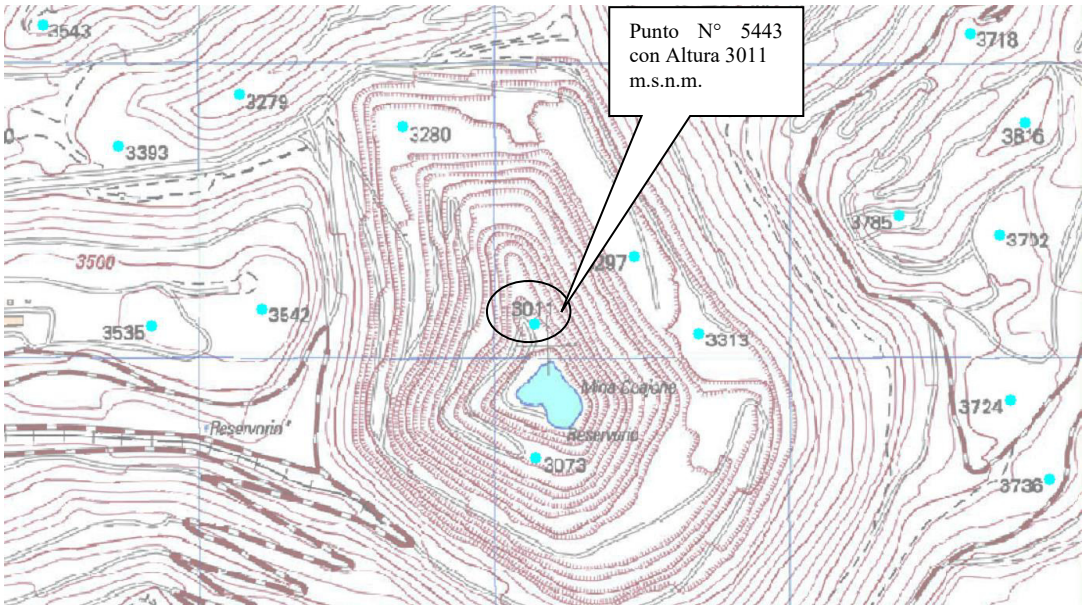
FID	Shape	Altura	Este	Norte	DEM_AlosPa	DEM_ASTER	DEM_SRTM
417	Point	1311	257714.69970	8068905.3002	-9999	-9999	1318
419	Point	1296	257292.44153	8068425.0447	1335	-9999	1303
462	Point	585	264652.79973	8045984.4957	622	-9999	591
468	Point	586	264557.54954	8046428.9966	629	-9999	599
469	Point	609	265116.25466	8046600.3192	648	-9999	619
470	Point	614	265107.08269	8046178.3313	648	-9999	618
471	Point	592	264660.91417	8047035.8393	628	-9999	598
472	Point	582	264307.46186	8046756.5030	620	-9999	590
473	Point	587	263774.38131	8046545.4135	623	-9999	594
474	Point	592	263981.33428	8047162.9046	632	-9999	603
489	Point	727	266146.15610	8046281.4817	777	-9999	743
490	Point	866	266541.92851	8045984.4957	897	-9999	868
491	Point	633	265514.02020	8047074.5812	672	-9999	641
492	Point	610	265358.30439	8047545.3461	653	-9999	624
493	Point	611	265589.42660	8047884.2078	655	-9999	626
497	Point	796	266834.46735	8046366.6321	830	-9999	800
611	Point	174	253691.09031	8049130.3978	213	-9999	184
614	Point	178	253881.59069	8050745.6823	215	-9999	186
1300	Point	974	270526.9251	8044393.0001	1007	-9999	978
1301	Point	831	268789.13829	8045416.4105	871	-9999	842
1337	Point	1312	283987.91136	8068648.9803	-9999	-9999	1321
1359	Point	1084	285865.13387	8057531.1664	1121	-9999	1089
1580	Point	1192	282470.85255	8054024.1736	-9999	-9999	1199
1627	Point	1204	278818.13764	8047241.6086	1239	-9999	1207
1630	Point	1132	280809.51389	8048443.8452	1173	-9999	1142

Nota. Identificación de los 134 puntos con valores -9999 en los modelos ALOS PALSAR y ASTER.

Por otro lado, se identifica que 21 puntos tienen diferencias de altura negativas exageradas entre el CDR y CDE en la zona minera del tajo Cuajone (3500 m s. n. m.) como por ejemplo el punto 5443 (FID) con altura registrada de 3011 en la carta nacional con diferencia -479 metros (Respecto al DEM ALOS PALSAR), -359 metros (Respecto al DEM ASTER) y -439 metros (Respecto al DEM SRTM) y diferencias de alturas positivas como el punto 5421 (FID) con altura registrada de 3431 en la carta nacional con diferencia de 160 metros (Respecto al DEM ALOS PALSAR), 186 metros (Respecto al DEM ASTER) y 206 metros (Respecto al DEM SRTM) que asumimos por el movimiento de tierra que se realiza en las operaciones mineras. Ver figura 11(a) y 11(b).

Figura 11

Diferencias de altura en la zona minera del tajo Cuajone



(a)

Table

Puntos_7111

Punto N° 5443
con Altura 3011
m.s.n.m.

FID	Shape	Altura	Este	Norte	DEM_AlosPa	DEM_ASTER	DEM_SRTM	Dif_AlosPa	Dif_Aster	Dif_SRTM
5443	Point	3011	318135.84977	8115116.6193	3490	3370	3450	-479	-359	-439
5415	Point	3073	318141.47091	8114662.0475	3490	3370	3450	-417	-297	-377
5444	Point	3297	318473.31745	8115346.0446	3573	3370	3533	-276	-73	-236
5445	Point	3313	318693.48935	8115081.9850	3501	3370	3474	-188	-57	-161
5446	Point	3280	317689.30862	8115783.3682	3468	3380	3419	-188	-100	-139
5450	Point	3537	318567.11928	8116686.8940	3490	3464	3466	47	73	71
5419	Point	3416	315223.24059	8115500.1144	3384	3360	3335	32	56	81
5437	Point	3414	315705.38491	8116183.7447	3348	3299	3306	66	115	108
5423	Point	3393	316728.90218	8115717.7539	3311	3291	3276	82	102	117
5471	Point	3609	320197.54421	8116968.9896	3509	3518	3473	100	91	136
5422	Point	3430	316205.48008	8115776.3413	3343	3277	3290	87	153	140
5469	Point	3601	319438.51659	8116556.8715	3489	3524	3447	112	77	154
5421	Point	3431	315894.92359	8115828.3729	3271	3245	3225	160	186	206

(b)

Nota. a) Carta Nacional 1/25000 donde se observa el Tajo de la Mina Cuajone con puntos del conjunto de datos de referencia (CDR). b) Tabla de CDR y CDE mostrando el punto N° 5443 y las diferencias respecto a cada modelo digital de elevación (ALOS PALSAR, ASTER y RSTM).

De la limpieza de datos respecto a las anomalías detectadas nos queda **7090 puntos** y al calcular las métricas de evaluación de la exactitud posicional para los tres modelos digitales de elevación (ALOS PALSAR, ASTER y SRTM) en función de las diferencias de alturas con respecto al conjunto de datos de referencia (Carta Nacional). Los resultados se muestran en la Tabla 14, que incluyen el RMSE (Error Cuadrático Medio), el error medio y la desviación estándar.

Tabla 14

Resultados de las métricas de evaluación RMSE, Error medio y Desviación estándar

Modelo	RMSE	Error Medio	Desviación Estándar
ALOS PALSAR	39,57	-38,72	8,17
ASTER	10,17	4,75	8,99
SRTM	8,46	-1,71	8,29

Respecto a los resultados de la Tabla 14, el modelo ALOS PALSAR tiene un RMSE muy alto (39,57 metros), lo que sugiere una baja exactitud en la componente vertical. El error medio negativo (-38,72 metros) indica que las alturas de este modelo tienden a estar por debajo de las alturas del conjunto de datos de referencia. Aunque la desviación estándar es moderada (8,17 metros), el fuerte sesgo afecta considerablemente la precisión.

Respecto a la tabla 14, el modelo ASTER tiene un RMSE de 10,17 metros, que es significativamente mejor que ALOS PALSAR, indicando una mayor exactitud en la componente vertical. El error medio positivo (4,75 metros) sugiere un sesgo en el que las alturas del modelo ASTER son en promedio más altas que las del conjunto de referencia. La desviación estándar de 8,99 metros muestra una dispersión moderada.

Respecto a la tabla 14, el modelo SRTM es el modelo con mejor rendimiento en términos de exactitud vertical, con el RMSE más bajo (8,46 metros). El error medio negativo (-1,71 metros) indica un ligero sesgo hacia alturas más bajas en comparación con los datos de referencia. La desviación estándar (8,29 metros) es comparable a la de ASTER, lo que indica que los errores están igualmente distribuidos alrededor del error medio.

A continuación, presentamos los resultados de la evaluación según los tres estándares (NMAS, EMAS y NSSDA), tomando en cuenta los umbrales de exactitud y las métricas calculadas.

Resultados del Estándar NMAS

Los resultados del estándar NMAS se muestran en la tabla 15

Tabla 15
Resultados de la evaluación NMAS

Modelo	% Puntos que Exceden la Tolerancia	Control Superado
ALOS PALSAR	99,73	Falso
ASTER	19,34	Falso
SRTM	9,96	Verdadero

Los resultados de la evaluación con el umbral de tolerancia actualizado (12,5 metros), según el estándar NMAS indican lo siguiente:

- **ALOS PALSAR:** El 99,73 % de los puntos supera la tolerancia, por lo que no pasa el control.
- **ASTER:** El 19,34 % de los puntos supera la tolerancia, por lo que tampoco pasa el control.
- **SRTM:** Solo el 9,96 % de los puntos supera la tolerancia, lo que significa que sí pasa el control, cumpliendo con los requisitos de NMAS.

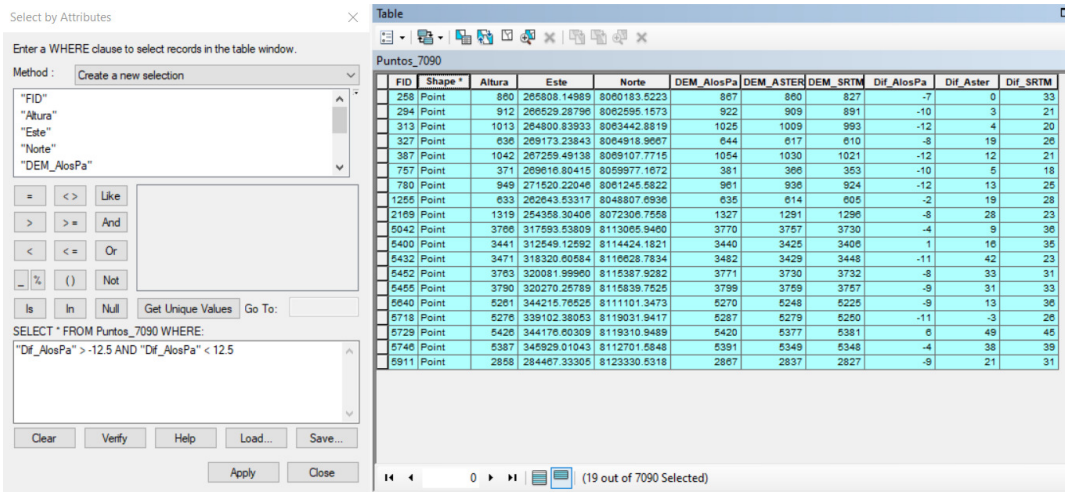
Esto implica que el modelo **SRTM** cumple con el estándar NMAS en la componente vertical, ya que menos del 10 % de los puntos exceden el umbral de error.

A continuación, detallamos los resultados de la Tabla 15.

Aplicando el estándar NMAS para el DEM ALOSPALSAR encontramos que, 19 puntos tienen error vertical inferior a la tolerancia vertical, cabe resaltar que en esta investigación el error máximo tolerable de la componente vertical es de 12,5 metros, por ser la mitad de la equidistancia de 25 metros entre curvas de nivel de la carta nacional a escala 1/25000. Asimismo, se encontró que 7071 puntos tienen error vertical superior a la tolerancia vertical, lo que representa el 99,73 %, cantidad que es **mayor al 10 %** de los casos, que son 7090 puntos en la Cuenca Hidrográfica Ilo-Moquegua, **no superando** el control en la componente vertical, observándose en las Figuras 12(a) y 12(b) los resultados de la selección por atributos de la diferencia de alturas en ArcMap.

Figura 12

Puntos con error vertical en el DEM ALOSPALSAR

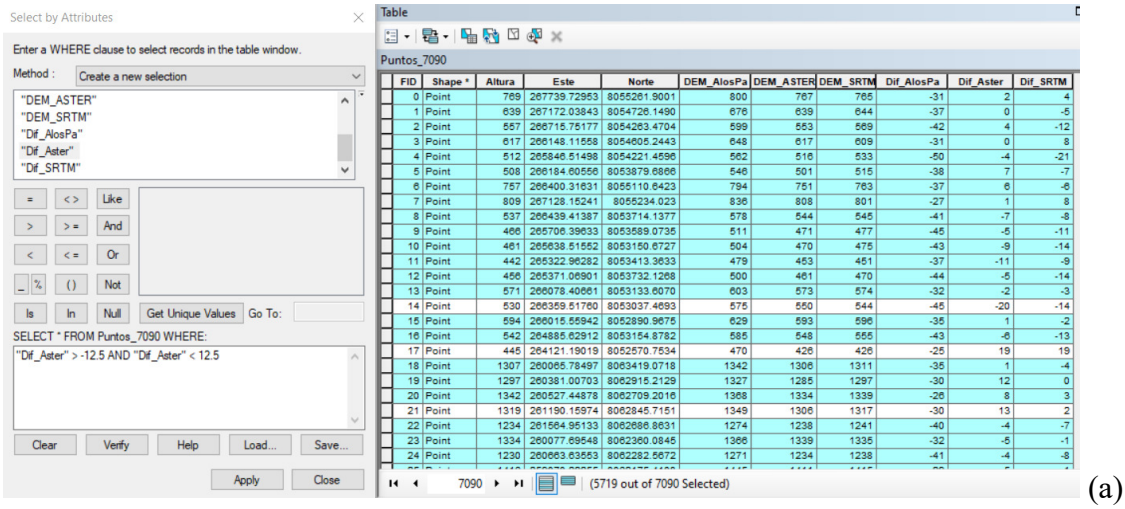


Nota. a) Identificación de los 19 puntos que tienen error vertical inferior a la tolerancia vertical. b) Identificación de los 7071 puntos que tienen error vertical superior a la tolerancia vertical.

Aplicando el estándar NMAS para el DEM ASTER, encontramos que, 5719 puntos tienen error vertical inferior a la tolerancia vertical de 12,5 metros. También se encontró que 1371 puntos tienen error vertical superior a la tolerancia vertical, lo que representa el 19,34 % **mayor al 10 %** de los casos que son 7090 puntos en la Cuenca Hidrográfica Ilo-Moquegua, **no superando** el control en la componente vertical, los resultados de la selección por atributos de la diferencia de alturas mencionadas se observan en las Figuras 13(a) y 13(b).

Figura 13

Puntos con error vertical en el DEM ASTER

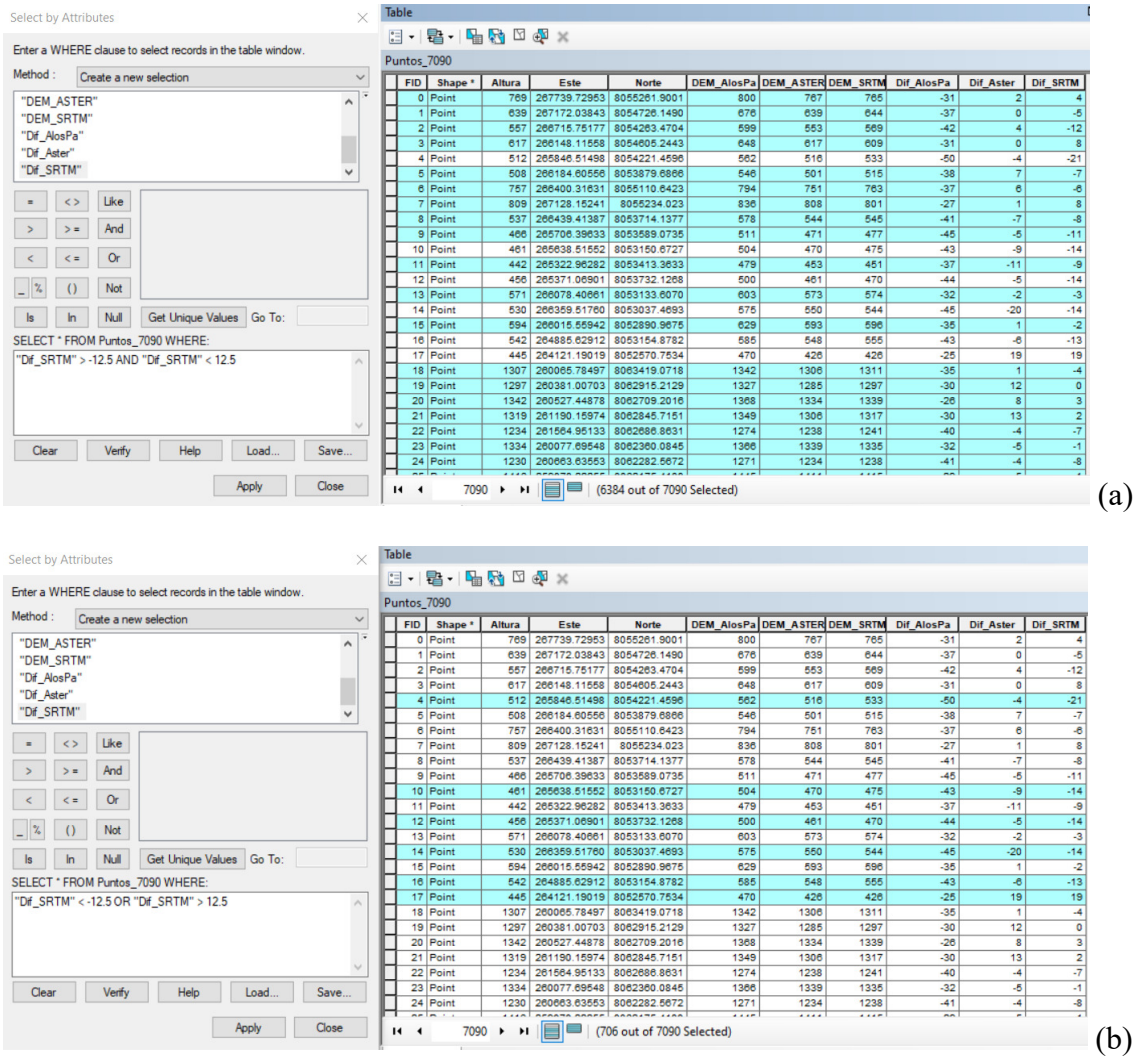


Nota. a) Identificación de los 5719 puntos que tienen error vertical inferior a la tolerancia vertical. b) Identificación de los 1371 puntos que tienen error vertical superior a la tolerancia vertical.

De acuerdo al estándar NMAS aplicado para el DEM SRTM, encontramos que, 6384 puntos tienen error vertical inferior a la tolerancia vertical de 12,5 metros, también se encontró que 706 puntos tienen error vertical superior a la tolerancia vertical, lo que representa el 9,96 % que es **menor al 10 %** de los 7090 casos en la Cuenca Hidrográfica Ilo-Moquegua, **superando** el control en la componente vertical, resultados que se muestran de la selección por atributos de la diferencia de alturas en ArcMap en las Figuras 14(a) y 14(b).

Figura 14

Puntos con error vertical en el DEM SRTM.



Nota. a) Identificación de los 6384 puntos que tienen error vertical inferior a la tolerancia vertical. b) Identificación de los 706 puntos que tienen error vertical superior a la tolerancia vertical.

Resultados del Estándar EMAS

Realizando todo el proceso de evaluación con el estándar EMAS y la realización de las respectivas hipótesis para la le media con el estadístico t y sobre la varianza con el test de la Chi-cuadrado se presentan los resultados en la Tabla 16.

Tabla 16

Resultados de las pruebas de hipótesis en el estándar EMAS

Modelo	Error Medio (m)	Desviación Estándar (m)	t-valor	t Crítico	Prueba Media Superada	Chi-cuadrado	Chi-cuadrado Crítico	Prueba Varianza Superada
ALOS PALSAR	-38,72	8,17	-398,86	1,96	Falso	4735,89	7285,99	Verdadero
ASTER	4,75	8,99	44,44	1,96	Falso	5733,34	7285,99	Verdadero
SRTM	-1,71	8,29	-17,35	1,96	Falso	4869,42	7285,99	Verdadero

Los resultados de las pruebas de hipótesis para cada modelo digital de elevación (ALOS PALSAR, ASTER, y SRTM) en la componente vertical indican:

1. **Error Medio y Desviación Estándar**:
   - El error medio de cada modelo muestra si hay presencia de sesgo.
   - La desviación estándar representa la dispersión de los errores.
2. **Prueba de hipótesis sobre la media (distribución t de Student):**
   - El valor crítico de la distribución t para n−1 grados de libertad (7090 - 1 = 7089) y un nivel de significación $\alpha = 0,05$ es aproximadamente 1,96 (esto para una prueba bilateral).
   - En los resultados obtenidos, ninguno de los modelos digitales de elevación (ALOS PALSAR, ASTER, SRTM) superó esta prueba, ya que los valores absolutos de tz superan los valores críticos calculados para el nivel de significación $\alpha = 0,05$. Esto indica que existe un sesgo significativo en los errores verticales de los modelos.
3. **Prueba de hipótesis sobre la varianza (distribución Chi-cuadrado):**
   - El valor crítico de la distribución Chi-cuadrado para 7089 grados de libertad y un nivel de significación $\alpha=0,05$ es aproximadamente, 7292,97
   - Todos los modelos superan la prueba de la varianza. Esto sugiere que la dispersión de los errores (desviación estándar) está dentro de los límites aceptables, dados los valores asumidos de varianza.

Estas pruebas son útiles para evaluar si el sesgo y la dispersión de los errores cumplen con los estándares de calidad en la evaluación posicional de los DEMs.

Estos resultados indican que los errores verticales presentan un sesgo significativo en los tres modelos, pero la dispersión de los errores es aceptable, según los estándares del EMAS.

Cada uno de los modelos cumple con los requisitos de dispersión de los errores (σ_0) para la componente vertical (Z), según el estándar EMAS. No obstante, presentan un sesgo en el error medio (δ_0), lo que sugiere la necesidad de evaluar si estos modelos son adecuados para el propósito de su uso en función de la escala del mapa. En el estudio se evaluó con el mapa 1/25000 con curvas de nivel a 25 metros, por lo que seleccionamos el modelo SRTM con límites de error que no exceden de 8,29 metros en la componente Z.

Resultados del estándar NSSDA

Los resultados del estándar **NSSDA,** centrado exclusivamente en la componente vertical (Z), dado que es la única para la cual tenemos tantos datos del conjunto de datos de referencia (CDR) como del conjunto de datos a evaluar (CDE), se presentan en la Tabla 18.

Tabla 17
Resultados de la evaluación posicional con el estándar NSSDA

Modelo	ECM (m)	NSSDA (m)
ALOS PALSAR	39,57	77,56
ASTER	10,17	19,93
SRTM	8,46	16,58

Los valores NSSDA representan la precisión vertical de cada modelo en términos de error cuadrático medio (ECM) multiplicado por 1,96 para obtener el intervalo de confianza del 95 %.

De acuerdo con el estándar de exactitud **NSSDA**, no se imponen tolerancias o valores limitantes predeterminados. En lugar de ello, se calculan los errores de exactitud y el usuario determina si los resultados son adecuados para el propósito específico del análisis. La exactitud se reporta con un nivel de confianza del 95 % para las componentes horizontal y vertical.

El estándar NSSDA deja la decisión en manos del usuario respecto a la adecuación de los valores de exactitud. En este caso, el modelo SRTM proporciona la mayor exactitud vertical.

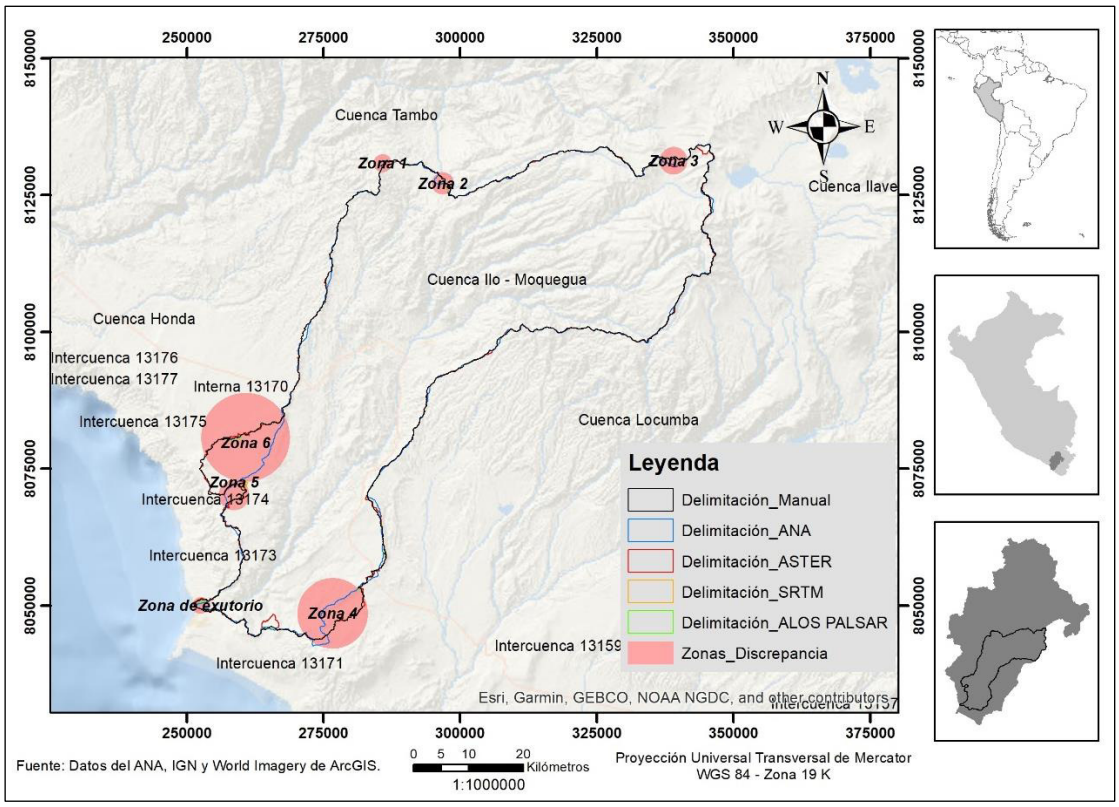
Análisis de hipsometría de superposición cartográfica y perfiles longitudinales

Se realizó un análisis cartográfico comparativo de la hipsometría mediante superposición cartográfica y perfiles longitudinales en cinco delimitaciones de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua. Estas delimitaciones incluyen: (1) la delimitación manual, (2) la delimitación proporcionada por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), y (3) las generadas a partir de los Modelos Digitales de Elevación (DEM) ASTER, SRTM y ALOS PALSAR. El estudio permitió identificar seis zonas con mayores discrepancias en la coincidencia de los límites de la cuenca, así como en la localización del exutorio, es decir, el punto de salida de las aguas de la cuenca.

En la **Figura 15** se presentan las áreas de mayor discrepancia, donde se observan diferencias significativas entre los modelos evaluados y la delimitación de referencia. Las discrepancias podrían deberse a variaciones en la resolución espacial de los DEM utilizados y a los criterios de delimitación aplicados por cada entidad o modelo. Esto resalta la importancia de seleccionar un modelo adecuado en función de los objetivos del estudio y las características específicas de la cuenca hidrográfica en análisis.

Figura 15

Zonas con discrepancia en la delimitación de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua



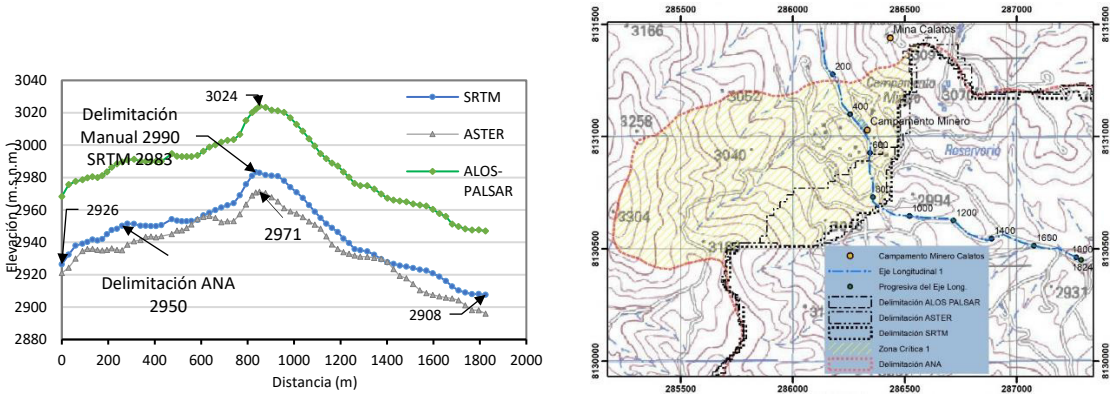
Las zonas identificadas por zona son:

a) Zona 1: Campamento Minero Los Calatos

La Zona 1, donde se ubica el Campamento Minero Los Calatos, presenta una discrepancia significativa entre las delimitaciones evaluadas. Según la delimitación oficial de cuencas hidrográficas de la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2009b), esta área es parte de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua. Sin embargo, el análisis detallado basado en la delimitación manual, que utiliza como referencia la carta nacional a escala 1:25,000, revela que esta zona debería pertenecer en realidad a la cuenca hidrográfica del Tambo. Esta conclusión se ve respaldada por los perfiles topográficos generados a partir de los Modelos Digitales de Elevación (DEM) ASTER, SRTM y ALOS PALSAR del eje longitudinal 1 (ver Figuras 16.a y 16.b).

Figura 16

Análisis cartográfico de la zona 1



(a) (b)

Nota. (a) Perfiles longitudinales de la zona 1. (b) Delimitaciones de la Cuenca Ilo-Moquegua de la zona 1 en la Carta Nacional.

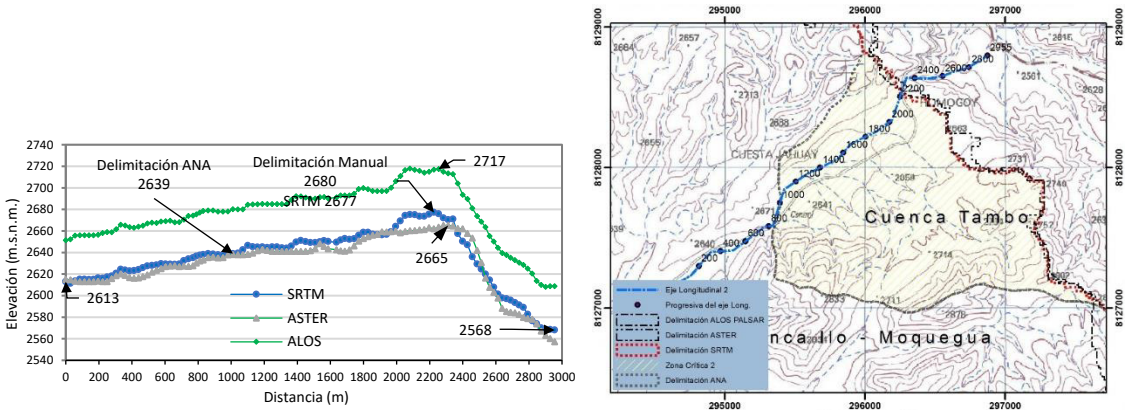
En la Figura 16.a, los perfiles longitudinales muestran las discrepancias en altimetría, mientras que la Figura 16.b ilustra las diferencias en la planimetría de las delimitaciones. Comparando los resultados, el límite de la cuenca, según la ANA, está desplazado aproximadamente 508 metros hacia la izquierda en términos planimétricos, y 40 metros por debajo en altimetría, en relación con la delimitación manual. En cuanto a los DEM utilizados, los límites generados por ALOS PALSAR, ASTER y SRTM se encuentran bastante próximos a la delimitación manual, con desviaciones en planimetría dentro de un margen de +/- 5 metros. En altimetría, los errores registrados fueron de -19 metros para ALOS PALSAR, -7 metros para ASTER, y +24 metros para SRTM, en comparación con la delimitación manual.

b) Zona 2: Cuesta Jahuay

La Zona 2, denominada Cuesta Jahuay, presenta una discrepancia relevante en su delimitación. De acuerdo con el mapa oficial de la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2009b), esta área está clasificada como parte de la cuenca hidrográfica del Tambo. No obstante, el análisis de los perfiles topográficos obtenidos a partir de los Modelos Digitales de Elevación (DEM) ASTER, SRTM y ALOS PALSAR a lo largo del eje longitudinal 2 sugiere que esta zona debería pertenecer a la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua (Figuras 17.a y 17.b).

Figura 17

Análisis cartográfico de la zona 2



(a) (b)

Nota. (a) Perfiles longitudinales de la zona 2. (b) Delimitaciones de la Cuenca Ilo-Moquegua de la zona 2 en la Carta Nacional.

En la Figura 17.a, se muestran los perfiles longitudinales que indican las discrepancias altimétricas, mientras que en la Figura 17.b se detallan las diferencias planimétricas entre las delimitaciones. Al observar estas figuras, se evidencia que el límite de la cuenca, según la ANA, se encuentra desplazado aproximadamente 1,222 metros hacia la izquierda en términos planimétricos, y 67 metros por debajo en altimetría, en comparación con la delimitación manual.

Los límites generados por los modelos ALOS PALSAR y SRTM coinciden entre sí, mientras que el modelo ASTER presenta una desviación de 42 metros hacia la derecha en la proyección planimétrica. En altimetría, los errores respecto a la delimitación manual fueron de -41 metros para ALOS PALSAR, -3 metros para SRTM, y +37 metros para ASTER. Estos resultados destacan las diferencias entre los DEM evaluados y la delimitación manual de la cuenca.

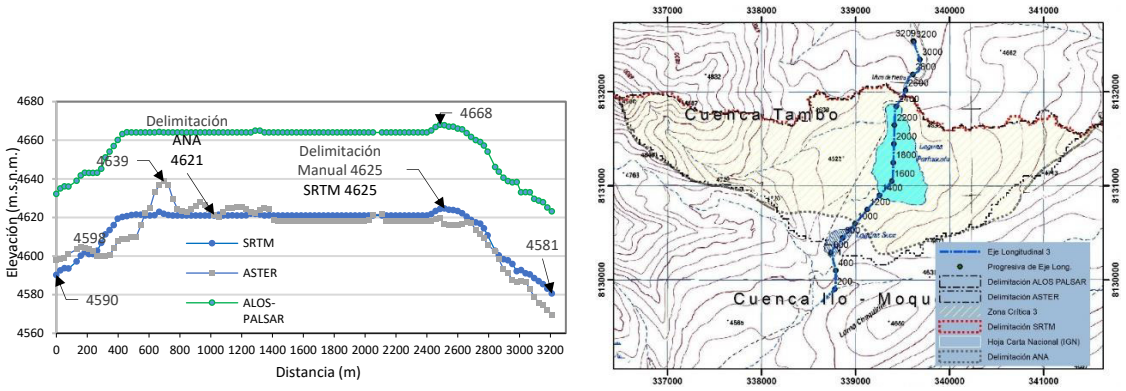
c) Zona 3: Laguna Parincota

En la Zona 3, donde se encuentra la Laguna Parincota, se observan discrepancias notables en la delimitación de la cuenca. De acuerdo con el mapa de cuencas hidrográficas de la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2009b), esta área está asignada a la cuenca del Tambo. Sin embargo, el análisis detallado de los perfiles topográficos obtenidos a partir de

los DEM SRTM y ALOS PALSAR en el eje longitudinal 3 muestra que, en realidad, la laguna debería formar parte de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua (Figuras 18.a y 18.b).

Figura 18

Análisis cartográfico de la zona 3



(a) (b)

Nota. (a) Perfiles longitudinales de la zona 3. (b) Delimitaciones de la Cuenca Ilo-Moquegua de la zona 3 en la Carta Nacional.

En la Figura 18.a, se presentan los perfiles longitudinales que revelan las discrepancias en altimetría y en la Figura 18.b se muestran las variaciones planimétricas entre las delimitaciones evaluadas. Los resultados indican que el límite de la cuenca, según la ANA, está desplazado 1511 metros hacia la izquierda en términos planimétricos y 4 metros por debajo en altimetría en comparación con la delimitación manual.

Por otro lado, los límites generados por los modelos ALOS PALSAR y SRTM presentan diferencias mínimas, con desviaciones en planimetría de apenas 5 metros respecto a la delimitación manual. El modelo ASTER, sin embargo, muestra un desplazamiento considerable hacia la izquierda de 1783 metros en planimetría. En cuanto a los errores altimétricos, ALOS PALSAR registra un error de +43 metros, ASTER de +14 metros, y SRTM no presenta desviación (0 metros), lo que lo hace coincidir con la delimitación manual en altitud.

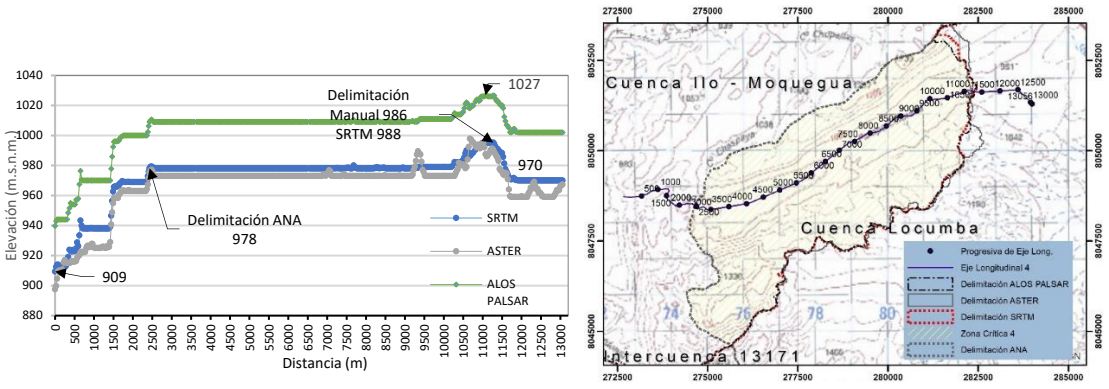
d) Zona 4: Pampa Colorada

En la Zona 4, correspondiente a Pampa Colorada, se presenta una discrepancia significativa entre las delimitaciones analizadas. Según la delimitación oficial de la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2009b), esta área forma parte de la cuenca

hidrográfica de Locumba. No obstante, los perfiles topográficos obtenidos a partir de los DEM SRTM, ASTER y ALOS PALSAR en el eje longitudinal 4 sugieren que Pampa Colorada debería pertenecer a la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua (Figuras 19.a y 19.b).

Figura 19

Análisis cartográfico de la zona 4



(a) (b)

Nota. (a) Perfiles longitudinales de la zona 4. (b) Delimitaciones de la Cuenca Ilo-Moquegua de la zona 4 en la Carta Nacional.

En la Figura 19.a, se observan los perfiles longitudinales que evidencian las discrepancias altimétricas y en la Figura 19.b las diferencias en la delimitación planimétrica. Comparando los resultados, el límite de la cuenca, según la ANA, está desplazado hacia la izquierda, aproximadamente 8818 metros en términos planimétricos, y 8 metros por debajo en altimetría, respecto a la delimitación manual de la cuenca.

En cuanto a los DEM utilizados, los modelos ALOS PALSAR y SRTM muestran límites muy cercanos a la delimitación manual, con desviaciones planimétricas de apenas 10 metros. Por otro lado, el modelo ASTER presenta un desplazamiento de 20 metros hacia la izquierda en la proyección planimétrica. En altimetría, los errores registrados fueron de +41 metros para ALOS PALSAR, -16 metros para ASTER, y 2 metros para SRTM en comparación con la delimitación manual.

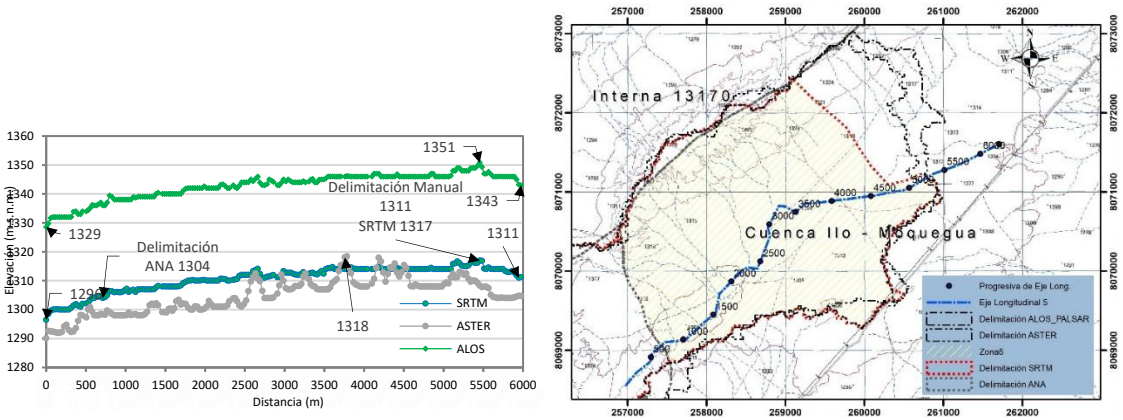
e) Zona 5: Intercuenca 13174 - Lomas Corrales

La Zona 5 abarca la Intercuenca 13174, conocida como Lomas Corrales. Según la delimitación de cuencas hidrográficas de la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2009b), esta área está incluida en la cuenca Ilo-Moquegua. Sin embargo, los perfiles topográficos

generados a partir de los DEM SRTM, ASTER y ALOS PALSAR en el eje longitudinal 5 indican que la zona debería corresponder a la Intercuenca 13174 (Figuras 20.a y 20.b).

Figura 20

Análisis cartográfico de la zona 5



Nota. (a) Perfiles longitudinales de la zona 5. (b) Delimitaciones de la Cuenca Ilo-Moquegua de la zona 5 en la Carta Nacional.

En la Figura 20.a, los perfiles longitudinales revelan las discrepancias altimétricas, mientras que en la Figura 20.b se muestran las diferencias planimétricas entre las delimitaciones. El límite de la cuenca, según la ANA, está desplazado 4842 metros hacia la izquierda en planimetría y 7 metros por debajo en altimetría con respecto a la delimitación manual de la cuenca.

Por otro lado, los límites generados por los modelos ALOS PALSAR y SRTM se encuentran bastante próximos a la delimitación manual, con una variación de +/- 5 metros en planimetría. El modelo ASTER, sin embargo, presenta un desplazamiento de 1700 metros hacia la izquierda, en proyección planimétrica. En cuanto a las diferencias altimétricas, ALOS PALSAR mostró un error de +40 metros, ASTER de +7 metros, y SRTM de +6 metros respecto a la delimitación manual.

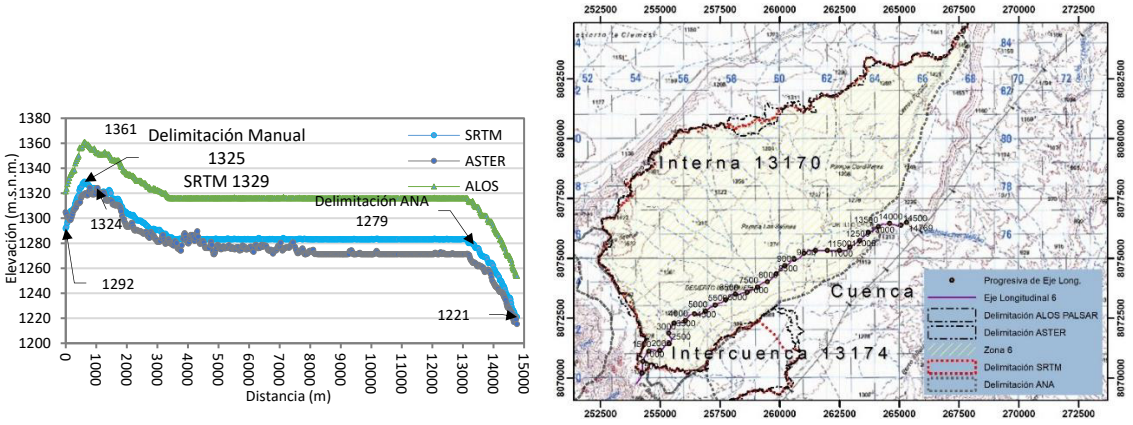
f) Zona 6: Pampa Las Salinas y Pampa Cordilleras

En la Zona 6, que comprende las áreas de Pampa Las Salinas y Pampa Cordilleras, se observan discrepancias notables en la delimitación de la cuenca. Según la delimitación oficial de cuencas hidrográficas de la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2009b), esta

zona se encuentra dentro de la Cuenca Interna 13170. No obstante, el análisis de los perfiles topográficos obtenidos a partir de los DEM SRTM, ASTER y ALOS PALSAR en el eje longitudinal 6 muestra que debería estar incluida en la cuenca Ilo-Moquegua (Figuras 21.a y 21.b).

Figura 21

Análisis cartográfico de la zona 6



(a) (b)

Nota. (a) Perfiles longitudinales de la zona 6. (b) Delimitaciones de la Cuenca Ilo-Moquegua de la zona 6 en la Carta Nacional.

En la Figura 21.a, los perfiles longitudinales revelan las diferencias altimétricas, mientras que en la Figura 21.b se visualizan las discrepancias planimétricas entre las delimitaciones evaluadas. Los resultados muestran que el límite de la cuenca, según la ANA, está desplazado 12653 metros hacia la derecha en términos planimétricos, y 46 metros por debajo en altimetría respecto a la delimitación manual de la cuenca.

Por su parte, los límites generados por los modelos ALOS PALSAR y SRTM coinciden entre sí, mientras que el modelo ASTER muestra un desplazamiento de 410 metros hacia la derecha, en proyección planimétrica. En cuanto a las diferencias altimétricas, los errores registrados fueron de +36 metros para ALOS PALSAR, -1 metro para ASTER, y 4 metros para SRTM en comparación con la delimitación manual.

g) Zona 7: Exutorio de la Cuenca Hidrográfica Ilo-Moquegua

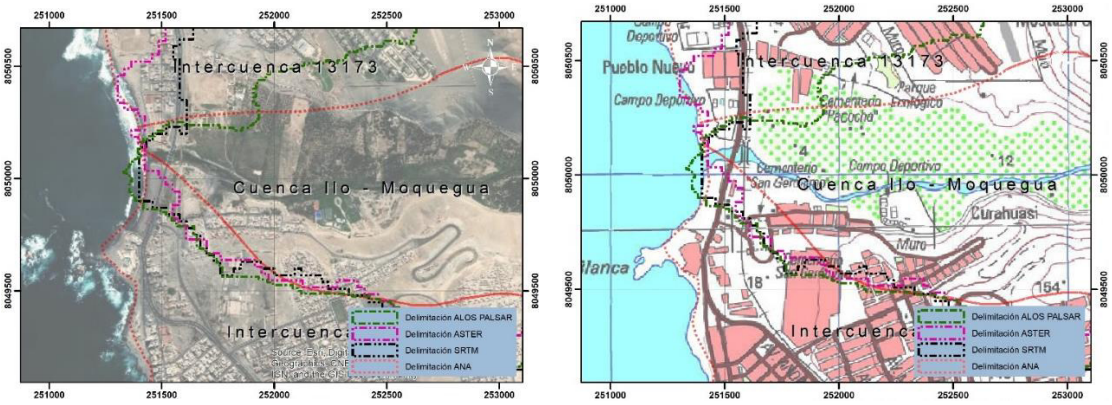
La zona de exutorio corresponde al punto de salida de las aguas del río principal de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua hacia el Océano Pacífico. Al analizar las imágenes

satelitales proporcionadas por el World Imagery de ESRI (Figura 22.a), se observa una discrepancia significativa: la delimitación de la cuenca realizada por la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2009b), muestra un desplazamiento aproximado de 110 metros hacia el norte en comparación con la ubicación real del exutorio. Este desajuste pone en evidencia una diferencia entre la representación oficial y la realidad geográfica observable.

Esta discrepancia también se refleja en la Figura 22.b, donde la superposición de la delimitación de la ANA sobre la Carta Nacional del Instituto Geográfico Nacional (IGN) refuerza la inexactitud en la posición del exutorio. Aunque la desviación es moderada en términos de distancia, esta diferencia puede afectar la precisión en modelos hidrológicos y en la gestión de los recursos hídricos. Esto resalta la importancia de emplear datos actualizados y herramientas de alta resolución para una adecuada delineación de cuencas hidrográficas.

Figura 22

Análisis cartográfico de la zona 7



(a) (b)

Nota. (a) Punto de salida en la zona 7. (b) Delimitaciones de la Cuenca Ilo-Moquegua de la zona 7 en la Carta Nacional.

Análisis Comparativo de Delimitaciones de la Cuenca Ilo-Moquegua

Se realizó un análisis comparativo de las delimitaciones de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua generadas a partir de cinco métodos: ALOS PALSAR, ASTER, SRTM, la delimitación oficial de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), y la delimitación manual final. Los resultados indican que el DEM SRTM es el que mejor representa el relieve de la cuenca, con una precisión destacada en todas las zonas estudiadas (Figura 23.a).

El DEM ASTER fue descartado debido a la creación de relieves inexistentes, principalmente en las zonas de cabecera de la cuenca, lo que generó importantes errores de delimitación. Por otro lado, el DEM ALOS PALSAR también fue desestimado, ya que presentó una sobreestimación de los valores de elevación, con un error promedio de +40 metros respecto al terreno real, como se evidenció en los perfiles longitudinales. La delimitación oficial de la ANA subestimó el área total de la cuenca en comparación con los otros métodos, lo que sugiere que algunas áreas clave no fueron correctamente incluidas.

Las verificaciones en campo de las delimitaciones generadas por los DEM se llevaron a cabo utilizando un sensor GARMIN Montana 680, con una precisión de +/- 3,65 metros. La precisión del posicionamiento se mejoró mediante el uso combinado de los sistemas GPS y GLONASS, junto con la opción de promediado de waypoints (GARMIN, 2015). Las elevaciones se corroboraron utilizando un altímetro BRUNTON ADC Summit, con una precisión de +/- 3 metros (Brunton, 2014), asegurando una representación adecuada para la creación del mapa a escala 1:60000.

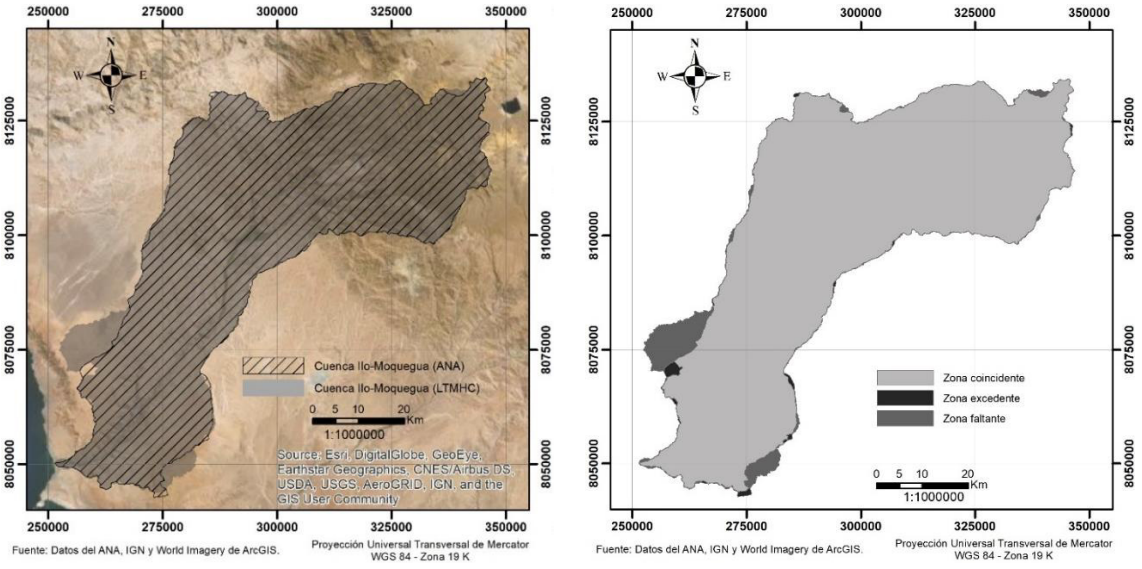
El límite topográfico y morfométrico hidrológicamente consistente (LTMHC) de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, basado en la delimitación manual, abarca un área de 3535,31 km² y un perímetro de 548,87 km. El DEM SRTM delimitó correctamente el 99,15 % del perímetro (544,19 km), mientras que el 0,85 % restante fue corregido manualmente tras visitas de campo. Estas correcciones manuales se realizaron en dos áreas específicas: la primera en la Quebrada Lomas Corrales, con una corrección del 0,41 % (2,27 km), y la segunda en la Quebrada Jahuay Chico, con una corrección del 0,44 % (2,42 km).

En cuanto a las diferencias entre el LTMHC y la delimitación de la ANA (Figura 23.b), se identificaron las siguientes discrepancias:

- **Zonas faltantes:** Representan el 4 % del área total (157 km²), que deberían formar parte de la cuenca, pero no fueron incluidas en la delimitación de la ANA.
- **Zonas excedentes:** Abarcan el 1 % del área (29 km²) y no deberían haber sido incluidas en la delimitación de la cuenca.
- **Zonas concordantes:** El 95 % del área total (3378 km²) coincide en ambas delimitaciones, mostrando un alto grado de concordancia.

Figura 23

Diferencias entre la delimitación de la ANA y delimitación manual



(a) (b)

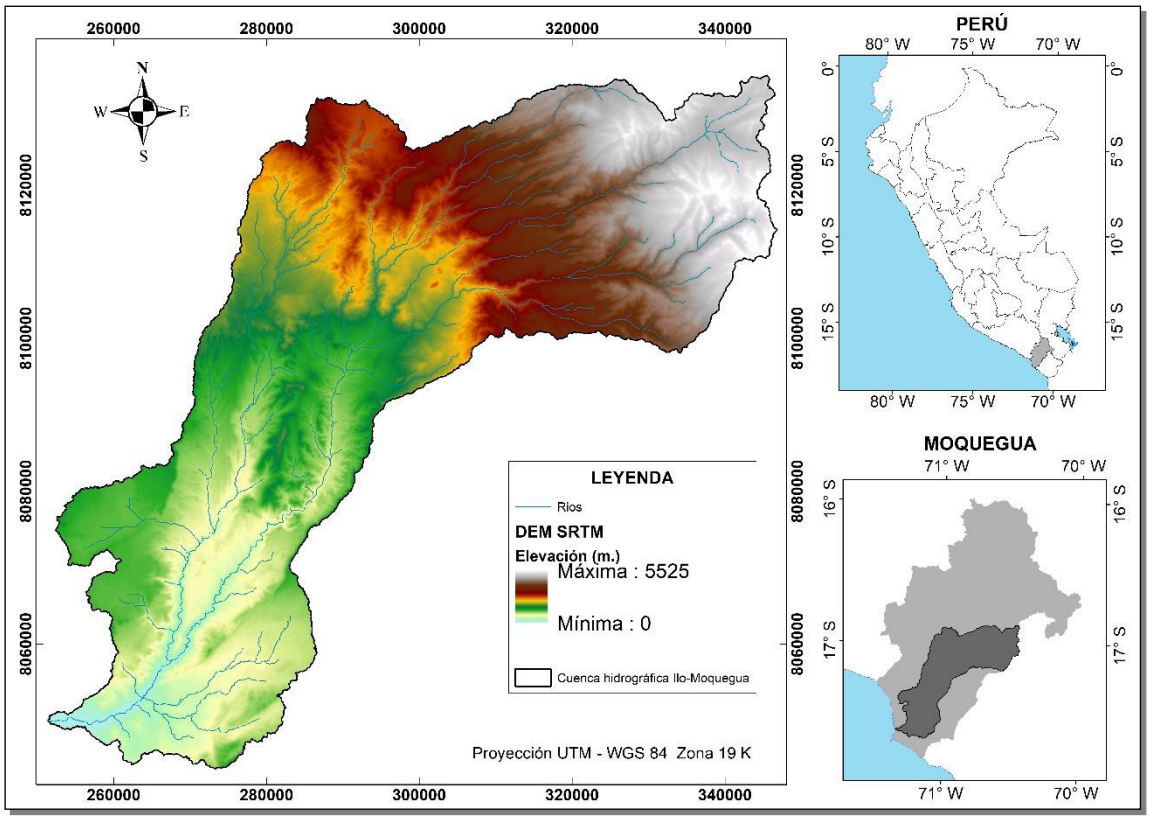
Nota. Elaboración propia y World Imagery (ESRI, 2018).

5.1.2. Características topográficas y morfométricas de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua

A partir de la delimitación más precisa y realista de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, en función de la carta nacional del Perú más actualizada (escala 1/25000) y el modelo digital de elevación del terreno SRTM (escala 1/60000) que se observa en la Figura 24, fue posible determinar las características topográficas y morfométricas de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua como la planimetría, la forma, el relieve y el sistema de drenaje que se muestran en la Tabla 18.

Figura 24

Mapa de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua



Nota: Mapa realizado por el tesista.

Tabla 18

Características topográficas y morfométricas de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua

Características Topográficas y Morfométricas	**Símbolos**	**Unidades**	**Resultados**
PLANIMETRÍA			
Área de la cuenca	A	Km^2	3535,31
Perímetro de la cuenca	P	Km	548,87
FORMA DE LA CUENCA			
Índice Gravelius o Coeficiente de Compacidad	Kc		2,60
Factor de Forma	Kf		0,16
RELIEVE			

Pendiente media de la cuenca	Dm	m/m	0,27
Elevación media de la cuenca	E	m	2389,92
Nivel mínimo		m	0,00
Nivel máximo		m	5588,00
Rectángulo equivalente			
Lado mayor	L	km	260,88
Lado menor	I	km	13,55
Pendiente del cauce principal	Sp		
Pendiente media	Sp1	%	3,04
Pendiente media ponderada	Sp2	%	1,52
Pendiente Equivalente constante	Sp3	%	2,07
Coeficiente de masividad	Cm	m/km2	0,68
SISTEMA DE DRENAJE			
Orden de los cursos de agua (Sthraler)			5
Número de cursos de agua de 1° orden	r1		101
Número total de cursos de agua	Nt		201
Longitud total de ríos	Lt	km	1024,94
Longitud de río principal	Lr	km	147,05
Longitud del valle del río principal	Lv	km	146,98
Densidad de corriente	Dc		0,06
Densidad de drenaje	Dd	km/km2	0,29
Extensión media do escurrimiento superficial	Em	km	3,45
Sinuosidad del curso principal de agua	Sc	Adim	1,00
Coeficiente de Torrencialidad	Ct		0,03
Tiempo de concentración	tc	hora	11,88

1. Planimetría de la cuenca

Los resultados de la planimetría de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, presentados en la Tabla 18, revelan que esta cuenca abarca un área de 3535,31 km² con un perímetro de 548,87 km. El ancho promedio de la cuenca es de 24,04 km, y su centroide

se encuentra en las coordenadas, 295716,83 m Este y 8097225,16 m Norte, conforme al sistema de referencia geodésico WGS 84.

De acuerdo con la clasificación propuesta por Zăvoianu (1985), una cuenca hidrográfica se considera grande si su área de drenaje supera los 10000 km². Sin embargo, en este contexto, la cuenca Ilo-Moquegua no calificaría dentro de esta categoría según el umbral establecido, lo que sugiere que corresponde a una cuenca de tamaño intermedio, desde un punto de vista hidrológico y geomorfológico.

Es importante resaltar que las características planimétricas de la cuenca influyen directamente en la dinámica hidrológica, ya que el perímetro y el ancho promedio influyen en la concentración de caudales y la velocidad de escorrentía superficial. Cuencas con forma alargada, como la de Ilo-Moquegua, tienden a tener una respuesta hidrológica más gradual, lo que reduce la posibilidad de eventos de crecidas súbitas en comparación con cuencas más compactas.

Además, la ubicación geográfica del centroide refleja la tendencia espacial de la cuenca, proporcionando un punto de referencia útil para el análisis hidrográfico y la planificación de infraestructura hídrica. Estos parámetros planimétricos constituyen datos esenciales para la modelación hidrológica y la gestión sostenible del recurso hídrico en la cuenca Ilo-Moquegua, facilitando una adecuada toma de decisiones en cuanto a la gestión de caudales, mitigación de riesgos y evaluación de las fuentes de agua disponibles en la región.

2. Forma de la cuenca

El análisis de la forma de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, basado en el **coeficiente de compacidad**, proyecta un valor de 2,60, lo cual indica una morfología alargada e irregular, como se observa en la Figura 24. Este valor relativamente alto implica que el flujo dentro de la cuenca experimentará un mayor tiempo de concentración, lo que contribuye a disminuir el riesgo de inundaciones. En contraste, las cuencas con coeficientes de compacidad cercanos a 1 presentan una forma más compacta, lo que facilita la concentración del escurrimiento y aumenta la vulnerabilidad a eventos de inundaciones, tal como señalan Villela y Mattos (1975).

Por otro lado, el **factor de forma**, calculado en 0,16, confirma que la cuenca presenta una configuración muy alargada, característica que puede dar lugar a picos de inundación específicos. De acuerdo con los estudios de Horton (1945) y Zăvoianu (1985), este valor bajo es típico de cuencas con un tiempo de escurrimiento superficial más prolongado, lo que implica una respuesta hidrológica más lenta ante eventos de precipitación. Estos autores destacan que la relación entre la forma de la cuenca y su capacidad de respuesta hidrológica es esencial para evaluar su susceptibilidad a fenómenos extremos, como inundaciones.

3. Relieve de la cuenca

La **pendiente media** de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua se calcula en 0,27 m/m, lo que equivale a un 27 % al expresarlo en porcentaje. Esta medida fue obtenida mediante el método de redes vectoriales, utilizando la fórmula (4) y el mapa de pendientes representado en la Figura 25. La inclinación del terreno es un factor determinante en la dinámica del escurrimiento superficial, ya que influye directamente en la velocidad del flujo de agua sobre la superficie, como lo menciona Villela y Mattos (1975). Terrenos con pendientes más pronunciadas tienden a generar escurrimientos más rápidos, lo que reducirá el tiempo de concentración del flujo y aumentará la intensidad de los picos de inundación.

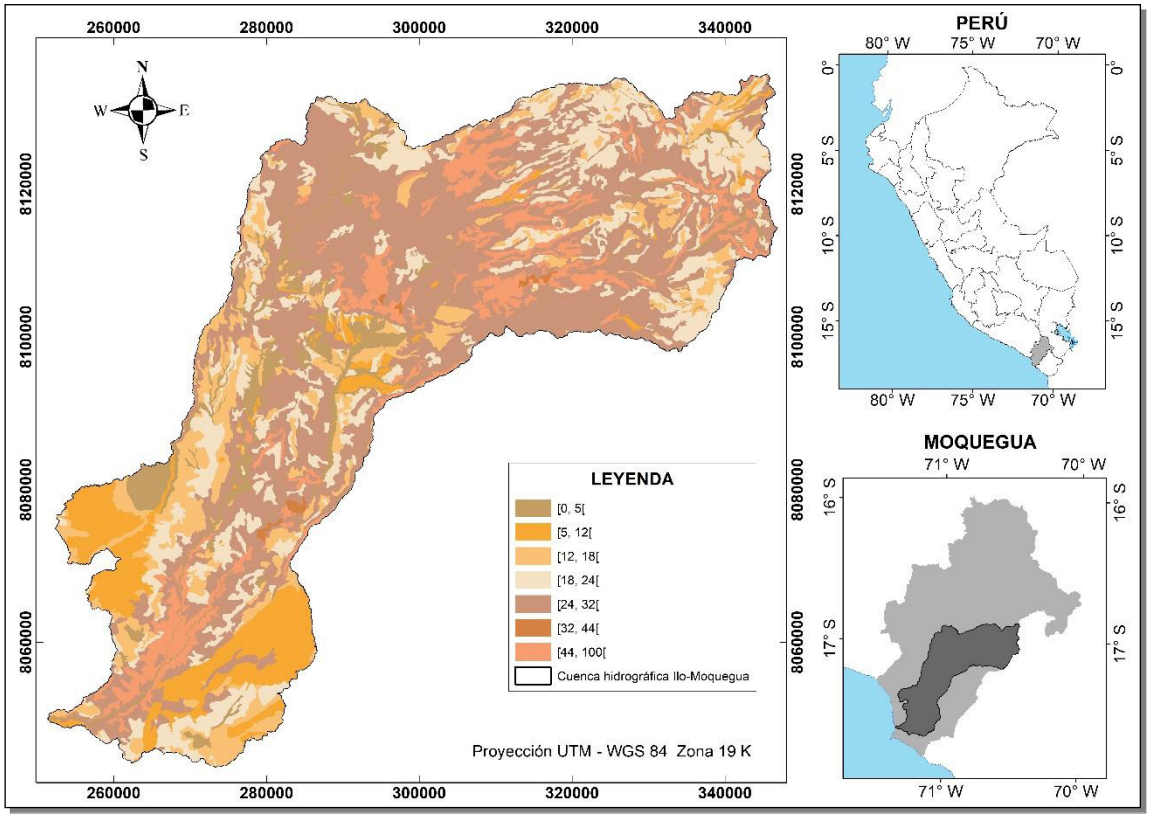
De acuerdo con Monsalve Sáenz (1999), la pendiente media de una cuenca tiene repercusiones en diversos procesos hidrológicos, siendo uno de los más importantes el escurrimiento superficial. A mayor inclinación del terreno, el agua fluye con mayor rapidez, disminuyendo el tiempo que tarda en concentrarse en los cauces principales. Esto, a su vez, incrementa el riesgo de crecidas rápidas, especialmente durante eventos de precipitación intensa.

Además, las características topográficas del relieve no solo afectan el flujo superficial, sino también la capacidad de infiltración y la retención de agua en el suelo, factores que influyen en la generación de escorrentía y en la respuesta hidrológica de la cuenca. Este tipo de información es esencial para la planificación hidrológica, permitiendo diseñar infraestructuras de control de inundaciones más eficaces y orientar estrategias de gestión del riesgo en áreas vulnerables. Por lo tanto, conocer la pendiente media de la cuenca no solo facilita la evaluación de riesgos, sino que también optimiza la gestión

integral del recurso hídrico en el contexto de cambios climáticos y eventos meteorológicos extremos.

Figura 25

Mapa de pendientes de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua



Nota: Mapa realizado por el tesista.

La distribución de las elevaciones de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, referenciada al nivel medio del mar, se muestra en la Figura 25, Figura 26 y en la Tabla 18. En este análisis se identifica que la **elevación máxima** corresponde al nevado Chuquiananta, con un valor de 5525 m s. n. m., según los datos extraídos del Modelo Digital de Elevación (DEM) SRTM. No obstante, al contrastar con la carta nacional, esta altitud alcanza los 5588 m s. n. m., lo que refleja una leve discrepancia entre ambas fuentes. La **elevación mínima** se encuentra en el exutorio de la cuenca, donde las aguas desembocan en el Océano Pacífico, registrando una altura de 0 metros, que corresponde al nivel medio del mar.

Esta variación altitudinal permite identificar la presencia de seis regiones naturales, conforme a la clasificación de Pulgar (2014):

1. Costa o Chala: 0 – 500 m s. n. m.
2. Yunga: 500 – 2500 m s. n. m.
3. Quechua: 2500 – 3500 m s. n. m.
4. Suni o Jalca: 3500 – 4000 m s. n. m.
5. Puna: 4000 – 4800 m s. n. m.
6. Janca o Cordillera: 4800 – 6768 m s. n. m.

La diversidad topográfica de la cuenca, que abarca desde zonas costeras bajas hasta altas cumbres montañosas, influye significativamente en los procesos hidrológicos y climáticos. Las áreas más bajas, cercanas al nivel del mar, presentan un clima más árido y escasa escorrentía, mientras que las zonas más altas, por encima de los 4000 m s. n. m., funcionan como reservorios naturales, acumulando nieve y generando caudales que alimentan los ríos principales y en estas zonas se ubican los bofedales.

Comprender la distribución altitudinal es esencial para la gestión integral del recurso hídrico y el uso y cobertura de la tierra, ya que cada región demanda un enfoque específico para su manejo. La variabilidad en altitudes condiciona la disponibilidad del agua, la infraestructura necesaria para su aprovechamiento, y la gestión de riesgos asociados a fenómenos como inundaciones y sequías, lo que hace indispensable una planificación adaptativa y diferenciada para cada sector de la cuenca.

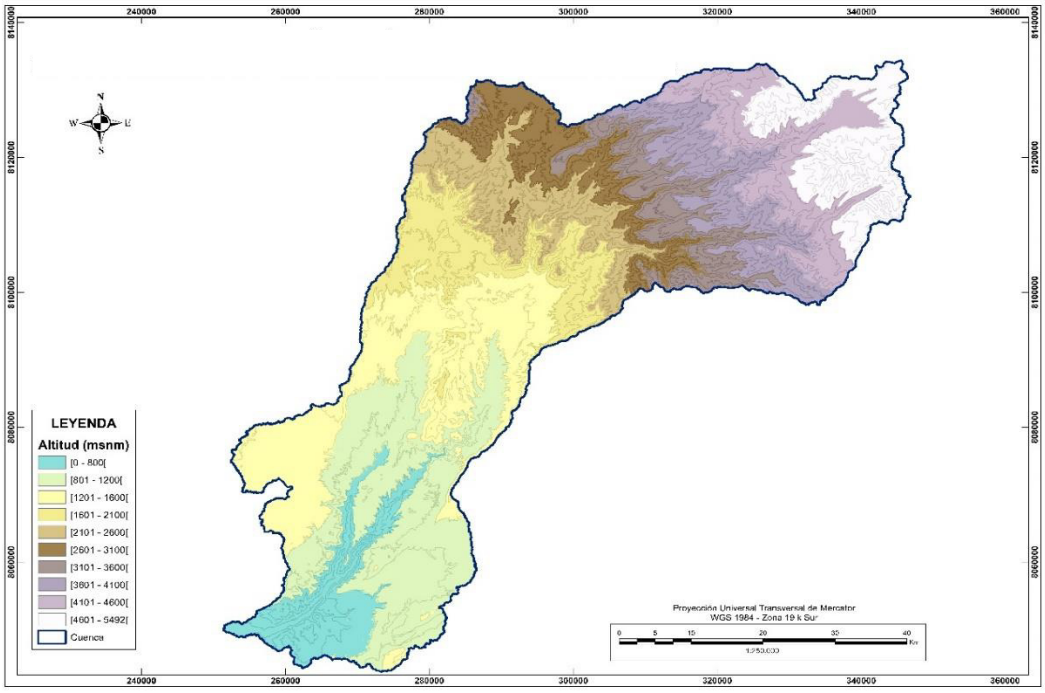
A partir de los resultados de la clasificación altitudinal presentados en la Tabla 18, se ha elaborado la Curva Hipsométrica de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, la cual se muestra en la Figura 27. Esta curva describe la distribución del área en función de la altitud, proporcionando una visión clara de cómo varía el relieve dentro de la cuenca. La gráfica permite observar cómo la superficie acumulada disminuye progresivamente a medida que se incrementa la altura, siendo esta una herramienta esencial para entender la morfología y la dinámica hidrológica de la cuenca.

El análisis revela que la mayor parte de la superficie de la cuenca se encuentra en el rango comprendido entre los 801 y 1200 m s. n. m., representando un 18,24 % del área total que se detalla en la Tabla 19 y Figura 27. Conforme a Aybar et al. (2017) y Sabino (2019) estos intervalos altitudinales son significativos, ya que suele coincidir con zonas de

transición climática y ecológica, donde las condiciones de temperatura y precipitación son intermedias, favoreciendo una mayor variabilidad en la vegetación y los usos de la cobertura de la tierra.

Figura 26

Distribución de las elevaciones de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua



Nota: Mapa realizado por el tesista.

Tabla 19

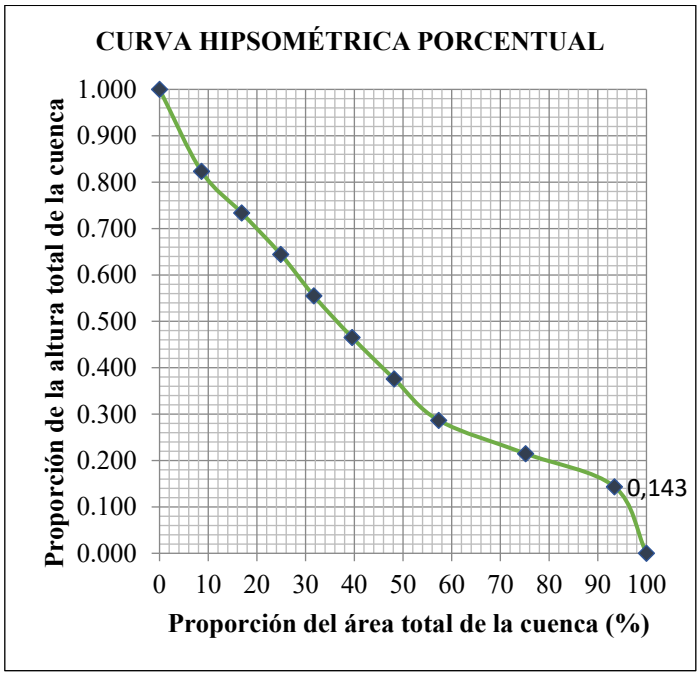
Distribución de las elevaciones de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua

N°	COTA (msnm)			Área (km2)				
	Mínima	Máxima	Promedio "Ci"	Área Parcial (km^2) "Ai"	Área Acumulada (km^2)	Área sobre la superficie (km^2)	% de área entre C.N.	% de área sobre C.N.
1	0	800	400,0	232,45	232,45	3535,30	6,58 %	100,0
2	801	1200	1000,5	644,74	877,20	3302,84	18,24 %	93,4
3	1201	1600	1400,5	630,62	1507,82	2658,10	17,84 %	75,2
4	1601	2100	1850,5	323,78	1831,60	2027,48	9,16 %	57,3
5	2101	2600	2350,5	305,82	2137,42	1703,70	8,65 %	48,2
6	2601	3100	2850,5	277,58	2415,00	1397,88	7,85 %	39,5
7	3101	3600	3350,5	239,82	2654,81	1120,30	6,78 %	31,7
8	3601	4100	3850,5	284,05	2938,87	880,48	8,03 %	24,9

9	4101	4600	4350,5	291,85	3230,71	596,43	8,26 %	16,9
10	4601	5588	5094,5	304,58	3535,30	304,58	8,62 %	8,6
				3535,30			**100 %**	

Figura 27

Curva hipsométrica porcentual de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua



Nota: realizado por el tesista.

La **curva hipsométrica porcentual** presentada en la Figura 27 ilustra la distribución relativa de la altitud en relación con el área total de la cuenca. Según el enfoque de Strahler (1952), esta curva permite evaluar el estado evolutivo de una cuenca hidrográfica, proporcionando información clave sobre su desarrollo geomorfológico y capacidad de respuesta hidrológica.

En la gráfica se observa la curva hipsométrica de la cuenca, donde se ha destacado el punto de inflexión en (93,4 %, 0,143). Esta interpretación ofrece una visión integral del estado evolutivo de la cuenca:

1. *Punto de Inflexión:*

El punto de inflexión revela una transición crítica en la distribución del área respecto a la altitud. Aquí se marca el cambio desde un relieve más activo y empinado hacia zonas más estables y suavizadas. Este comportamiento indica que, aunque hay actividad erosiva en las partes altas, la mayor parte del área está situada en altitudes más bajas, cerca del nivel base.

2. *Estado Evolutivo:*

La cuenca se encuentra en una fase madura, acercándose a la senescencia, encontrándose una combinación de rasgos:

a) Pendiente pronunciada al inicio de la curva: se observa un descenso rápido en la proporción de altura entre 0 % y 20 % del área total. Esto indica que una parte significativa del área se encuentra en altitudes más elevadas, lo que es típico de cuencas en etapas juveniles o activamente erosionadas, donde el relieve aún no ha sido ampliamente nivelado por procesos de erosión.

b) Segmento intermedio más suave: la pendiente de la curva en el intervalo intermedio (aproximadamente del 20 % al 80 % del área) refleja una distribución más gradual del relieve, lo que sugiere que la cuenca ha alcanzado un cierto equilibrio geomorfológico. En esta fase, es probable que la erosión y la sedimentación estén relativamente equilibradas, lo que se asocia con un estado maduro del paisaje.

c) Descenso abrupto al final: el tramo final de la curva (80 % a 100 % del área) muestra una caída rápida en la altitud, indicando que las áreas más bajas de la cuenca se concentran cerca del nivel base (como ríos o exutorios que desembocan en cuerpos de agua). Este patrón es característico de cuencas en fase tardía de evolución o senescencia, donde el relieve ha sido progresivamente suavizado por la erosión.

3. *Implicaciones Hidrológicas:*

Las pendientes pronunciadas en las partes altas generan un flujo rápido, lo que aumenta el riesgo de erosión y escorrentía intensa. En contraste, las áreas bajas más

planas favorecen la infiltración y la acumulación de sedimentos, ayudando a regular los caudales y disminuyendo el riesgo de inundaciones.

4. *Conclusiones:*

Esta curva hipsométrica es representativa de una cuenca en transición hacia una mayor estabilidad. Es fundamental considerar estos resultados en la planificación territorial y la gestión de riesgos, identificando las zonas con mayor vulnerabilidad a procesos erosivos y aprovechando las áreas de mayor acumulación para la gestión de recursos hídricos.

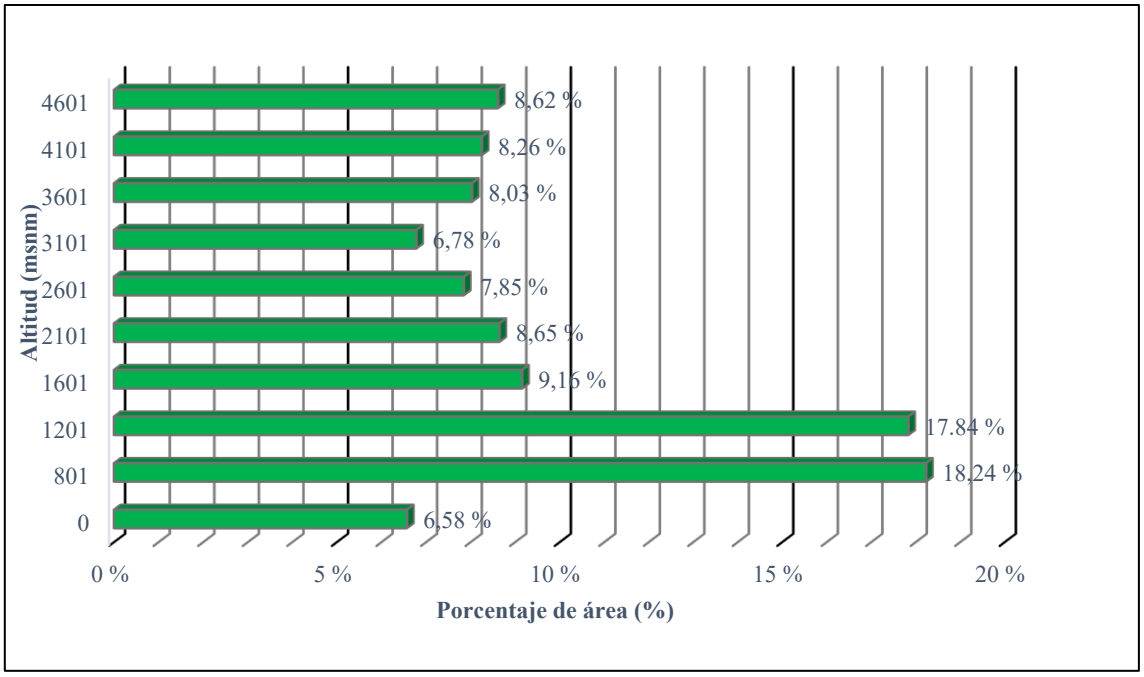
La interpretación integral de esta curva sugiere que la cuenca está en una fase avanzada de desarrollo, pero aún conserva actividad significativa en las partes altas, lo que hace crucial aplicar estrategias diferenciadas para manejar la erosión y el flujo en distintos niveles altitudinales

El **polígono de frecuencia de altitudes** de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, representado en la Figura 28, ilustra las altitudes más predominantes dentro del territorio de la cuenca. Esta representación gráfica se elaboró a partir de los datos proporcionados en la Tabla 18, mostrando la distribución altitudinal en función del porcentaje de área que ocupa cada intervalo de altitud. El rango abarca desde los 0 hasta los 5588 m s. n. m., cubriendo tanto las zonas costeras como las áreas más elevadas de la cuenca.

Comprender cómo se distribuyen las altitudes en la cuenca proporciona información valiosa para la planificación territorial, la evaluación de riesgos asociados a fenómenos naturales y la identificación de zonas prioritarias para conservación. La variabilidad topográfica condiciona los patrones de escurrimiento, así como la disponibilidad de agua en diferentes sectores, haciendo indispensable adaptar las estrategias de gestión a las características propias de cada rango altitudinal.

Figura 28

Polígono de frecuencia de altitudes de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua



Nota: Realizado por el tesista.

La **altitud media** de la cuenca se obtuvo a partir de los datos presentados en la Tabla 14, aplicando la ecuación (5), con un resultado de **2389,92 m s. n. m.** Este valor constituye un parámetro fundamental para el análisis de los procesos hidrológicos de la cuenca, como el escurrimiento superficial y la distribución de caudales, al influir en el comportamiento de los flujos hídricos.

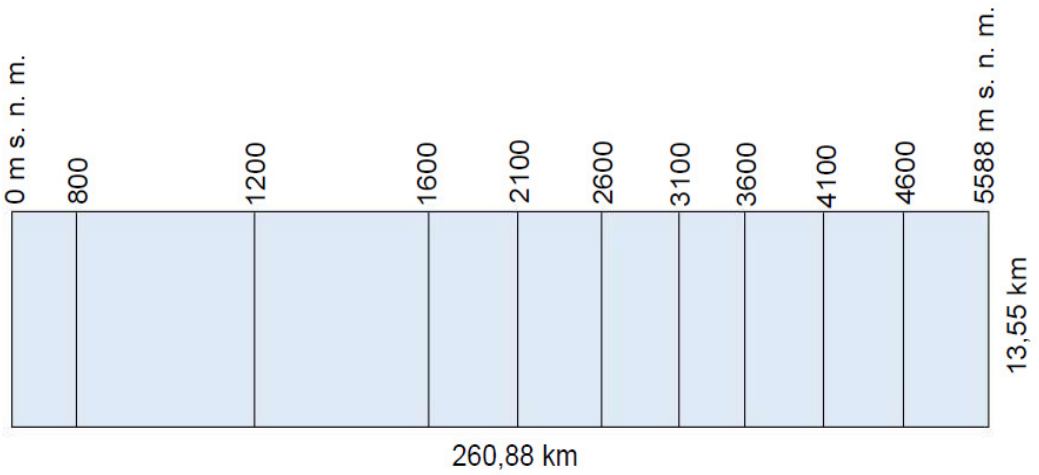
Al comparar la geometría de la cuenca hidrográfica con un **rectángulo equivalente**, se obtuvo una longitud de 260,88 km y un ancho de 13,55 km, evidenciando su morfología alargada, como se muestra en la Figura 29. Las dimensiones del rectángulo se calcularon aplicando las ecuaciones (6) y (7), que corresponden al lado mayor (L) y al lado menor (l), respectivamente. Según Monsalve Sáenz (1999), las áreas entre las curvas de nivel dentro de este rectángulo son equivalentes a las áreas delimitadas por dichas curvas en la cuenca, lo que establece una correspondencia directa con su curva hipsométrica.

Por otro lado, Londoño Arango (2001) destaca que esta forma alargada tiene una influencia significativa en la dinámica hidrológica de la cuenca, ya que prolonga el tiempo de concentración de las precipitaciones y modifica los patrones de escurrimiento

superficial. Esto implica que los caudales tienden a concentrarse de manera más lenta, aumentando la posibilidad de acumulación y elevando el riesgo de inundaciones en zonas bajas. Asimismo, dicha configuración geométrica es un aspecto crucial para la planificación de infraestructuras hidráulicas, ya que influye en el diseño de sistemas de drenaje y en las estrategias de manejo de aguas, especialmente durante eventos climáticos extremos.

Figura 29

Polígono de frecuencia de altitudes de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua



El análisis de la **pendiente del cauce principal** se realizó utilizando varios índices. La pendiente del lecho o cauce principal (Sp) permitió inferir y concordar con lo indicado con Monsalve Sáenz (1999), que a mayor inclinación, mayor es la velocidad del flujo de escurrimiento superficial. La pendiente media (S1), un índice que representa la inclinación promedio de la corriente principal, fue calculada en 0,03 m/m mediante la ecuación (8), lo que equivale al 3 % al expresarlo en porcentaje.

El análisis de pendiente del lecho o cauce principal (Sp) se llevó a cabo mediante varios índices clave, permitiendo inferir que un mayor grado de inclinación genera un aumento en la velocidad del flujo superficial:

- La pendiente media (S_1), calculada mediante la ecuación (8), arrojó un valor de 0,03 m/m, equivalente al 3 %. Esta medida ofrece una representación aproximada de la inclinación general del cauce.

- La pendiente ponderada media (S_2) se determinó en 0,025 m/m ó 2,5 % (según la ecuación 9). Este índice es más representativo del comportamiento del flujo a lo largo del cauce, ayudando a identificar las zonas con mayor velocidad del flujo, donde la erosión puede ser más significativa.

- La pendiente equivalente constante (S_3), calculada con los datos de la Tabla 15 mediante la ecuación (10), resultó en 0,03 m/m ó 3 %. Este valor indica que el flujo a lo largo del perfil longitudinal del río Ilo-Moquegua es relativamente uniforme, lo que sugiere que el tiempo de recorrido del agua es constante en toda su extensión.

El **coeficiente de masividad (Cm)** de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua fue calculado mediante la ecuación (11), obteniendo un valor de 0,68 m s. n. m. Este coeficiente. según las referencias citadas por Trujillo et al. (2010). se clasifica como moderadamente montañoso, ya que el resultado se encuentra dentro del rango típico de 0 y 35. Este indicador es útil para caracterizar la complejidad del relieve y prever su influencia en la generación de escorrentía, dado que cuencas con valores más altos tienden a presentar flujos más rápidos y mayor erosión.

4. SISTEMA DE DRENAJE

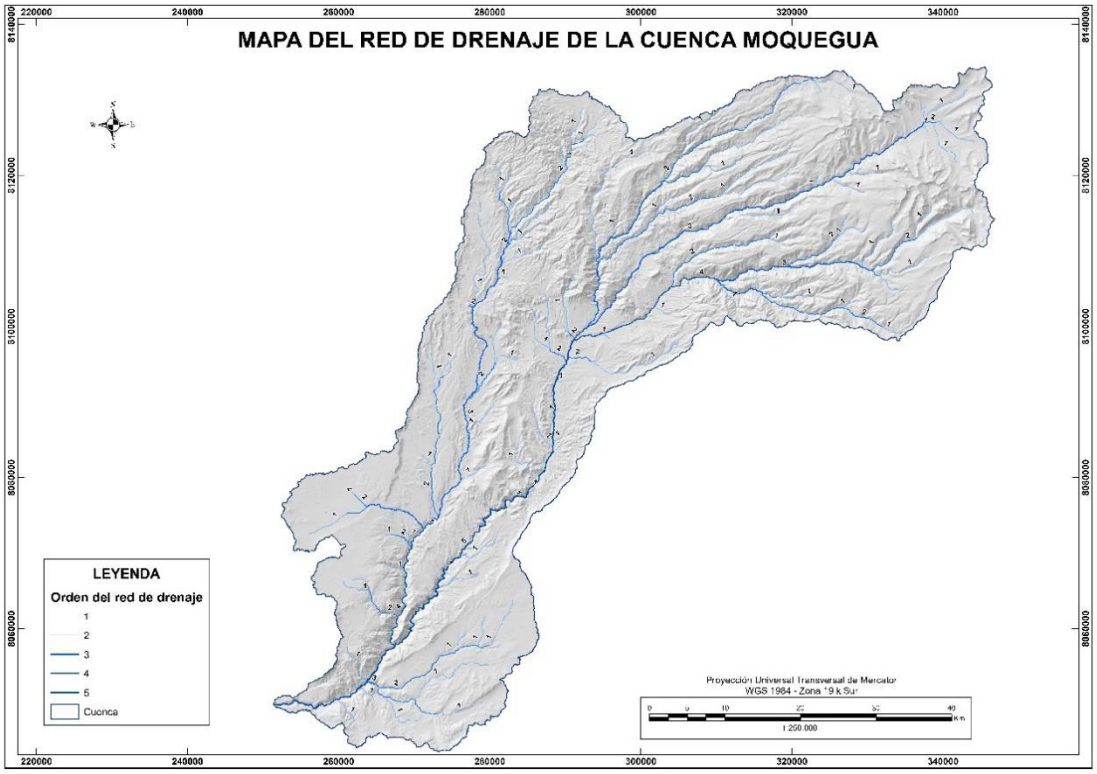
La cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua es drenada principalmente por el río Moquegua, que se forma a partir de la confluencia de los ríos Huaracane y Torata, a una altitud de 1295 m s. n. m. metros al oeste de la ciudad de Moquegua. Un afluente adicional, el río Tumilaca, se une desde la margen izquierda aproximadamente 2405 metros aguas abajo, complementando el sistema fluvial de la cuenca.

El río sigue un curso que se extiende desde el noreste hacia el suroeste, adoptando diferentes nombres a lo largo de su trayecto. En su tramo inicial, es conocido como río Moquegua, cambiando a río Osmore cuando atraviesa una zona encajonada, para finalmente recibir el nombre de río Ilo al ingresar al valle de Ilo. Según Monsalve Sáenz (1999), estos cuerpos fluviales se clasifican como ríos perennes, es decir, mantienen un flujo constante durante todo el año, aunque se ven reforzados estacionalmente por corrientes intermitentes y efímeras que emergen durante los periodos de precipitación.

La Figura 30 muestra la ordenación del flujo de la **red de drenaje** de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua de orden 5, determinada según el método de Strahler (1964), citado por con Gregory y Walling (1973) clasifica los ríos de acuerdo con la jerarquía de sus tributarios, donde los cursos de primer orden no tienen afluentes y el orden aumenta solo cuando dos cursos del mismo orden se unen. En este caso, un orden **5** sugiere una cuenca compleja y madura, capaz de manejar flujos significativos, lo que se traduce en una mayor capacidad de drenaje y transporte de sedimentos.

Figura 30

Red de drenaje de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua



Realizando el geoprocesamiento de datos para representar la Figura 30, se determinó que el número de **cursos de agua de 1° orden** son 101, estos los cursos de agua de primer orden son los tributarios más pequeños que no tienen afluentes. Tener **101** sugiere una alta ramificación en la red, lo que puede indicar una topografía con pendientes pronunciadas o mayor capacidad para generar escorrentía en eventos de lluvia.

También se determinó que el número total de cursos de agua son 201, lo que indica una red densa, que es típica de cuencas con alta precipitación o alta fragmentación del terreno. Este valor da indicios sobre la complejidad del drenaje.

La **longitud total de ríos** es 1024,94 km, y un río principal de 147,05 km, el sistema refleja un área extensa con canales bien desarrollados. Esto es relevante en términos de transporte eficiente de agua y sedimentos hacia el exutorio de la cuenca, contribuyendo a la estabilidad hidrológica regional.

La **longitud del valle del río** (Lv) es 146,98 km, siendo casi igual a la del río principal, lo que implica una baja sinuosidad. Esto sugiere que el río podría estar relativamente alineado con la pendiente natural del terreno.

La **densidad de corriente** (Dc) resultante es 0,06, este valor mide la cantidad de cursos por unidad de área. Un valor bajo como **0,06** indica que el terreno tiene cierta capacidad de infiltrar agua o que las precipitaciones no generan rápidamente corrientes superficiales.

La **densidad de drenaje** (Dd) es 0,29 km/km², la densidad de drenaje mide la longitud total de los ríos por unidad de área. Un valor de **0,29 km/km²** sugiere una cuenca con moderada fragmentación y drenaje. Esto puede indicar que no toda la precipitación contribuye directamente a la escorrentía superficial, posiblemente por infiltración o almacenamiento.

La **extensión media del escurrimiento superficial** (Em) es 3,45 km, este parámetro indica la distancia promedio que recorre el agua antes de concentrarse en un canal definido. **3,45 km** es un valor que sugiere que la topografía permite que el agua recorra distancias significativas antes de canalizarse, típico de cuencas con una morfología suave.

La **sinuosidad del curso principal de agua** (Sc) es 1,00, indica que el río sigue un trayecto casi recto. Esto es común en áreas con fuertes pendientes o donde el canal está bien alineado con la pendiente regional.

El **coeficiente de Torrencialidad** (Ct) es 0,03, este coeficiente mide la tendencia de los ríos a ser torrenciales. Un valor bajo como **0,03** sugiere que los ríos tienen flujos relativamente estables y no presentan comportamientos altamente torrenciales.

El **tiempo de concentración** (tc) es 11,88 horas, tiempo que tarda el agua en viajar desde el punto más lejano de la cuenca hasta el exutorio. 11,88 horas, representa el tiempo máximo que tarda una gota de agua en recorrer la distancia más larga desde el punto más alejado de la cuenca hasta el exutorio. Un tiempo tan elevado sugiere una cuenca de gran tamaño o con condiciones que ralentizan el flujo, como una pendiente suave, vegetación densa o suelos con alta capacidad de infiltración. Además, este valor refleja que los picos de caudal pueden tardar en llegar al punto de control, lo que ofrece una ventana mayor para la gestión del flujo durante eventos de lluvia intensa.

5.2. Análisis de tendencias espaciales de cambios de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua entre los años 1972-2012-2023

Los resultados de tendencias espaciales de cambios en el uso y cobertura de la tierra se obtienen a través de varios geoprocesos que se consolidan en:

1. Cartografiado de la distribución espacial de las clases de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua para los años 1972, 2012 y 2023.
2. Análisis de tendencias espaciales de los cambios en el uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua entre los años 1972, 2012 y 2023.

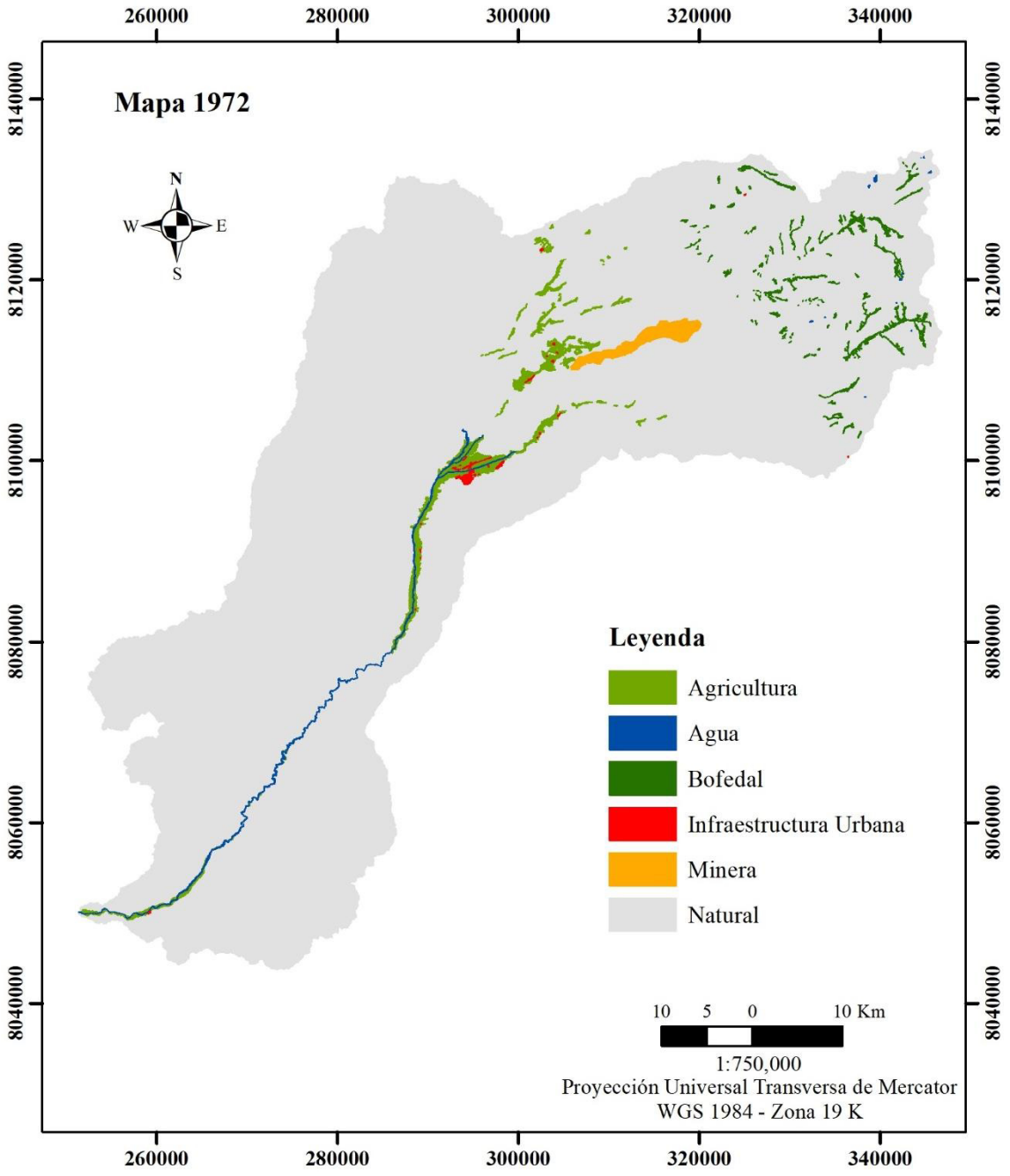
5.2.1. Cartografiado de la distribución espacial de clases de uso y cobertura de la tierra para los años 1972, 2012 y 2023.

La distribución espacial de las clases para cada año en estudio se presenta en orden cronológico de la siguiente manera:

1. La cartografía de la distribución espacial correspondiente al año 1972 se muestra en la Figura 31. En este mapa, se pueden identificar las seis clases de uso y cobertura de la tierra: “Agricultura”, “Agua”, “Bofedal”, “Infraestructura Urbana”, “Minera” y “Natural”.

Figura 31

Mapa de uso y cobertura de la tierra de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua de 1972



Nota. *Cartografía generada a partir de fotografías aéreas e imágenes de satélite Landsat-1.*

Observando el mapa de uso y cobertura de la tierra de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua de 1972 (Figura 31), podemos identificar que la cobertura “Natural“ ocupa la mayor superficie en el ámbito de estudio y la cobertura “Infraestructura Urbana” la menor superficie en el ámbito de estudio, confirmándose con el reporte de datos numéricos de la

Tabla 20, donde identificamos que la cobertura “Natural” tiene 343988,45 hectáreas y la cobertura “Infraestructura Urbana” tiene 232,19 hectáreas, que representan el 97,30 % y 0,07 % respectivamente, los que se representan estadísticamente en el gráfico de sectores mostrados en la Figura 32.

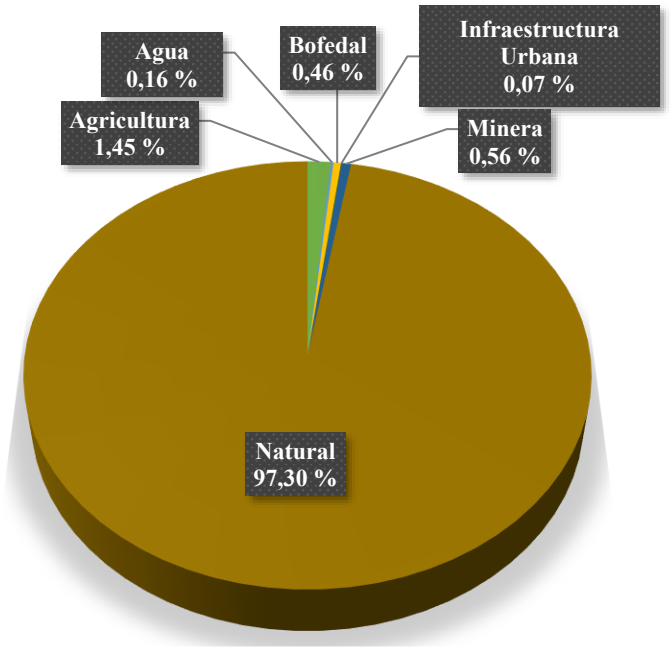
Tabla 20

Clases de uso y cobertura de la tierra de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua de 1972

Clases de uso y cobertura de la tierra de 1972	Área (ha)	Porcentaje (%)
Agricultura	5119,87	1,45
Agua	582,45	0,16
Bofedal	1638,55	0,46
Infraestructura Urbana	232,19	0,07
Minera	1968,90	0,56
Natural	343988,45	97,30
TOTAL	353530,41	100,00

Figura 32

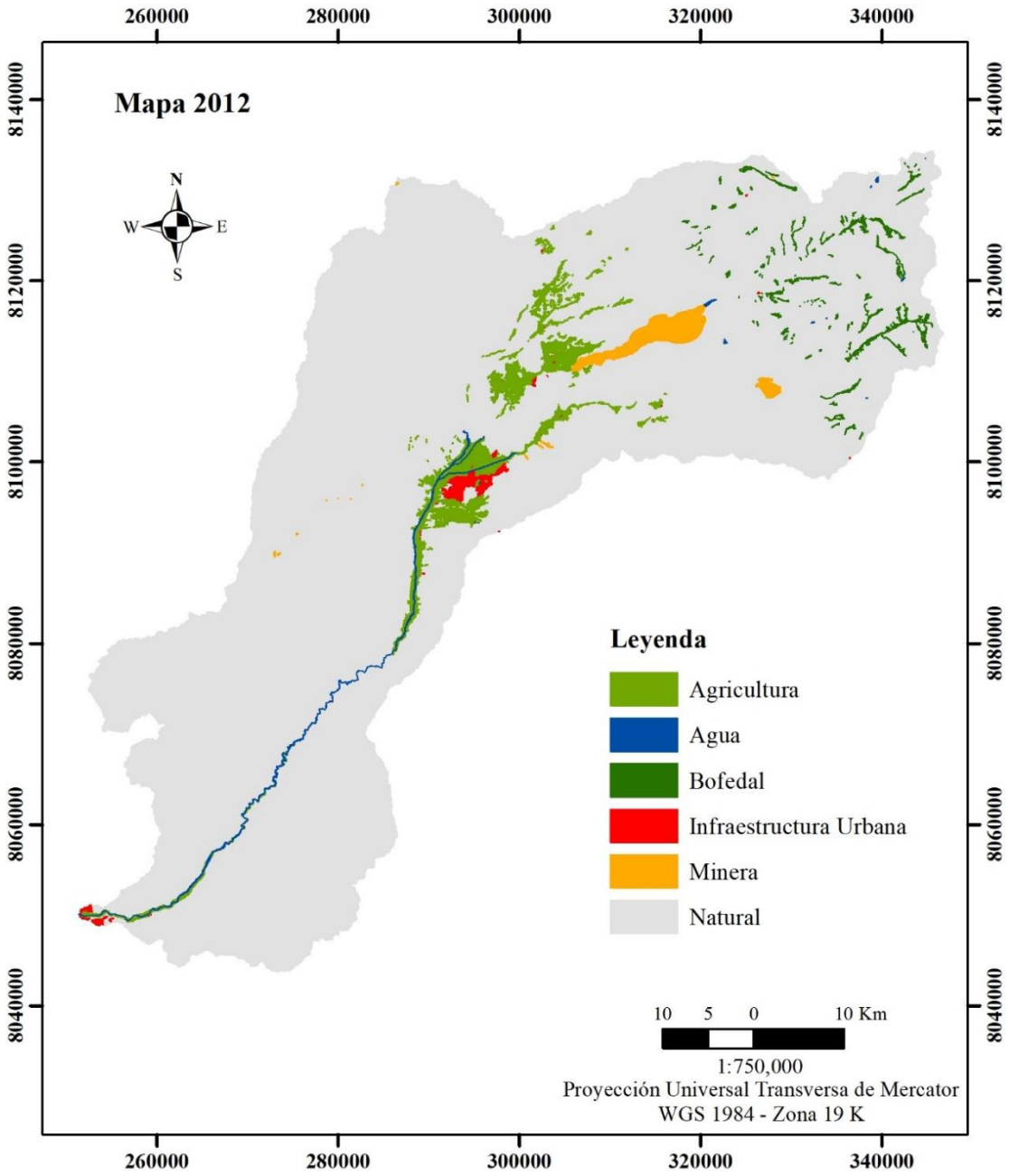
Representación estadística de las clases de uso y cobertura de la tierra de 1972



2. La Figura 33 exhibe la cartografía de la distribución espacial para el año 2012. En este mapa, se perciben las mismas seis clases de uso y cobertura de la tierra: "Agricultura," "Agua," "Bofedal," "Infraestructura Urbana," "Minera" y "Natural".

Figura 33

Mapa de uso y cobertura de la tierra de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua de 2012



Nota. *Cartografía generada a partir de imágenes de satélite Landsat-7.*

Observando la Figura 33, podemos identificar que la cobertura "Natural" ocupa la mayor superficie en el ámbito de estudio y la cobertura "Agua" la menor superficie en el ámbito de estudio, confirmándose con el reporte de datos numéricos de la Tabla 21, donde identificamos que la cobertura "Natural" tiene 337543,82 hectáreas y la cobertura "Agua"

tiene 599.23 hectáreas, que representan el 95,48 % y 0,17 % respectivamente, los que se representan estadísticamente en el gráfico de sectores mostrados en la Figura 34.

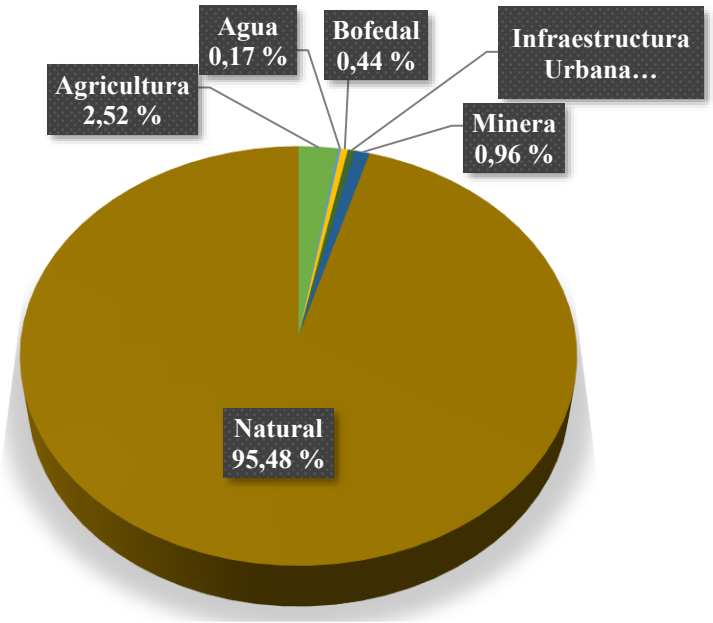
Tabla 21

Clases de uso y cobertura de la tierra de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua de 2012

Clases de uso y cobertura de la tierra de 2012	Área (ha)	Porcentaje (%)
Agricultura	8903,67	2,52
Agua	599,23	0,17
Bofedal	1547,50	0,44
Infraestructura Urbana	1527,35	0,43
Minera	3408,84	0,96
Natural	337543,82	95,48
TOTAL	353530,41	100,00

Figura 34

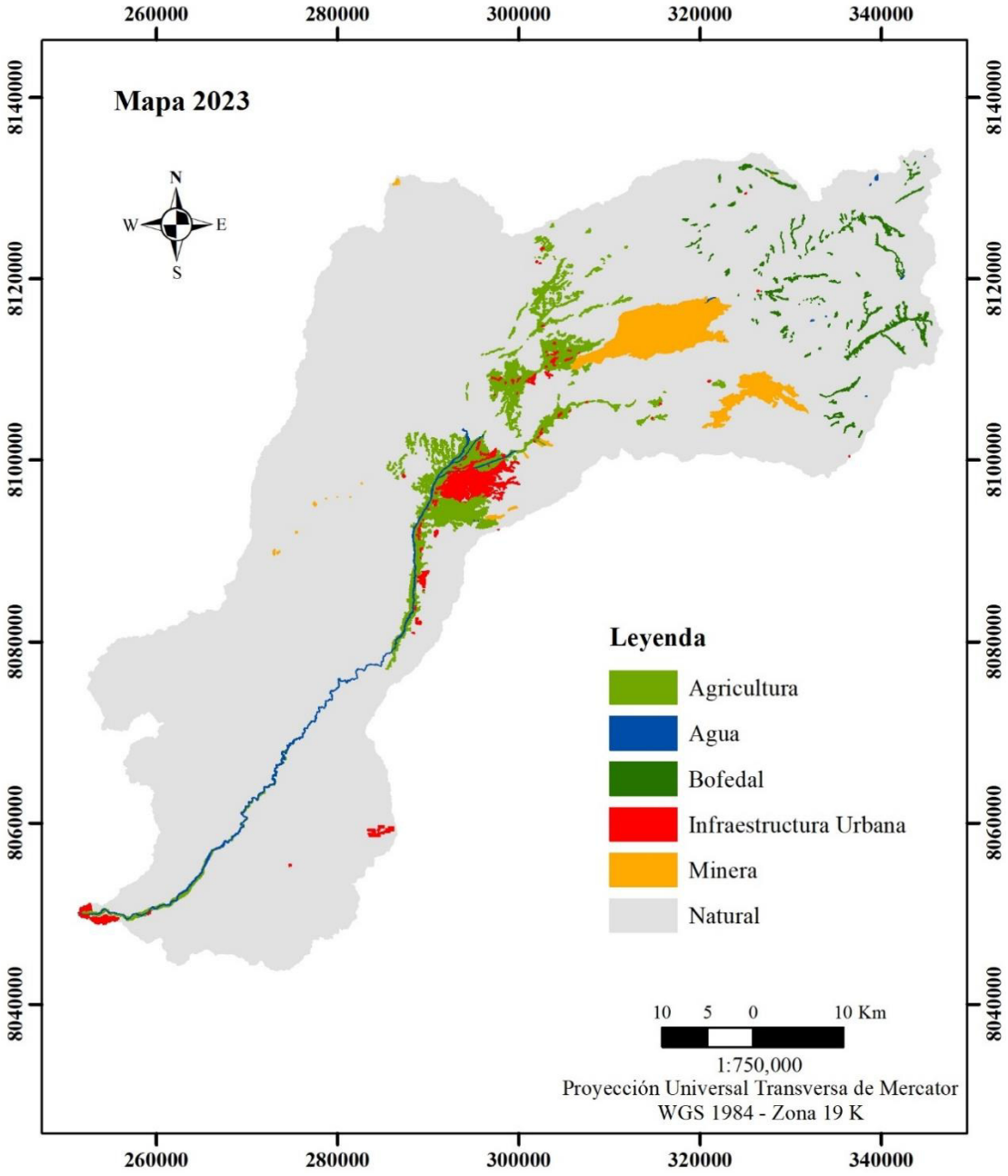
Representación estadística de las clases de uso y cobertura de la tierra de 2012



3. Asimismo, en la Figura 35 se presenta la cartografía de la distribución espacial para el año 2023, con las seis clases de uso y cobertura de la tierra: “Agricultura”, “Agua”, “Bofedal”, “Infraestructura Urbana”, “Minera” y “Natural”.

Figura 35

Mapa de uso y cobertura de la tierra de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua de 2023



Nota. *Cartografía generada a partir de imágenes de satélite Sentinel-2 A.*

Observando el mapa de uso y cobertura de la tierra de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua de 2023 (Figura 35), podemos identificar que la cobertura “Natural“ ocupa la mayor superficie en el ámbito de estudio y la cobertura “Agua” la menor superficie en el ámbito de estudio, confirmándose con el reporte de datos numéricos de la Tabla 22, donde identificamos que la cobertura “Natural” tiene 330521,89 hectáreas y la cobertura “Agua”

tiene 599,23 hectáreas, que representan el 93,49 % y 0,17 % respectivamente, los que se representan estadísticamente en el gráfico de sectores mostrados en la Figura 36.

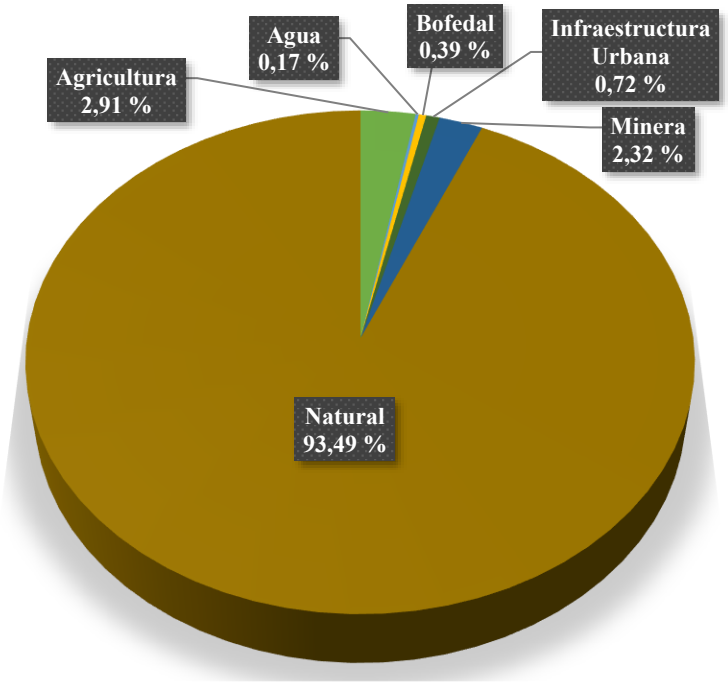
Tabla 22

Clases de uso y cobertura de la tierra de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua de 2023

Clases de uso y cobertura de la tierra de 2023	Área (ha)	Porcentaje (%)
Agricultura	10288,12	2,91
Agua	599,23	0,17
Bofedal	1384,68	0,39
Infraestructura Urbana	2541,13	0,72
Minera	8195,36	2,32
Natural	330521,89	93,49
TOTAL	353530,41	100,00

Figura 36

Representación estadística de las clases de uso y cobertura de la tierra de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua de 2023



La validación del mapa de 1972 fue corroborada y corregida la clasificación con las fotografías aéreas y mapas de los estudios de las Cuencas de los ríos Moquegua, Locumba, Sama y Caplina (ONERN, 1973), mientras que para la validación del mapa del 2012 fue corroborada y corregida la clasificación con imágenes de alta resolución de Google Earth Pro.

La validación del mapa 2023 fue validada con la salida de campo conforme a la clave de interpretación de imágenes de satélite de la presente investigación, así como imágenes de alta resolución de ArcMap, el modelo de clasificación presenta un excelente desempeño general con alta precisión de 98 %.

El desempeño por clases de acuerdo a la Tabla 23 demostró:

1. **Clases con Precisión Perfecta**: Infraestructura Urbana, Minera y Natural obtuvieron una precisión del 100 %, mostrando una clasificación sólida y sin errores.
2. **Clases con Inconsistencias Menores**: solo se observaron 6 puntos incorrectos entre todas las clases que son:
    - *Agricultura:* 3 puntos incorrectos (94 % de precisión), probablemente debido a confusiones con zonas naturales o de transición.
    - *Bofedal:* 2 puntos incorrectos (96 % de precisión), posiblemente relacionados con bordes mal definidos o confusiones con áreas agrícolas.
    - *Agua:* 1 punto incorrecto (98 % de precisión), tal vez debido a sombras o pequeños cuerpos de agua no detectados correctamente.

Tabla 23

Desempeño de la clasificación en términos de errores de omisión y comisión

Categoría	Puntos	Correcto	Incorrecto	Precisión del Producto (%)
Agricultura	50	47	3	94
Agua	50	49	1	98
Bofedal	50	48	2	96
Infraestructura Urbana	50	50	0	100
Minera	50	50	0	100
Natural	50	50	0	100

5.5.2. Análisis de tendencias espaciales de cambios de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua entre los años 1972, 2012 y 2023.

Los resultados del análisis de las tendencias espaciales de los cambios en el uso y cobertura de la tierra fueron divididos en los periodos específicos de 1972 a 2012 y del 2012 al 2023 y así como el periodo global de 1972 al 2023.

1. Análisis de las tendencias espaciales de los cambios en el uso y cobertura de la tierra en el periodo de 1972 a 2012.

El procesamiento de las imágenes correspondientes a los mapas de uso y cobertura de la tierra de los años 1972 y 2012 se realizó mediante la matriz de tabulación cruzada utilizando la herramienta CROSSTAB del software TerrSet IDRISI. Este análisis proporciona dos resultados principales:

El **primer resultado** es la matriz de tabulación cruzada que se presenta en la Tabla 24, donde las clases de cobertura para el año 2012 se organizan en columnas y las del año 1972 en filas, incluyendo sus respectivos totales. La clasificación se detalla de la siguiente manera:

Clase 0: Píxeles fuera del área de estudio, generados dentro de los límites de coordenadas Este y Norte de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua para completar la matriz de tabulación ("Envolvente").
Clase 1: Infraestructura Urbana.
Clase 2: Minera.
Clase 3: Agricultura.
Clase 4: Bofedal.
Clase 5: Agua.
Clase 6: Cobertura Natural.

Tabla 24
Matriz de tabulación cruzada de uso y cobertura de la tierra (1972-2012) en píxeles

Clases				**2012**				
1972	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**Total**
0	51136599	0	0	0	0	0	0	51136599
1	0	23219	0	0	0	0	0	23219
2	0	0	196890	0	0	0	0	196890
3	0	16062	0	495925	0	0	0	511987
4	0	0	0	0	154750	0	9105	163855
5	0	0	0	0	0	56552	1693	58245
6	0	113454	143994	394442	0	3371	33743584	34398845
Total	51136599	152735	340884	890367	154750	59923	33754382	86489640

La validación de estos resultados se realizó mediante pruebas estadísticas proporcionadas por CROSSTAB, obteniéndose los siguientes indicadores:

- Chi-cuadrado: 356607520 con 36 grados de libertad, con un p-value menor a 0,0001, lo que indica una asociación significativa entre las imágenes de 1972 y 2012.
- Coeficiente V de Cramer: 0,8290, lo que sugiere una correlación fuerte entre las variables categóricas, descartando la aleatoriedad de los datos.
- Índices Kappa de Concordancia (KIA): Se calculó el coeficiente KIA para cada clase, obteniéndose un índice global de 0,9841, lo que indica una concordancia casi perfecta (ver Tabla 25).

Tabla 25

Índices de concordancia Kappa (KIA) para la evaluación de precisión (1972-2012)

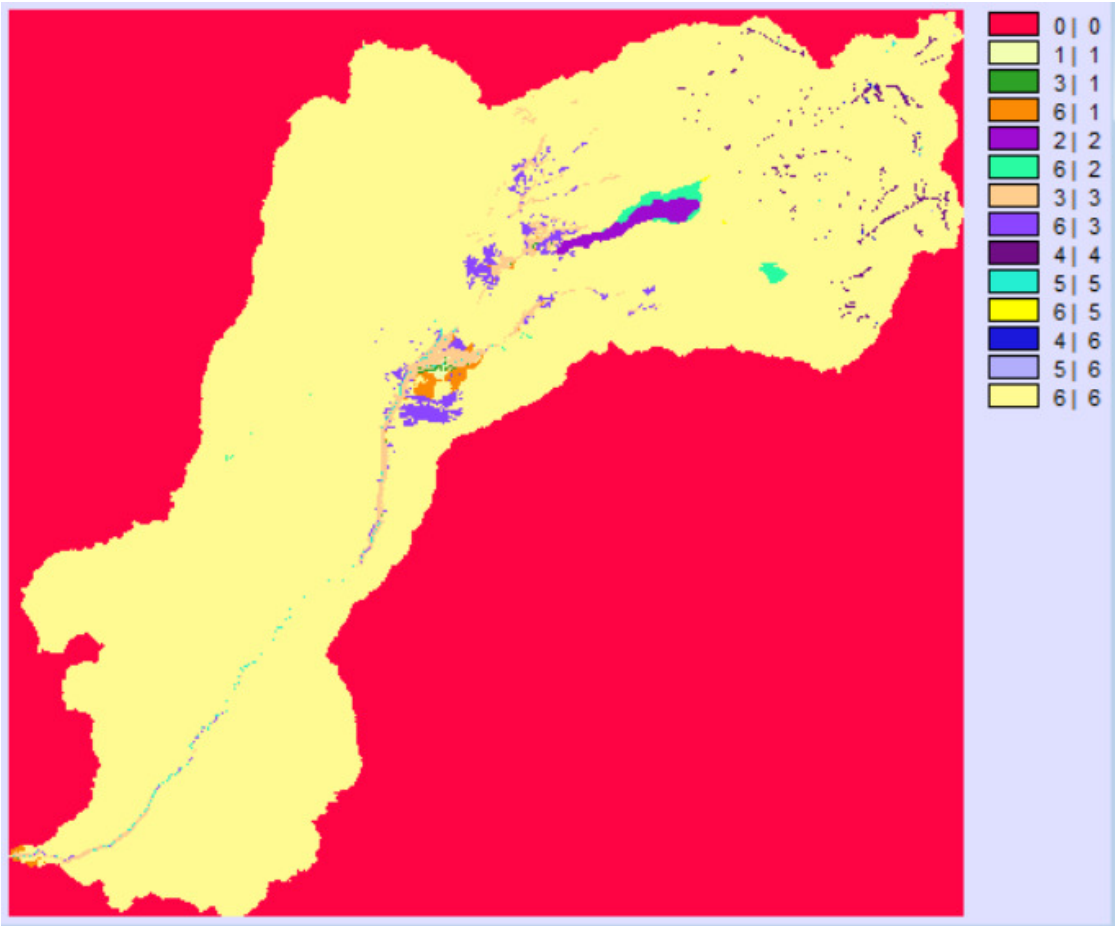
Clase	Descripción de clase	KIA 1972	KIA 2012
0	Sin clase	1,0000	1,0000
1	Infraestructura Urbana	1,0000	0,1518
2	Minera	1,0000	0,5766
3	Agricultura	0,9683	0,5544
4	Bofedal	0,9443	1,0000
5	Agua	0,9709	0,9437
6	Natural	0,9688	0,9995

El **segundo resultado** proporcionado por CROSSTAB es un mapa de combinaciones de clases de uso y cobertura de la tierra en los años 1972 y 2012, denominado Mapa de Clasificación Cruzada (Figura 37). Se identificaron 14 clases, agrupadas en tres categorías principales:

- **Áreas de pérdida:** superficies que experimentaron reducción en su categoría original (ejemplo: "Agricultura en 1972" convertida en "Infraestructura Urbana en 2012").
- **Áreas de aumento:** (ejemplo: superficies donde una clase de cobertura incrementó su extensión "Natural en 1972" convertida en "Minera en 2012").
- **Áreas de permanencia:** superficies donde no hubo cambios en la cobertura de la tierra (ejemplo: "Infraestructura Urbana en 1972" que sigue siendo "Infraestructura Urbana en 2012").

Figura 37

Mapa de clasificación cruzada del uso y cobertura de la tierra (1972-2012)



Al analizar el mapa de la Figura 37, se observa que la cuenca experimentó transformaciones significativas en el paisaje durante los 40 años evaluados, cuantificadas en hectáreas en la Tabla 26. Considerando que el tamaño de cada píxel es 10 metros por lado (equivalente a 0.01 hectáreas), se obtienen los cambios de cobertura en unidades de área.

Tabla 26

Matriz de tabulación cruzada de uso y cobertura de la tierra (1972-2012) convertida a hectáreas

Clases 1972	2012						
	Infraestructura Urbana	Minera	Agricultura	Bofedal	Agua	Natural	Total 1972
Infraestructura Urbana	**232,19**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	232,19
Minera	0,00	**1968,90**	0,00	0,00	0,00	0,00	1968,90

Agricultura	160,62	0,00	**4959,25**	000	0,00	0,00	5119,87
Bofedal	0,00	0,00	0,00	**1547,50**	0,00	91,05	1638,55
Agua	0,00	0,00	0,00	0,00	**565,52**	16,93	582,45
Natural	1134,54	1439,94	3944,42	0,00	33,71	**337435,84**	343988,45
Total 2012	1527,35	3408,84	8903,67	1547,50	599,23	337543,82	353530,41

Analizando el mapa de cambios del uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua en el periodo de 1972 a 2012 (Figura 37) y los datos de área en hectáreas de la Tabla 27, se identifica que las cantidades que están en la diagonal resaltadas en negrita corresponde a las áreas de permanencia en su clase y los demás valores corresponden a las áreas de cambio que se agrupan en 07 categorías, siendo la clase que ocupa menor área es “Agua a Natural” con 16,93 hectáreas y la mayor área de cambio es “Natural a Agricultura” con 3944.42 hectáreas, mostradas en la Tabla 27 y Figura 38.

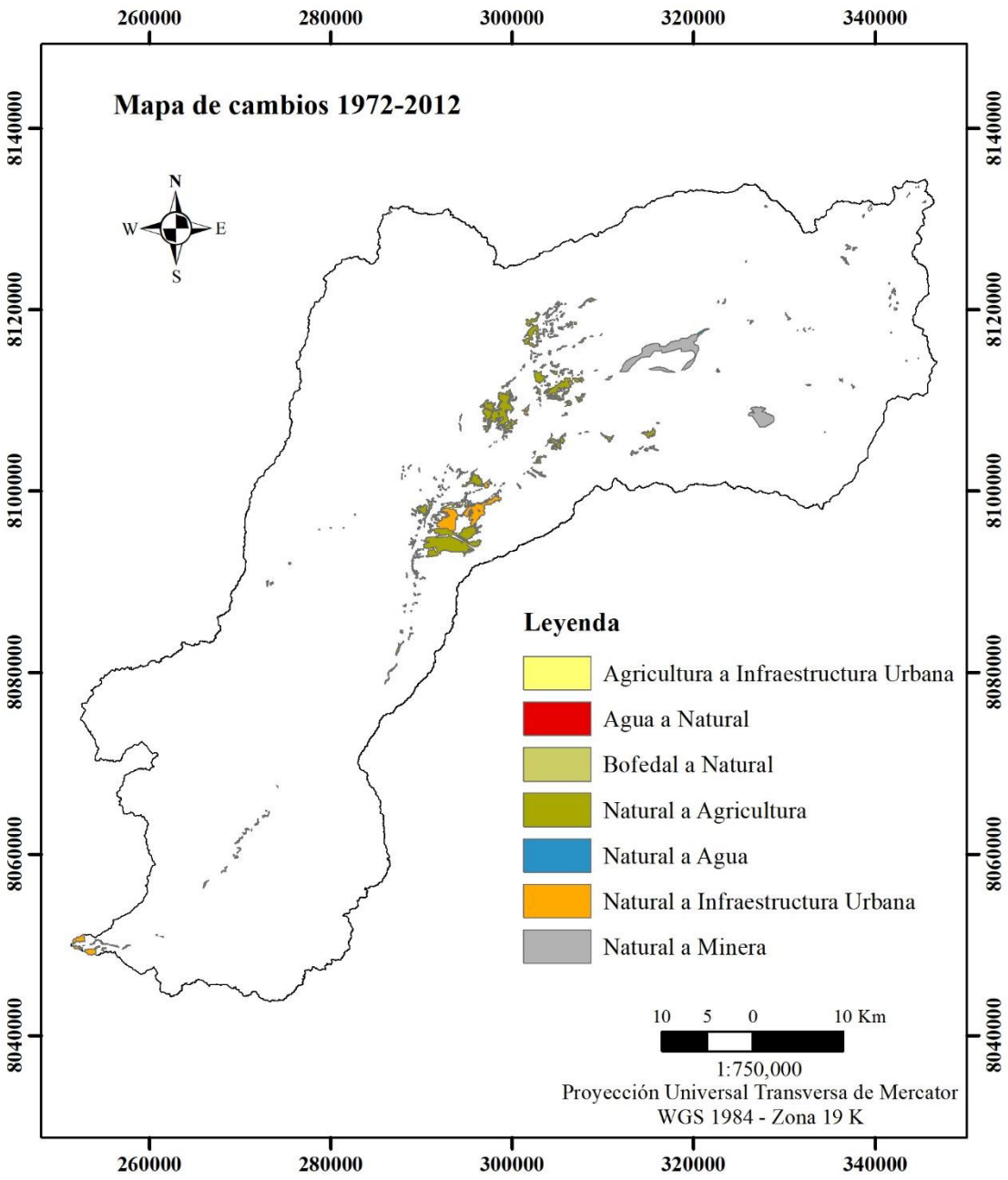
Tabla 27

Categorías de cambios del uso y cobertura de la tierra de 1972 a 2012

Categoría	Nombre de la clase que cambio	Hectáreas
1	Agua a Natural	16,93
2	Natural a Agua	33,71
3	Bofedal a Natural	91,05
4	Agricultura a Infraestructura Urbana	160,62
5	Natural a Infraestructura Urbana	1134,54
6	Natural a Minera	1439,94
7	Natural a Agricultura	3944,42

Figura 38

Mapa de cambios del uso y cobertura de la tierra de 1972 a 2012



Los cambios en la cobertura de la tierra se distribuyen en siete categorías de transición, ordenadas según la magnitud de área afectada:

1. De Agua a Natural: Reducción de lagunas altoandinas permanentes.
2. De Natural a Agua: Expansión debido a la construcción de la represa Cuajone y el reservorio Viña Blanca.

3. De Bofedal a Natural: Reducción de bofedales debido a procesos de aridificación.
4. De Agricultura a Infraestructura Urbana: Urbanización en zonas anteriormente agrícolas.
5. De Natural a Infraestructura Urbana: Expansión urbana sobre áreas naturales.
6. De Natural a Minera: Transformación de tierras naturales en zonas de explotación minera.
7. De Natural a Agricultura: Expansión agrícola sobre tierras naturales.

A partir de la matriz de tabulación cruzada (Tabla 26), se sintetizaron las variaciones en cada clase de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua entre 1972 y 2012. En la Tabla 28, se presentan los valores de permanencia, aumento y pérdida para cada categoría, lo que permite una mejor interpretación de los cambios ocurridos en el período analizado.

Tabla 28

Síntesis de los cambios del uso y cobertura de la tierra de 1972 a 2012

N°	Clase	Permanencia (ha)	Aumento (ha)	Perdida (ha)	Cambio (ha)
1	Infraestructura Urbana	232,19	1295,16	0,00	1295,16
2	Minera	1968,90	1439,94	0,00	1439,94
3	Agricultura	4959,25	3944,42	160,62	3783,80
4	Bofedal	1547,50	0,00	91,05	-91,05
5	Agua	565,52	33,71	16,93	16,78
6	Natural	337435,84	107,98	6552,61	-6444,63

Los resultados de la Tabla 28 indican que la clase Natural presentó la mayor pérdida con 6552,61 hectáreas y el aumento de superficie por actividades antrópicas e influencia económica de la actividad minera de Souther Perú con la unidad minera Cuajone. La clase Agricultura experimento el mayor aumento con 3944,42 hectáreas, seguida de la clase Minera con 1439,94 hectáreas y la clase infraestructura urbana con 1295,16 hectáreas.

En términos de permanencia, la clase Natural conservó 337435,84 hectáreas, representando la mayor superficie sin alteraciones, que se interpreta como una cuenca poco intervenida por la acción humana, pero se mencionar que una de las actividades económicas de importancia en la región de Moquegua es la Agricultura y se evidencia con la permanencia de la clase Agricultura con 4959,25 hectáreas, por lo que caracteriza a la

cuenca de estar ligada intrínsecamente a la actividad agrícola del valle, seguido de la clase Minera que permaneció con 1968,90 hectáreas que también caracteriza a la región de Moquegua como una zona minera en el País, la permanencia de la clase Bofedal con 1547,50 hectáreas nos da indicios de que aún se tiene aporte hídrico en estas zonas para la cría del ganado camélido principalmente; la clase agua permaneció con 565,52 hectáreas correspondiendo en gran parte a las lagunas altoandinas, mientras que la clase infraestructura urbana tuvo permanencia con 232,19 hectáreas, que prácticamente es el área inicial de los principales centros urbanos de la cuenca.

La mayor evolución y tasa de incremento del cambio del uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua en el periodo de 1972 al 2012 se dio en la clase Agricultura con 94,60 hectáreas por año, seguida por la clase Minera con 36,00 ha/año e infraestructura urbana con 32,38 ha/año y en menor área la clase de agua con 0,42 ha/año; por otro lado, la tasa de decremento se dio en la clase de Natural con 161,12 ha/año y la clase Bofedal con 2,28 ha/año, los datos se presentan en la Tabla 29.

Tabla 29

Tasa de cambio anual de uso y cobertura de la tierra de 1972 a 2012

Clase	UCT 1972	UCT 2012	CUCT (1972 – 2012)			
	Área (ha)	Área (ha)	Cambio de clase (ha)	Índice de Dinámica Temporal (%)	Tasa de cambio anual (ha/año)	Tasa de cambio anual (%/año)
Agricultura	5119,87	8903,67	3783,80	1,85	94,60	1,39
Agua	582,45	599,23	16,78	0,07	0,42	0,07
Bofedal	1638,55	1547,50	-91,05	-0,14	-2,28	-0,14
Infraestructura Urbana	232,19	1527,35	1295,16	13,95	32,38	4,82
Minera	1968,90	3408,84	1439,94	1,83	36,00	1,38
Natural	343988,45	337543,82	-6444,63	-0,05	-161,12	-0,05
Total	353530,41	353530,41				

Los cambios globales que se presentan la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua en el periodo de 1972 a 2012 representan el 1,93 % (6821,21 hectáreas) y las áreas de No cambio o persistencia en las clases representan el 98,07 % (346709,20 hectáreas,) los que se presentan en la Tabla 30.

Tabla 30

Reporte global de cambio y no cambio del uso y cobertura de la tierra de 1972 a 2012

Totales de uso y cobertura de la tierra	Área (ha)	Porcentaje (%)
Cambio	6821,21	1,93
No Cambio	346709,20	98,07
Total	353530,41	100,00

2. Análisis de las tendencias espaciales de los cambios en el uso y cobertura de la tierra en el periodo de 2012 a 2023.

Para evaluar los cambios en el uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua durante el periodo 2012-2023, se procesaron las imágenes correspondientes a estos años mediante el método de tabulación cruzada en CROSSTAB. Este análisis generó dos resultados principales.

El **primer resultado** se presenta en la Tabla 31, donde se comparan las clases de cobertura del año 2012 (filas) con las del año 2023 (columnas). Las categorías de uso y cobertura son las siguientes:

- Clase 0: Píxeles fuera del área de estudio (envolvente).
- Clase 1: Infraestructura Urbana.
- Clase 2: Minera.
- Clase 3: Agricultura.
- Clase 4: Bofedal.
- Clase 5: Agua.
- Clase 6: Cobertura Natural.

Tabla 31

Matriz de tabulación cruzada de uso y cobertura de la tierra (2012-2023) en píxeles

Clases				**2023**				
2012	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**Total**
0	51136599	0	0	0	0	0	0	51136599
1	0	152735	0	0	0	0	0	152735
2	0	0	340884	0	0	0	0	340884
3	0	4081	0	886286	0	0	0	890367
4	0	0	0	0	138468	0	16282	154750
5	0	0	0	0	0	59923	0	59923
6	0	97297	478652	142526	0	0	33035907	33754382
Total	51136599	254113	51956135	1028812	138468	59923	33052189	86489640

Para validar estos resultados, se aplicaron medidas estadísticas de asociación proporcionadas por CROSSTAB. El análisis Chi-cuadrado obtuvo un valor de 412801984 con 36 grados de libertad y un p-value menor a 0,0001, lo que indica una asociación significativa entre las imágenes de 2012 y 2023. Además, el coeficiente V de Cramer fue 0,8919, lo que sugiere una correlación casi perfecta entre las categorías, descartando la aleatoriedad de los datos.

El Índice de Kappa de Concordancia (KIA) para cada clase de cobertura (Tabla 32) refuerza la confiabilidad del análisis, con un índice global de 0,9836, lo que indica una alta concordancia en la clasificación de las imágenes.

Tabla 32

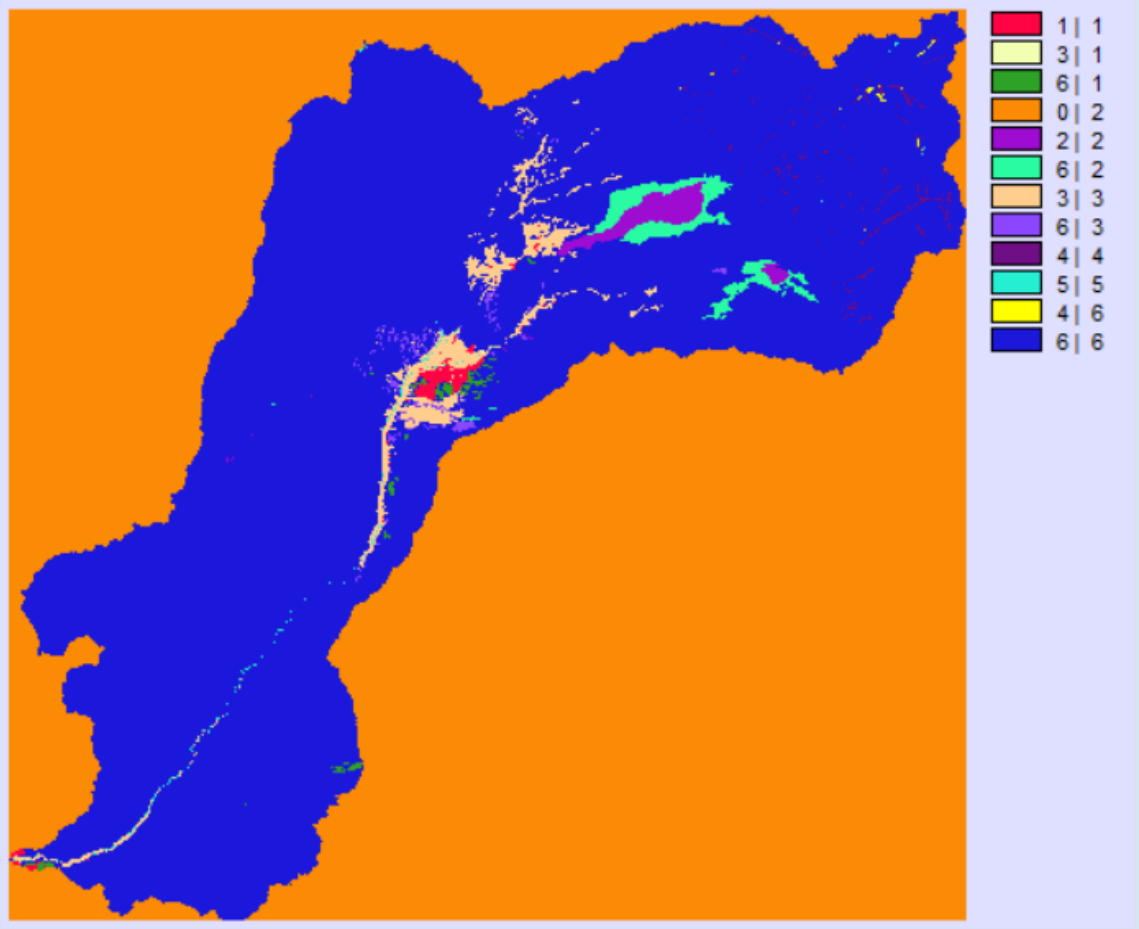
Índices de concordancia Kappa (KIA) para la evaluación de precisión (2012-2023)

Clase	Descripción de clase	KIA 2012	KIA 2023
0	Sin clase	1,0000	1,0000
1	Infraestructura Urbana	1,0000	0,6011
2	Minera	1,0000	0,4280
3	Agricultura	0,9954	0,8600
4	Bofedal	0,8946	1,0000
5	Agua	1,0000	1,0000
6	Natural	0,9669	0,9992

El **segundo resultado** que nos da CROSSTAB es la clasificación cruzada, generando una nueva imagen de todas las combinaciones de las clases de las imágenes de 2012 y 2023, denominada Mapa de Clasificación Cruzada de las clases de uso y cobertura de la tierra de la cuenca hidrográfica de 2012 y 2023, que se ilustra en la Figura 39, generándose 12 clases que incluyen las zonas de perdida, aumento y permanencia entre las clases. Por ejemplo la clase “3 | 1” se interpreta que en el año 2012 era clase “Agricultura” y en el 2023 es clase “Infraestructura Urbana”, por lo tanto, podemos deducir que en esas zonas hubo perdida de áreas en la clase “Agricultura” y aumento de áreas en clase “Infraestructura Urbana”, mientras las zonas de permanencia corresponden a la misma clase por ejemplo la clase “1 | 1” se interpreta que hubo permanencia de la clase “Infraestructura Urbana” desde 2012 al 2023.

Figura 39

Mapa de clasificación cruzada del uso y cobertura de la tierra (2012-2023)



El análisis de este mapa revela una transformación significativa del paisaje en la cuenca durante el periodo de estudio. Para cuantificar estos cambios, los valores de la Tabla 31 (expresados en píxeles) se convirtieron a hectáreas en la Tabla 33, considerando que cada píxel representa 0.01 hectáreas.

Tabla 33

Matriz de tabulación cruzada de uso y cobertura de la tierra (2012-2023) convertida a hectáreas

Clases 2012	2023						
	Infraestructura Urbana	Minera	Agricultura	Bofedal	Agua	Natural	Total 2012
Infraestructura Urbana	**1527,35**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1527,35
Minera	0,00	**3408,84**	0,00	0,00	0,00	0,00	3408,84
Agricultura	40,81	0,00	**8862,86**	0,00	0,00	0,00	8903,67

Bofedal	0,00	0,00	0,00	**1384,68**	0,00	162,82	1547,50
Agua	0,00	0,00	0,00	0,00	**599,23**	0,00	599,23
Natural	972,97	4786,52	1425,26	0,00	0,00	**330359,07**	337543,82
Total 2023	2541,13	8195,36	10288,12	1384,68	599,23	330521,89	353530,41

Analizando el Mapa de Cambios del Uso y Cobertura de la Tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua para el periodo 2012-2023 (Figura 39) y los datos de área en hectáreas de la Tabla 33, se observa que los valores en la diagonal resaltados en negrita representan las áreas de permanencia en su categoría original. Los demás valores corresponden a las áreas de cambio, las cuales se agrupan en cinco categorías principales. La transformación de menor magnitud se dio en la conversión de Agricultura a Infraestructura Urbana, con 40,81 hectáreas, mientras que el cambio más significativo corresponde a la conversión de clase Natural a Minera, con 4786,52 hectáreas, como se detalla en la Tabla 34 y se ilustra en la Figura 40.

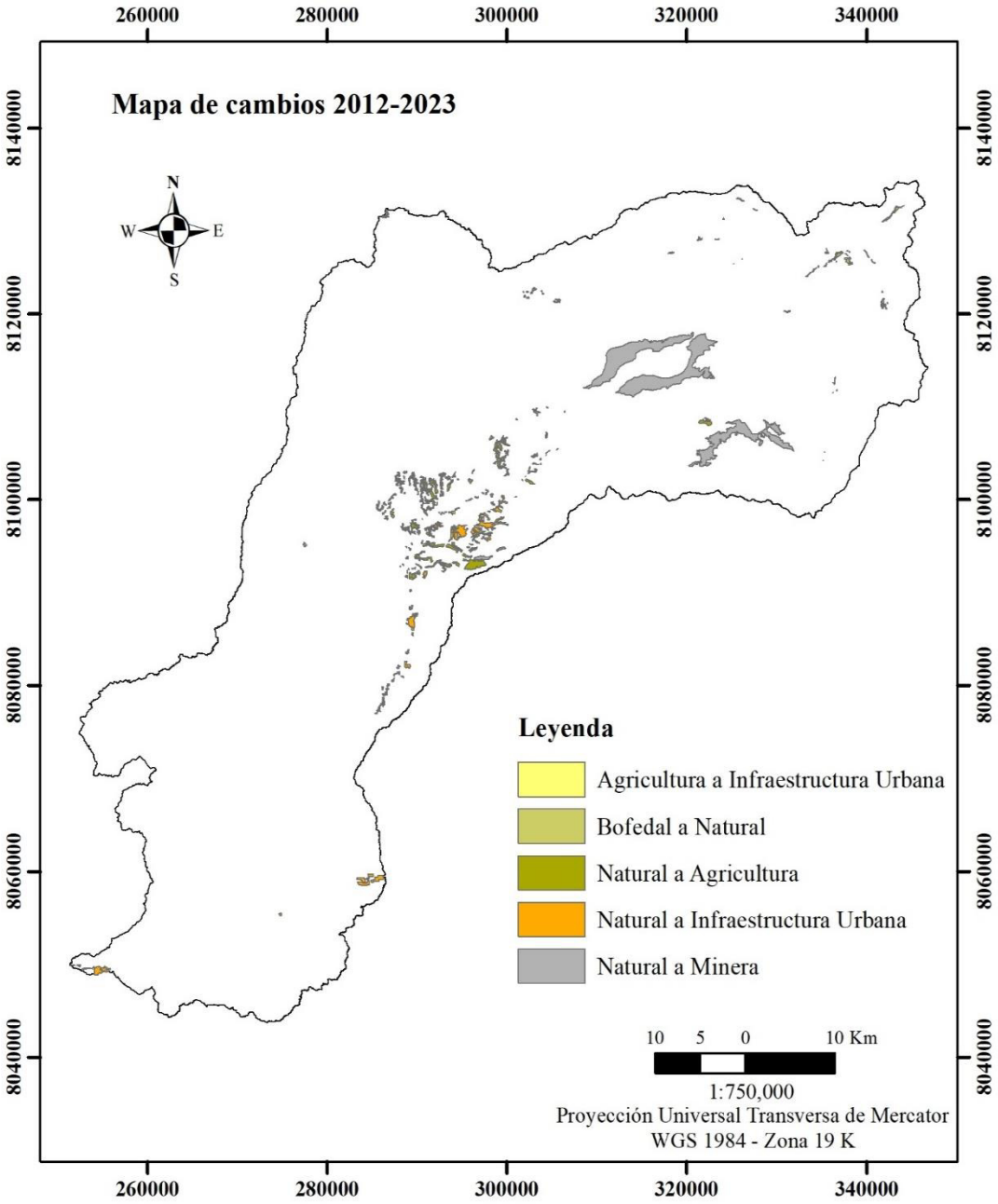
Tabla 34

Categorías de cambios del uso y cobertura de la tierra de 2012 a 2023

Categoría	Nombre de la clase que cambio	Hectáreas
1	Agricultura a Infraestructura Urbana	40,81
2	Bofedal a Natural	162,82
3	Natural a Infraestructura Urbana	972,97
4	Natural a Agricultura	1425,26
5	Natural a Minera	4786,52

Figura 40

Mapa de cambios del uso y cobertura de la tierra de 2012 a 2023



Podemos describir la localización de cada una de las cinco categorías que cambiaron de uso y cobertura de la tierra, en orden ascendente por ocupación de área:

1. De Agricultura a Infraestructura Urbana: zonas que ocupan 40.81 hectáreas, por lo general se localizan en las zonas más cercanas al radio urbano de Moquegua y en menores cantidades las que están cerca de Ilo.

2. De Bofedal a Natural: zonas que ocupan 162,82 hectáreas, correspondientes a áreas secas de bofedales que se localizan a más de 3500 m s. n. m.
3. De Natural a Infraestructura Urbana: zonas que ocupan 972,97 hectáreas, correspondientes a las áreas de expansión urbana e infraestructura urbana.
4. De Natural a Agricultura: zonas que ocupan 1425,26 hectáreas, correspondientes a las áreas de expansión agrícolas que se dan en la parte media del valle Moquegua y en la parte de los sectores del valle de Torata, principalmente.
5. De Natural a Minera: zonas que ocupan 4786,52 hectáreas, correspondientes a las áreas de expansión minera de la Unidad Minera Anglo American Quellaveco.

A partir de la matriz de tabulación cruzada (Tabla 33), los datos se sintetizaron en la Tabla 35 reflejando los cambios ocurridos en cada categoría:

- Permanencia: Áreas que no experimentaron cambios en su categoría original.
- Aumento: Superficie añadida a una categoría respecto a 2012.
- Pérdida: Reducción de la superficie de una categoría respecto a 2012

Tabla 35

Síntesis de los cambios del uso y cobertura de la tierra de 2012 a 2023

N°	Clase	Permanencia (ha)	Aumento (ha)	Perdida (ha)	Cambio (ha)
1	Infraestructura Urbana	1527,35	1013,78	0,00	1013,78
2	Minera	3408,84	4786,52	0,00	4786,52
3	Agricultura	8862,86	1425,26	40,81	1384,45
4	Bofedal	1384,68	0,00	162,82	-162,82
5	Agua	599,23	0,00	0,00	0,00
6	Natural	330359,07	162,82	7184,75	-7021,93

Los resultados muestran que la Minería registró el mayor aumento con 4786,52 ha, seguida por la Agricultura (1425,26 hectáreas) y la Infraestructura Urbana (1,013.78 hectáreas). En contraste, la Cobertura Natural tuvo la mayor pérdida, con 7184,75 hectáreas, reflejando la expansión de otras actividades sobre áreas naturales.

En términos de permanencia, la clase Natural mantuvo 330359,07 hectáreas, lo que representa la mayor superficie sin alteraciones. La Agricultura que se mantuvo con 8862,86 hectáreas, por lo que caracteriza a la cuenca de estar ligada intrínsecamente a la actividad

agrícola del valle, seguido de la clase Minera que persistió con 3408,84 hectáreas reflejando la estabilidad de estas actividades en la región.

La mayor tasa de cambio anual (ha/año) del cambio del uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua en el periodo de 2012 al 2023 se dio en la clase Minera con 435,14 hectáreas por año, seguida por la clase Agricultura con 125,86 ha/año y en menor área la clase de Infraestructura Urbana con 92,16 ha/año; por otro lado, la tasa de decremento se dio en la clase de Natural con 638,36 ha/año y la clase Bofedal con 14,80 ha/año, los datos se presentan en la Tabla 36.

Tabla 36

Tasa de cambio anual de uso y cobertura de la tierra de 2012 a 2023

Clase	UCT 2012	UCT 2023	CUCT (2012 – 2023)			
	Área (ha)	Área (ha)	Cambio de clase (ha)	Índice de Dinámica Temporal (%)	Tasa de cambio anual (ha/año)	Tasa de cambio anual (%/año)
Agricultura	8903,67	10288,12	1384,45	1,41	125,86	1,32
Agua	599,23	599,23	0,00	0,00	0,00	0,00
Bofedal	1547,50	1384,68	-162,82	-0,96	-14,80	-1,01
Infraestructura Urbana	1527,35	2541,13	1013,78	6,03	92,16	4,74
Minera	3408,84	8195,36	4786,52	12,76	435,14	8,30
Natural	337543,82	330521,89	-7021,93	-0,19	-638,36	-0,19
Total	353530,41	353530,41				

El reporte global de Cambio y No Cambio (Tabla 37) muestra que, entre 2012 y 2023, el 2,09 % (7388,38 hectáreas) del territorio experimentó transformaciones significativas, mientras que el 97,91 % (346142,03 hectáreas) ha permanecido sin cambios.

Tabla 37

Reporte global de cambio y no cambio del uso y cobertura de la tierra de 2012 a 2023

Totales de uso y cobertura de la tierra	Área (ha)	Porcentaje (%)
Cambio	7388,38	2,09
No Cambio	346142,03	97,91
Total	353530,41	100,00

3. Análisis de las tendencias espaciales de los cambios en el uso y cobertura de la tierra en el periodo de 1972 a 2023.

El estudio de los cambios en el uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua a lo largo de los últimos 51 años (1972-2023) revela tendencias significativas en la transformación del paisaje. Utilizando la herramienta CROSSTAB de TerrSet, se procesaron las imágenes correspondientes a estos años mediante tabulación cruzada, obteniéndose dos resultados principales:

El **primer resultado** se muestra en la Tabla 38, donde se comparan las clases de cobertura del año 1972 (filas) con las del año 2023 (columnas). La clasificación utilizada es la siguiente:

- Clase 0: Píxeles fuera del área de estudio (envolvente).
- Clase 1: Infraestructura Urbana.
- Clase 2: Minera.
- Clase 3: Agricultura.
- Clase 4: Bofedal.
- Clase 5: Agua.
- Clase 6: Cobertura Natural.

Tabla 38

Matriz de tabulación cruzada de uso y cobertura de la tierra (1972-2023) en píxeles

Clases	2023							
1972	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**Total**
0	51136599	0	0	0	0	0	0	51136599
1	0	23219	0	0	0	0	0	23219
2	0	0	196890	0	0	0	0	196890
3	0	20125	0	491862	0	0	0	511987
4	0	0	0	0	138468	0	25387	163855
5	0	0	0	0	0	56552	1693	58245
6	0	210769	622646	536950	0	3371	33025109	34398845
Total	51136599	253804	792224	1028812	138468	59923	33079810	86489640

Para evaluar la confiabilidad de los datos, se aplicaron pruebas estadísticas de asociación. El análisis de Chi-cuadrado resultante fue de 307058400 con 36 grados de libertad y un p-level menor a 0,0001, lo que indica una asociación significativa entre las imágenes de 1972 y 2023. Además, el coeficiente V de Cramer fue 0,7692 indicando una

correlación fuerte entre las categorías y descartando la aleatoriedad en la distribución de los datos.

El Índice de Kappa de Concordancia (KIA) (Tabla 39) refuerza esta validación, con un índice global de 0,9677, lo que indica una alta concordancia en la clasificación de las imágenes:

Tabla 39

Índices de concordancia Kappa (KIA) para la evaluación de precisión (1972-2023)

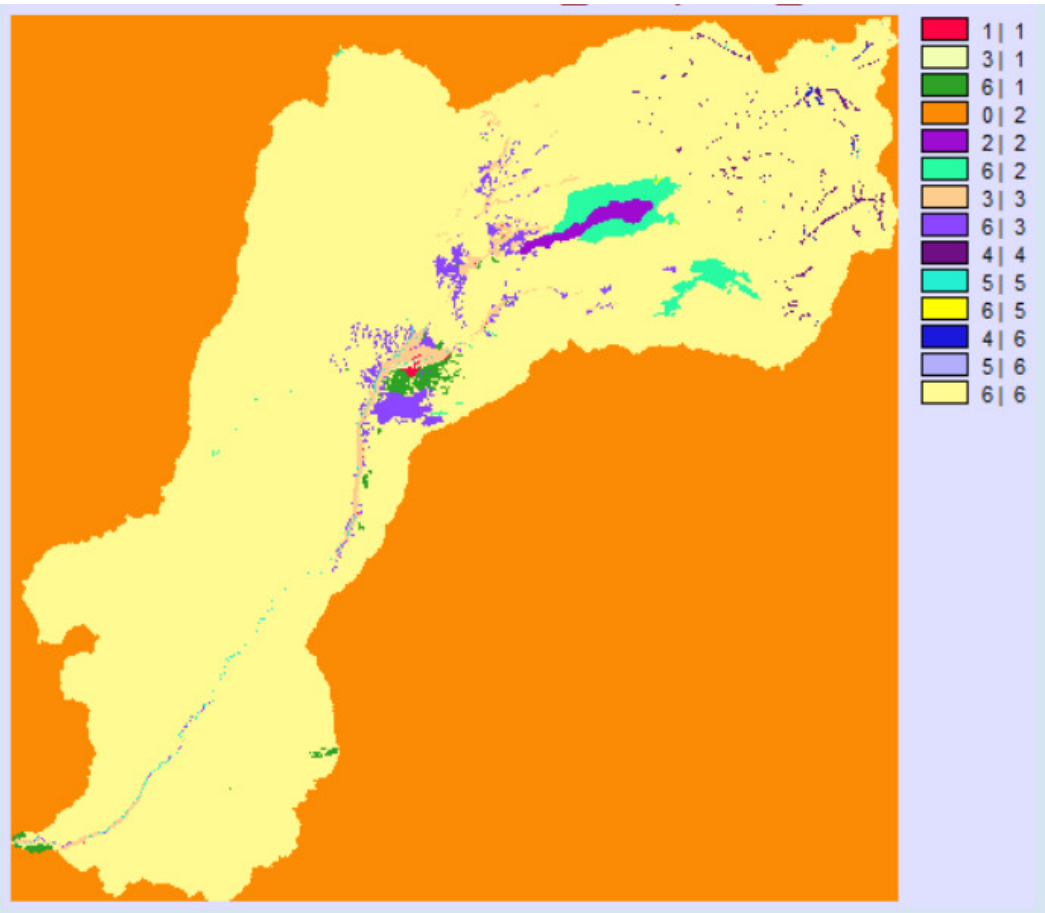
Clase	Descripción de clase	KIA 1972	KIA 2023
0	Sin clase	1,0000	1,0000
1	Infraestructura Urbana	1,0000	0,0912
2	Minera	1,0000	0,2468
3	Agricultura	0,9602	0,4750
4	Bofedal	0,8448	1,0000
5	Agua	0,9709	0,9437
6	Natural	0,9366	0,9986

El **segundo resultado** es el Mapa de Clasificación Cruzada (Figura 41), que muestra la transformación de las clases de uso y cobertura de la tierra en el periodo 1972-2023. Se identificaron 14 combinaciones de clases, agrupadas en tres categorías:

- **Áreas de permanencia**: superficies donde no hubo cambios en la cobertura de la tierra.
- **Áreas de pérdida**: superficies que experimentaron reducción en su categoría original.
- **Áreas de aumento**: superficies donde una clase de cobertura incrementó su extensión.

Figura 41

Mapa de clasificación cruzada del uso y cobertura de la tierra (1972-2023)



El análisis de este mapa revela una alteración significativa del paisaje a lo largo de las últimas cinco décadas. Para cuantificar estos cambios, los valores en píxeles de la Tabla 38 fueron convertidos a hectáreas en la Tabla 40, considerando un tamaño de píxel de 0,01 hectáreas.

Tabla 40

Matriz de tabulación cruzada de uso y cobertura de la tierra (1972-2023) convertida a hectáreas

Clases 1972	2023						
	Infraestructura Urbana	Minera	Agricultura	Bofedal	Agua	Natural	Total 1972
Infraestructura Urbana	**232,19**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	232,19
Minera	0,00	**1968,90**	0,00	0,00	0.00	0,00	1968,90
Agricultura	201,25	0,00	**4918,62**	0,00	0,00	0,00	5119,87
Bofedal	0,00	0,00	0,00	**1384,68**	0,00	253,87	1638,55

Agua	0,00	0,00	0,00	0,00	**565,52**	16,93	582,45
Natural	2107,69	6226,46	5369,50	0,00	33,71	**330251,09**	343988,45
Total 2023	2541,13	8195,36	10288,12	1384,68	599,23	330521,89	353530,41

Analizando la Figura 41 y los datos de área en hectáreas de la Tabla 40, se identifica que las áreas en la diagonal resaltadas en negrita representan las zonas de permanencia en su categoría original, mientras que los demás valores corresponden a las áreas de cambio, que se agrupan en 07 clases, siendo la clase “Agua a Natural” que ocupa menor área con 16,93 hectáreas y la mayor área de cambio es “Natural a Minera” con 6226,46 hectáreas, mostradas en la Tabla 41 y Figura 42.

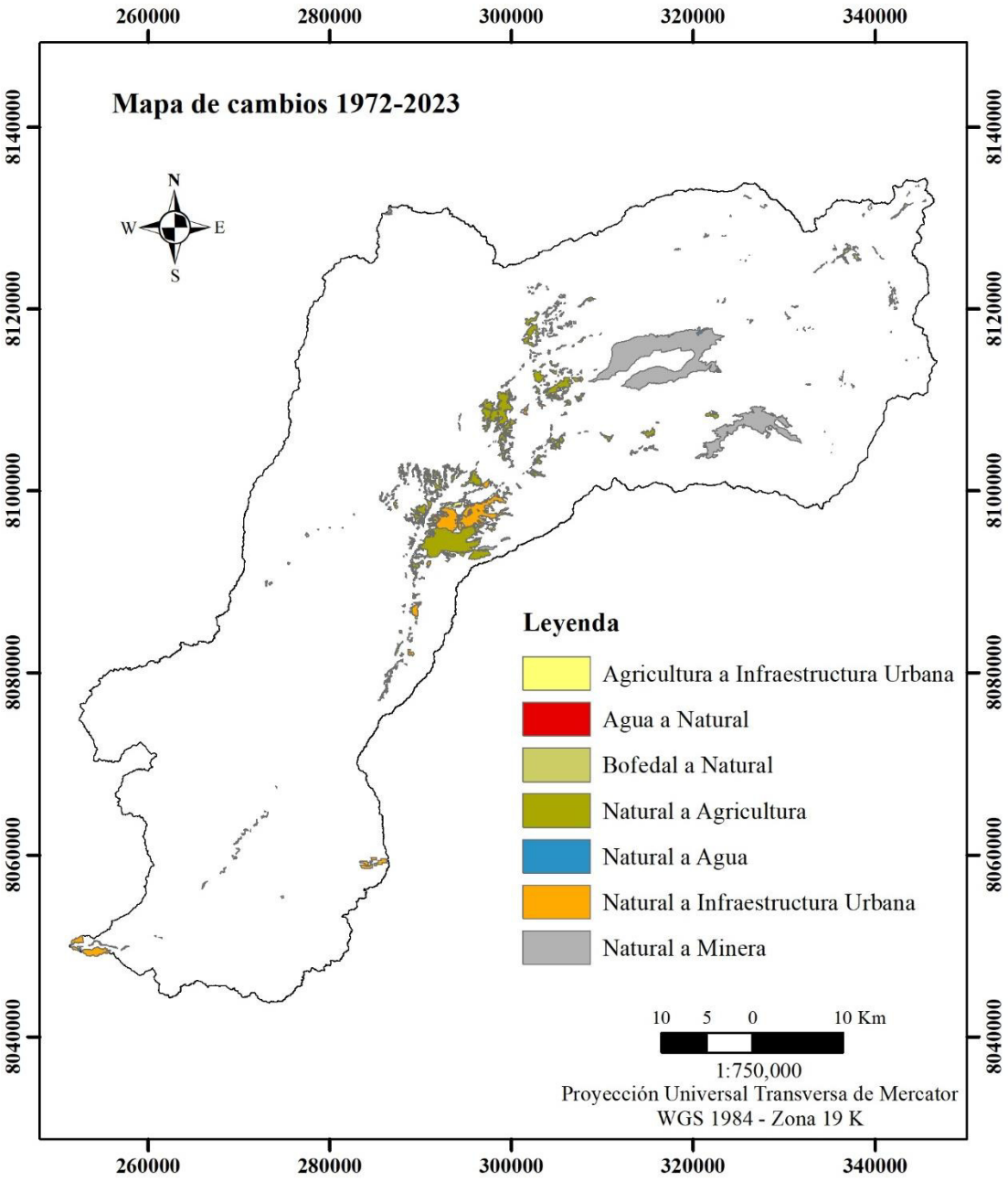
Tabla 41

Clases de cambios del uso y cobertura de la tierra de 1972 a 2023

Clase	**Nombre de la clase que cambio**	**Hectáreas**
1	Agua a Natural	16,93
2	Natural a Agua	33,71
3	Agricultura a Infraestructura Urbana	201,25
4	Bofedal a Natural	253,87
5	Natural a Infraestructura Urbana	2107,69
6	Natural a Agricultura	5369,50
7	Natural a Minera	6226,46

Figura 42

Mapa de cambios del uso y cobertura de la tierra de 1972 a 2023



Podemos describir la localización de cada una de las 07 categorias que cambiaron de uso y cobertura de la tierra, en orden ascendente por ocupación de áreas:

1. De Agua a Natural: zonas que ocupan las áreas secas que antes fueron lagunas altoandinas permanentes.

2. De Natural a Agua: zonas que corresponden a las construcciones de la represa Cuajone y reservorio Viña Blanca.
3. De Agricultura a Infraestructura Urbana: zonas que corresponden a las áreas agrícolas que estaban cerca del área urbana.
4. De Bofedal a Natural: zonas que corresponden a áreas secas de bofedales.
5. De Natural a Infraestructura Urbana: zonas que corresponden a las áreas de infraestructuras construidas en zonas naturales.
6. De Natural a Agricultura: zonas que corresponden a las áreas agrícolas que estaban ocupadas por área natural.
7. De Natural a Minera: zonas que corresponden a las áreas Mineras sobre las zonas naturales.

A partir de la matriz de tabulación cruzada (Tabla 40), se sintetiza los datos en la Tabla 42 permitiendo una interpretación más clara de los cambios ocurridos:

- Permanencia: Áreas que se mantuvieron sin cambios en su categoría original.
- Aumento: Expansión de una categoría de cobertura respecto a 1972.
- Pérdida: Reducción de la superficie de una categoría respecto a 1972.

Tabla 42

Síntesis de los cambios del uso y cobertura de la tierra de 1972 a 2023

N°	Clase	Permanencia (ha)	Aumento (ha)	Perdida (ha)	Cambio (ha)
1	Infraestructura Urbana	232,19	2308,94	0,00	2308,94
2	Minera	1968,90	6226,46	0,00	6226,46
3	Agricultura	4918,62	5369,50	201,25	5168,25
4	Bofedal	1384,68	0,00	253,87	-253,87
5	Agua	565,52	33,71	16,93	16,78
6	Natural	330251,09	270,80	13737,36	-13466,56

Los datos de la Tabla 42 muestran una evolución notable en las actividades antrópicas a lo largo de los 51 años analizados. El crecimiento de la minería ha sido el más destacado, con 6226,46 hectáreas, seguido por la expansión de la agricultura (5369,50 hectáreas) y la infraestructura urbana (2308,94 hectáreas). En menor medida, se ha registrado un ligero incremento en la cobertura natural (270,80 hectáreas) y en los cuerpos de agua (33,71 hectáreas).

En contraste, la reducción más pronunciada corresponde a la cobertura natural, con una disminución de 13737,36 hectáreas, lo que evidencia su progresiva conversión en suelos destinados a otras actividades económicas. Otras pérdidas significativas incluyen bofedales (253,87 ha), agricultura (201,25 ha) y cuerpos de agua (16,93 ha), estos últimos afectados por la variabilidad climática y la intervención antrópica.

En términos de permanencia, la cobertura natural sigue siendo la clase dominante con 330251,09 hectáreas, lo que sugiere que, a pesar de las transformaciones, la cuenca mantiene una proporción significativa de territorio sin intervención severa. La agricultura persiste en 4918,62 hectáreas, confirmando su rol central en la dinámica territorial del valle. La minería, con 1968,90 hectáreas de permanencia, refuerza el carácter extractivo de la región, mientras que la infraestructura urbana (232,19 hectáreas) refleja la expansión de los principales centros poblados de la cuenca.

La mayor tasa de incremento del cambio del uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua en el periodo de 1972 al 2023 se dio en la clase Minera con 122,09 hectáreas por año, seguida por la clase Agricultura con 101,34 ha/año e infraestructura urbana con 45,27 ha/año y en menor área la clase de agua con 0,33 ha/año; por otro lado, la tasa de decremento se dio en la clase de Natural con 264,05 ha/año y la clase Bofedal con 4,98 ha/año, los datos se presentan en la Tabla 43.

Tabla 43

Tasa de cambio anual de uso y cobertura de la tierra de 1972 a 2023

Clase	UCT 1972	UCT 2023	CUCT (1972 – 2023)			
	Área (ha)	Área (ha)	Cambio de clase (ha)	Índice de Dinámica Temporal (%)	Tasa de cambio anual (ha/año)	Tasa de cambio anual (%/año)
Agricultura	5119,87	10288,12	5168,25	1,98	101,34	1,38
Agua	582,45	599,23	16,78	0,06	0,33	0,06
Bofedal	1638,55	1384,68	-253,87	-0,34	-4,98	-0,33
Infraestructura Urbana	232,19	2541,13	2308,94	21,62	45,27	4,80
Minera	1968,90	8195,36	6226,46	6,87	122,09	2,84
Natural	343988,45	330521,89	-13466,56	-0,09	-264,05	-0,08
Total	353530,41	353530,41				

De acuerdo con el reporte global de Cambio y No Cambio (Tabla 44), en el periodo de 1972 al 2023, el 4,02% (14209,41 ha) del territorio experimentó transformaciones significativas, mientras que el 95,98% (339321 hectáreas) permaneció sin cambios.

Tabla 44

Reporte global de cambio y no cambio del uso y cobertura de la tierra de 1972 a 2023

Totales de uso y cobertura de la tierra	Área (ha)	Porcentaje (%)
Cambio	14209,41	4,02
No Cambio	339321,00	95,98
Total	353530,41	100,00

5.3. Modelo de cambio de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua

Para crear el modelo espacial de cambio y predicción de uso y cobertura de la tierra al 2023, a partir de los cambios de uso y cobertura de la tierra en el periodo 1972 al 2012, se necesita de la combinación y uso de técnicas cartográficas, sistemas de información geográfica y modelos estadísticos multivariantes, con la finalidad de obtener como resultado varias variables independientes en este tipo de modelos como topografía, infraestructura vial, calidad de suelos, distancia a carreteras, entre otros, que deben convertidos a la extensión "rst" para ser cargados a la herramienta de proyección de cambio Land Change Modeler del Software TerrSet. Para los cuales se presentan los resultados obtenidos de acuerdo a cada proceso para obtener el modelo:

1. Los parámetros esenciales son los mapas de uso y cobertura de la tierra de 1972 y 2012 que se presentan en la Figura 43 y Figura 44, además se utiliza los mapas de carreteras considerando que se tenga la red vial dentro de la cuenca, así mismo el mapa del modelo de elevación digital SRTM que se muestran en la Figura 43 y Figura 44 respectivamente, para ser consideradas como variables dinámicas en la creación del modelo.

Figura 43

Mapa de carreteras en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua

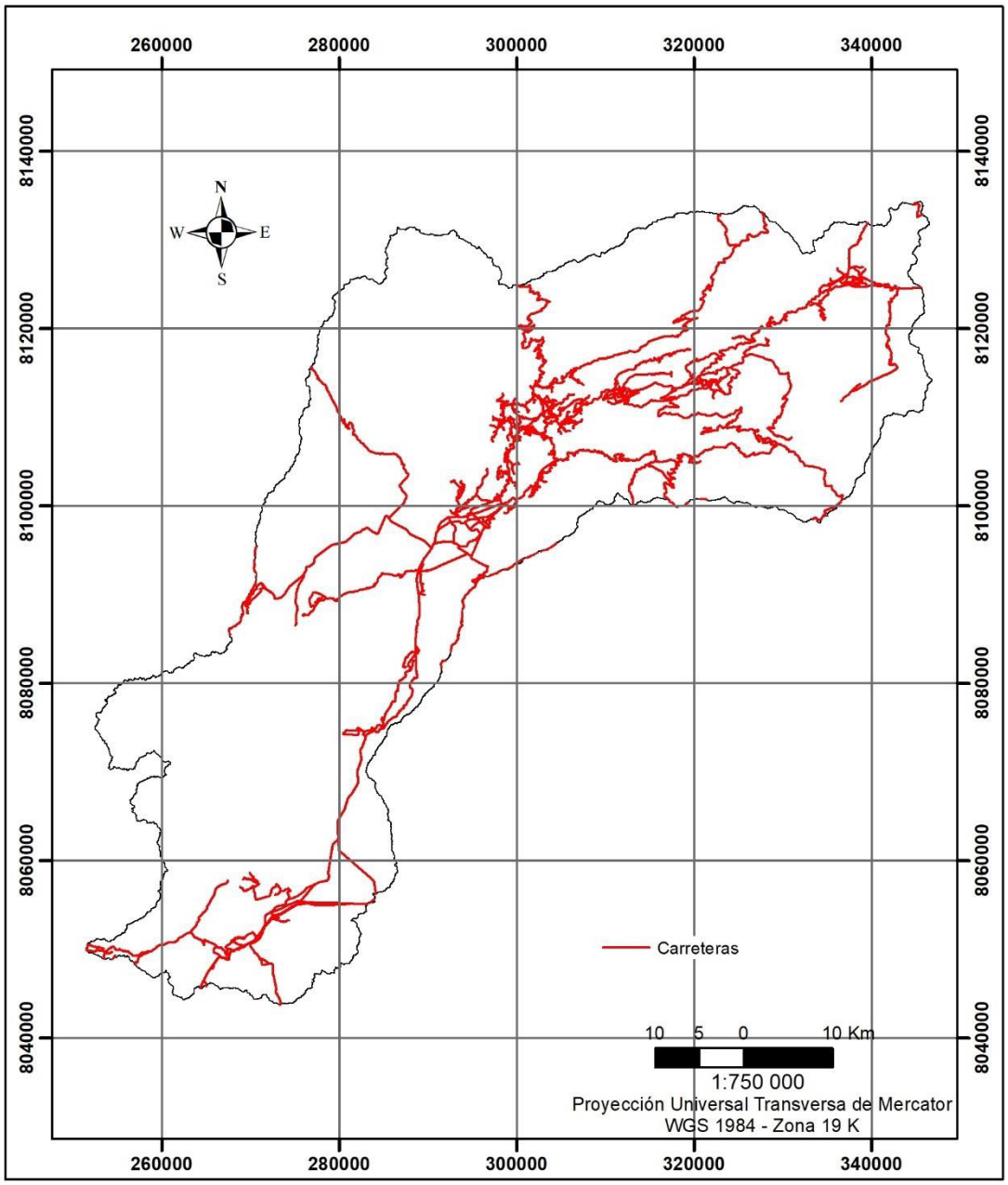
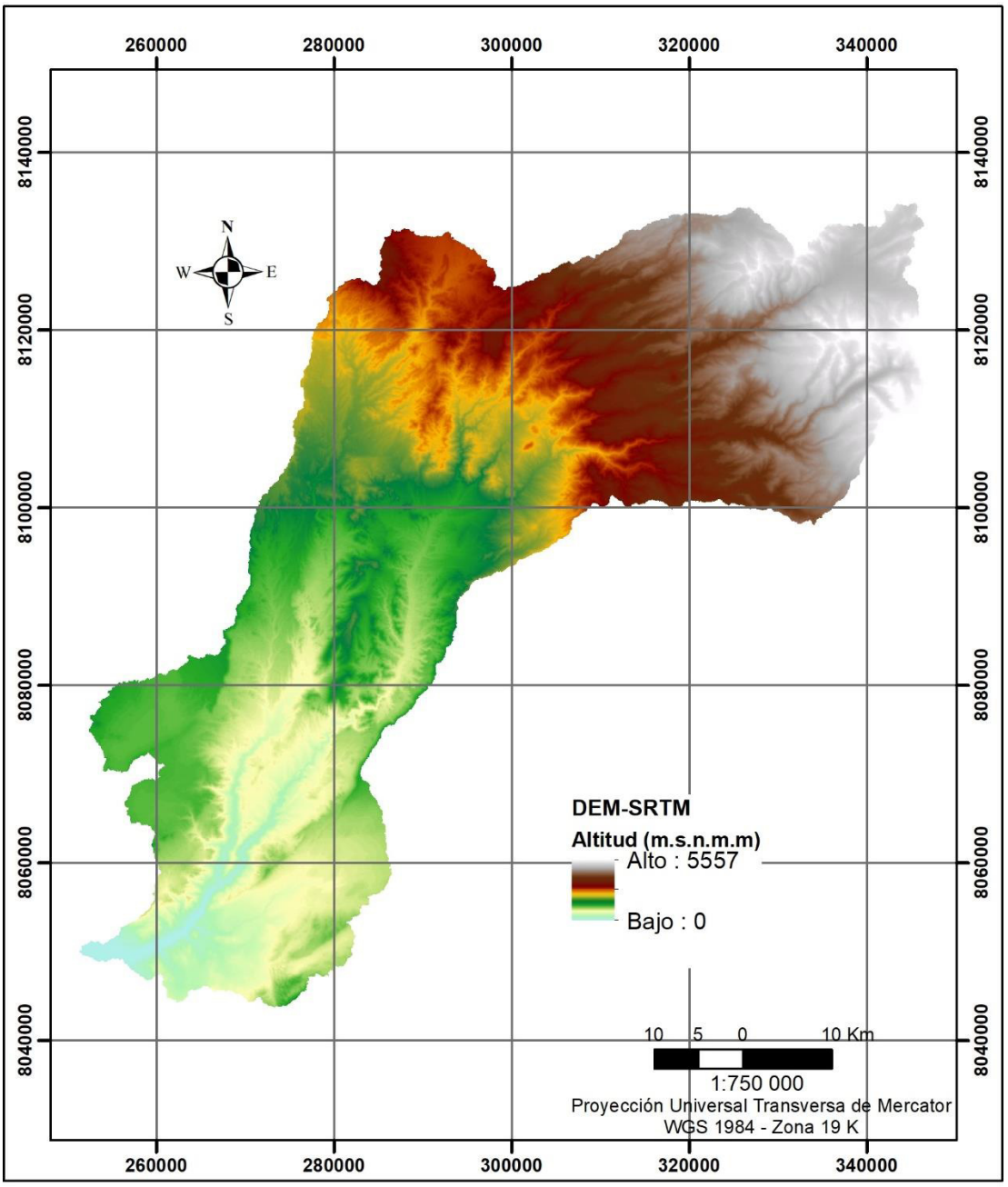


Figura 44

Modelo de elevación digital (DEM) de Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

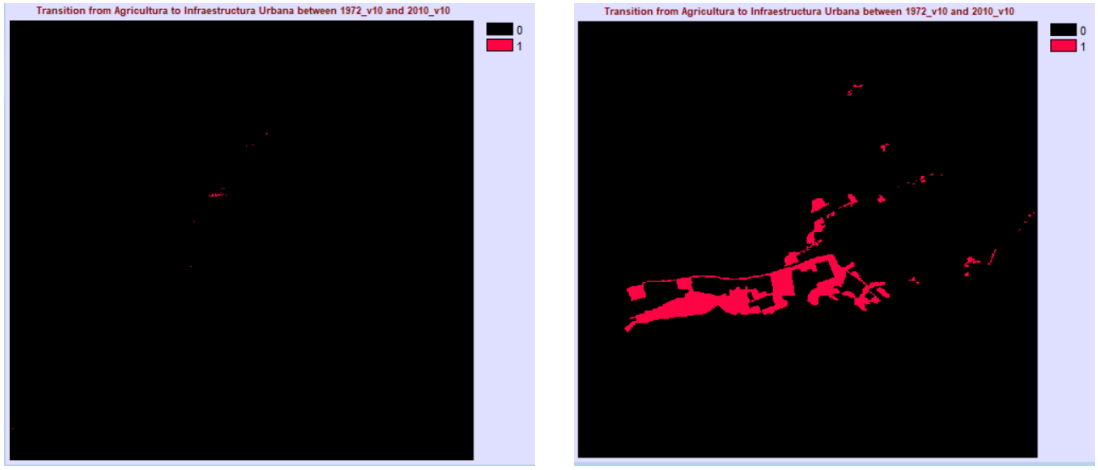


2. En la creación del modelo se debe identificar las transiciones de cambio entre las diferentes clases o categorías de uso y cobertura de la tierra de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua del periodo de 1972 al 2012, en la que se crean 07 Sub-Modelos potenciales de transición, los mismos que se representan en mapas desde la Figura 45 a la Figura 51 y son los siguientes:

a) Mapa de transición de la clase Agricultura a la clase Infraestructura Urbana.

Figura 45

Mapa de transición de la clase Agricultura a la clase Infraestructura Urbana



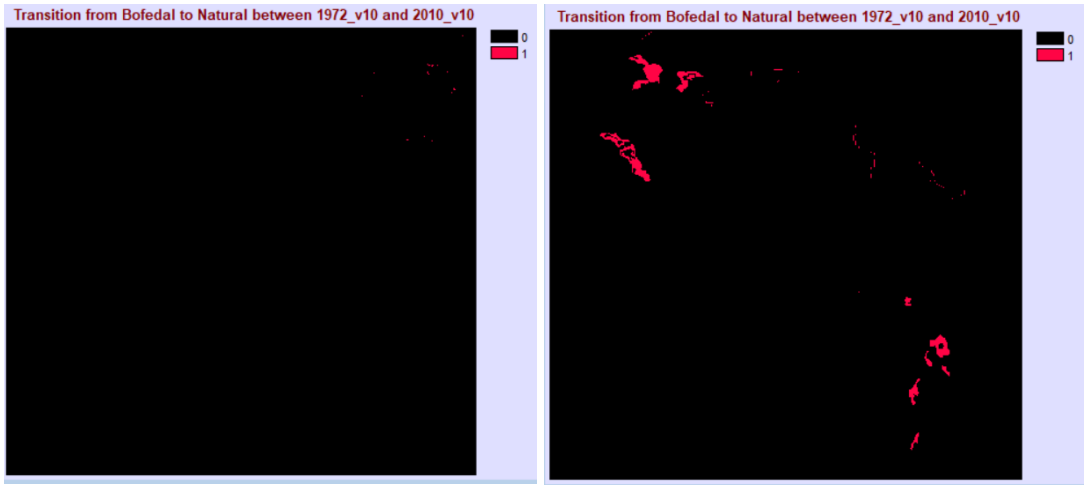
(a) (b)

Nota. a) Mapa de transición de la clase Agricultura a la clase Infraestructura Urbana del periodo 1972-2012. b) Acercamiento de la zona urbana de Moquegua para observar la transición de la clase Agricultura a la clase Infraestructura Urbana del periodo 1972-2012.

b) Mapa de transición de la clase Bofedal a la clase Natural.

Figura 46

Mapa de transición de la clase Bofedal a la clase Natural



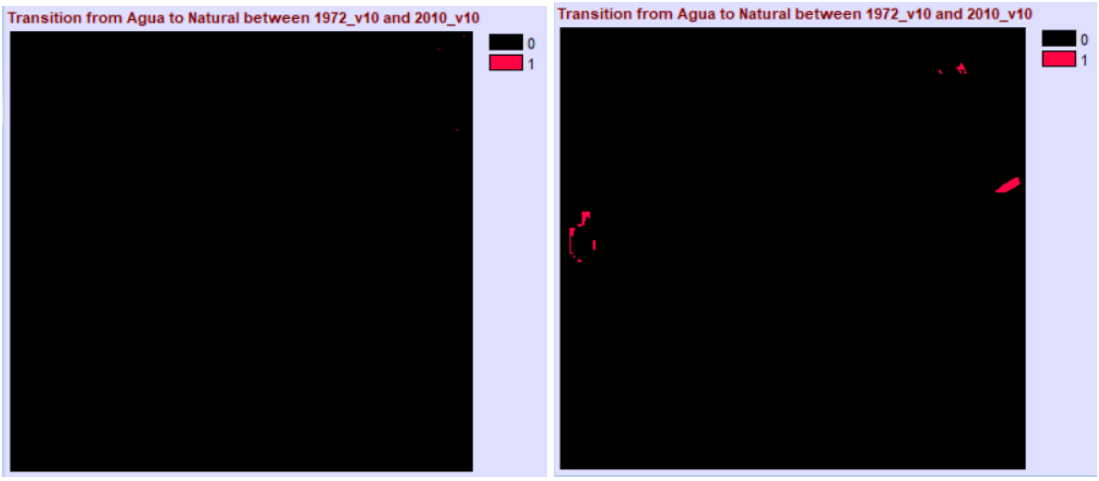
(a) (b)

Nota. a) Mapa de transición de la clase Bofedal a la clase Natural del periodo 1972-2012. b) Acercamiento a la zona Pampa Titijones y Laguna Limani para observar la transición de la clase Bofedal a la clase Natural del periodo 1972-2012.

c) Mapa de transición de la clase Agua a la clase Natural.

Figura 47

Mapa de transición de la clase Agua a la clase Natural



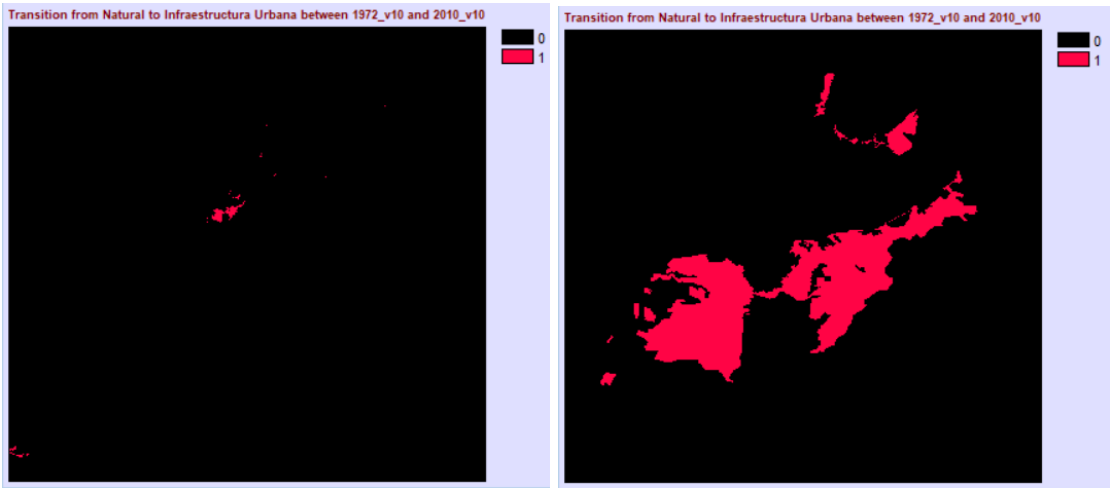
(a) (b)

Nota. a) Mapa de transición de la clase Agua a la clase Natural del periodo 1972-2012. b) Acercamiento a la zona de la Laguna Parincota y Cerro Arechua para observar la transición de la clase Agua a la clase Natural del periodo 1972-2012.

d) Mapa de transición de la clase Natural a la clase Infraestructura Urbana.

Figura 48

Mapa de transición de la clase Natural a la clase Infraestructura Urbana



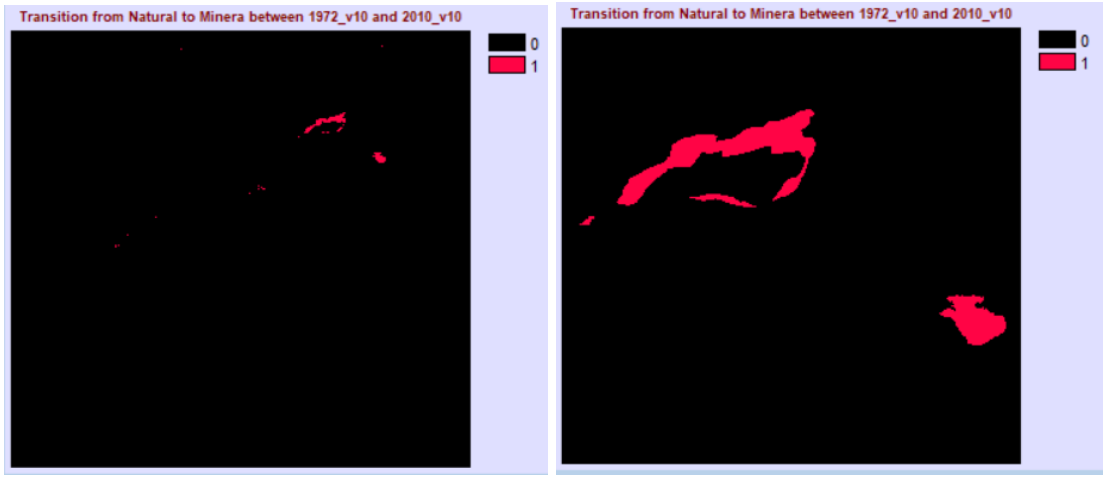
(a) (b)

Nota. a) Mapa de transición de la clase Natural a la clase Infraestructura Urbana del periodo 1972-2012. b) Acercamiento a la zona Urbana de Moquegua, Samegua y Los Ángeles para observar la transición de la clase Natural a la clase Infraestructura Urbana del periodo 1972-2012.

e) Mapa de transición de la clase Natural a la clase Minera.

Figura 49

Mapa de transición de la clase Natural a la clase Minera



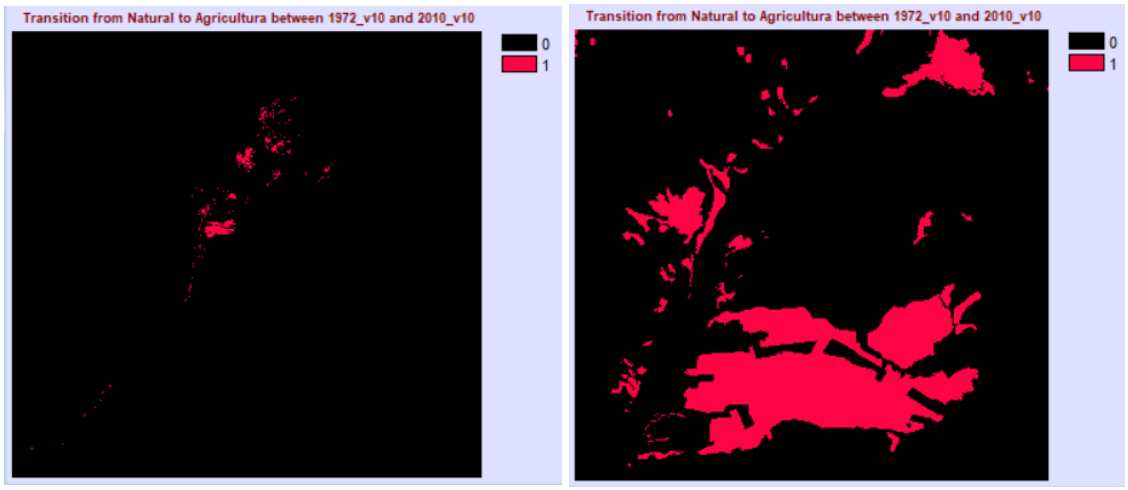
(a) (b)

Nota. a) Mapa de transición de la clase Natural a la clase Minera del periodo 1972-2012. b) Acercamiento a las zonas mineras de Cuajone y para observar la transición de la clase Natural a la clase Minera del periodo 1972-2012.

f) Mapa de transición de la clase Natural a la clase Agricultura

Figura 50

Mapa de transición de la clase Natural a la clase Agricultura



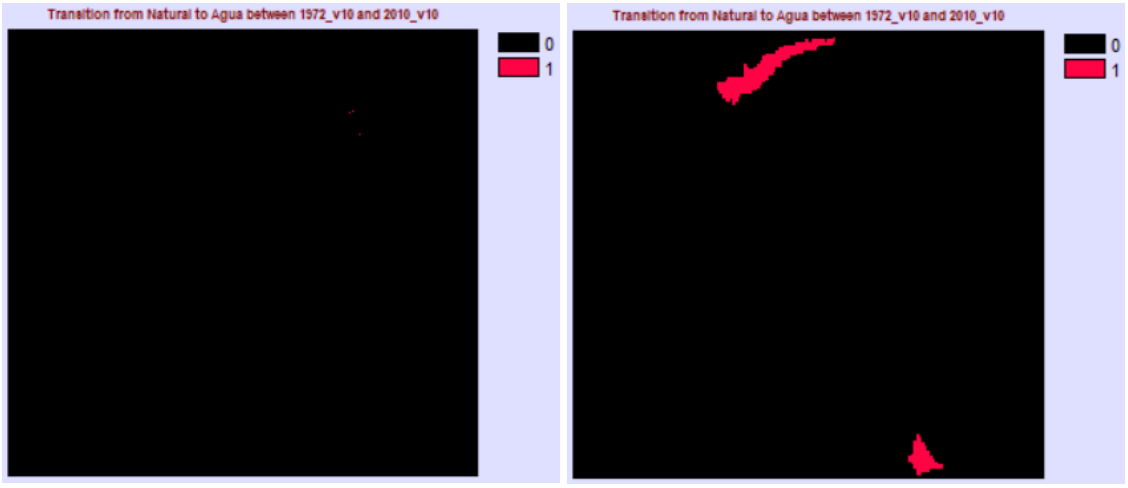
(a) (b)

Nota. a) Mapa de transición de la clase Natural a la clase Agricultura del periodo 1972-2012. b) Acercamiento a las zonas San Antonio y Estuquiña para observar la transición de la clase Natural a la clase Agricultura del periodo 1972-2012.

g) Mapa de transición de la clase Natural a la clase Agua.

Figura 51

Mapa de transición de la clase Natural a la clase Agua



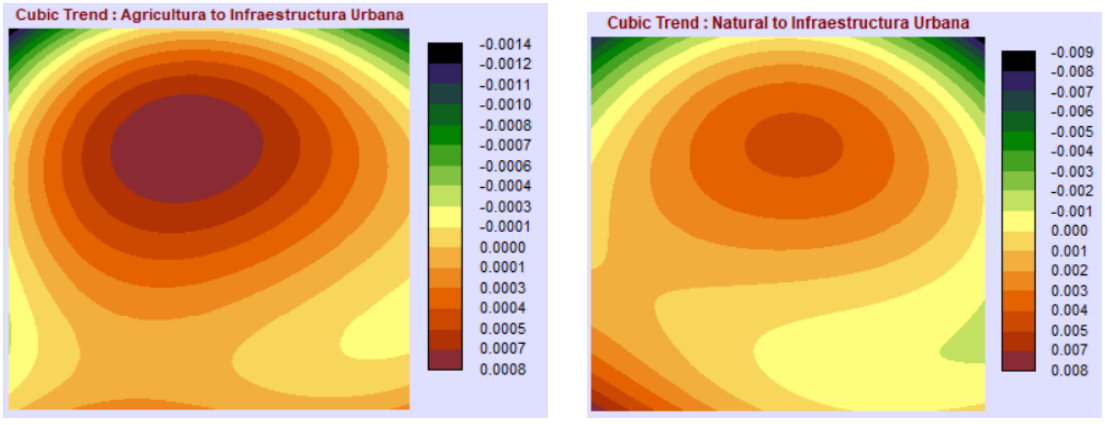
(a) (b)

Nota. a) Mapa de transición de la clase Natural a la clase Agua del periodo 1972-2012. b) Acercamiento a las zonas Cuajone (Dique Chilca) y Reservorio Viña Blanca para observar la transición de la clase Natural a la clase Agua del periodo 1972-2012.

3. En la creación del modelo se consideraron mapas de tendencia espacial de tercer orden polinomial, que influyen notablemente, como por ejemplo el cambio de la clase Agricultura para la clase Infraestructura Urbana y de la clase Natural a Infraestructura Urbana, que se observa en la Figura 52.

Figura 52

Mapas de tendencia espacial de tercer orden polinomial de cambio



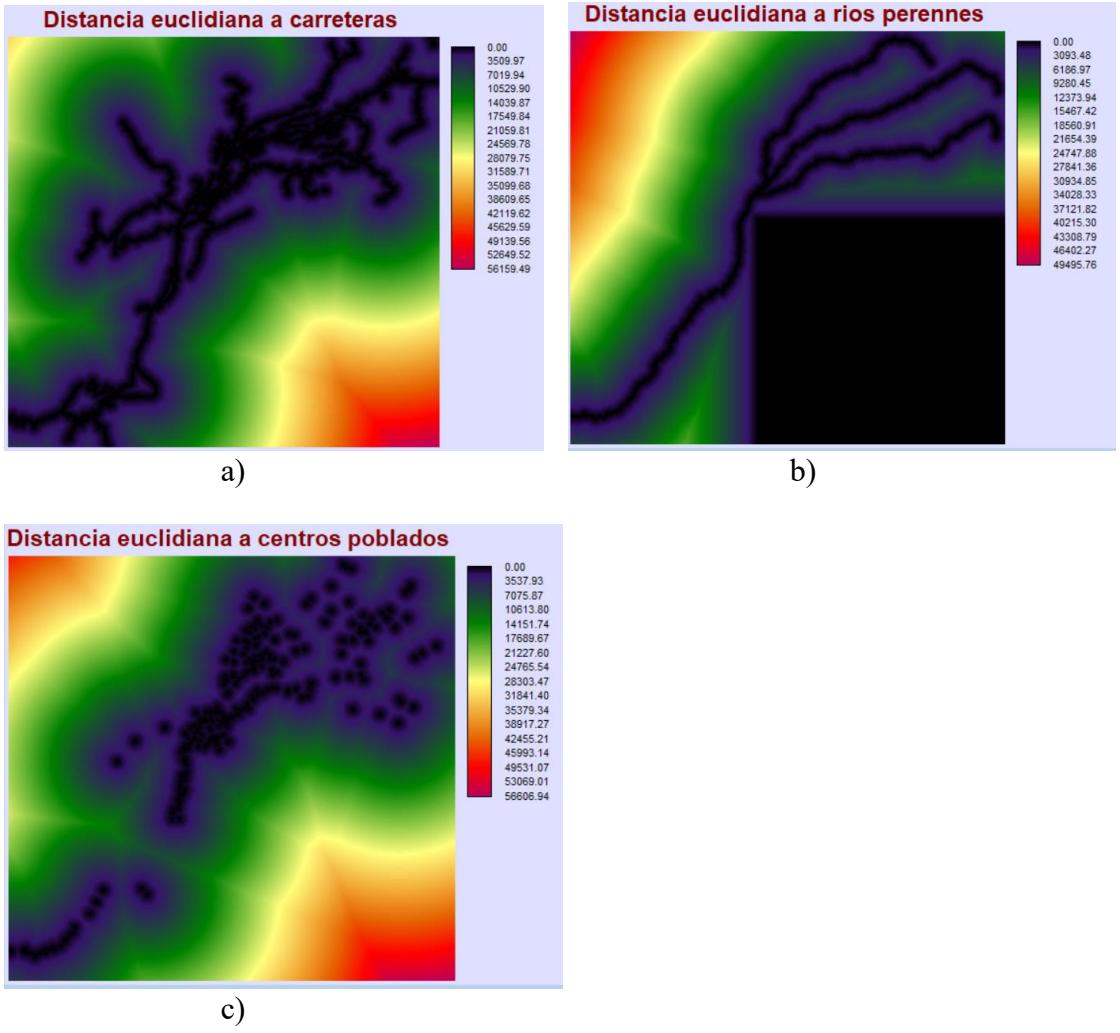
a) b)

Nota. Mapas de tendencia espacial de tercer orden polinomial de cambio: a) Agricultura para Infraestructura Urbana. b) Natural a Infraestructura Urbana.

4. En la creación del modelo, se crearon mapas de distancia euclidiana a carreteras, a ríos perennes, centros poblados, que se observa en la Figura 53.

Figura 53

Mapas de distancia euclidiana



Nota. Mapas de distancia euclidiana de: a) Carreteras b) Ríos perennes c) Centros Poblados.

5. En la creación del modelo se consideraron como variables de transformación los mapas siguientes: mapa de pendientes en porcentajes (Figura 54), mapa de geología (Figura 55), mapa de capacidad de uso mayor de las tierras (Figura 56), mapa de suelos (Figura 57).

Figura 54

Mapa de pendientes en porcentaje

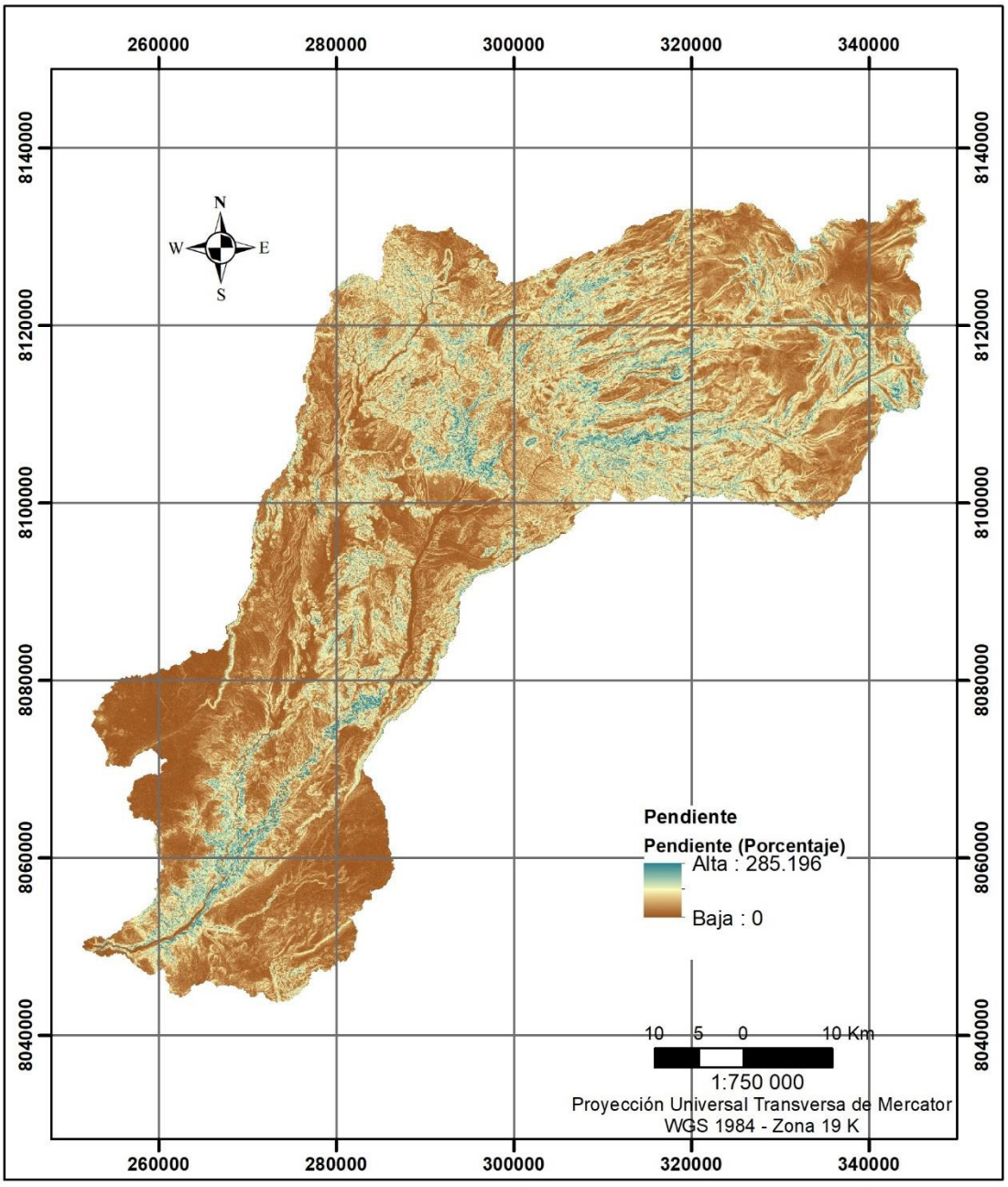


Figura 55

Mapa de geología

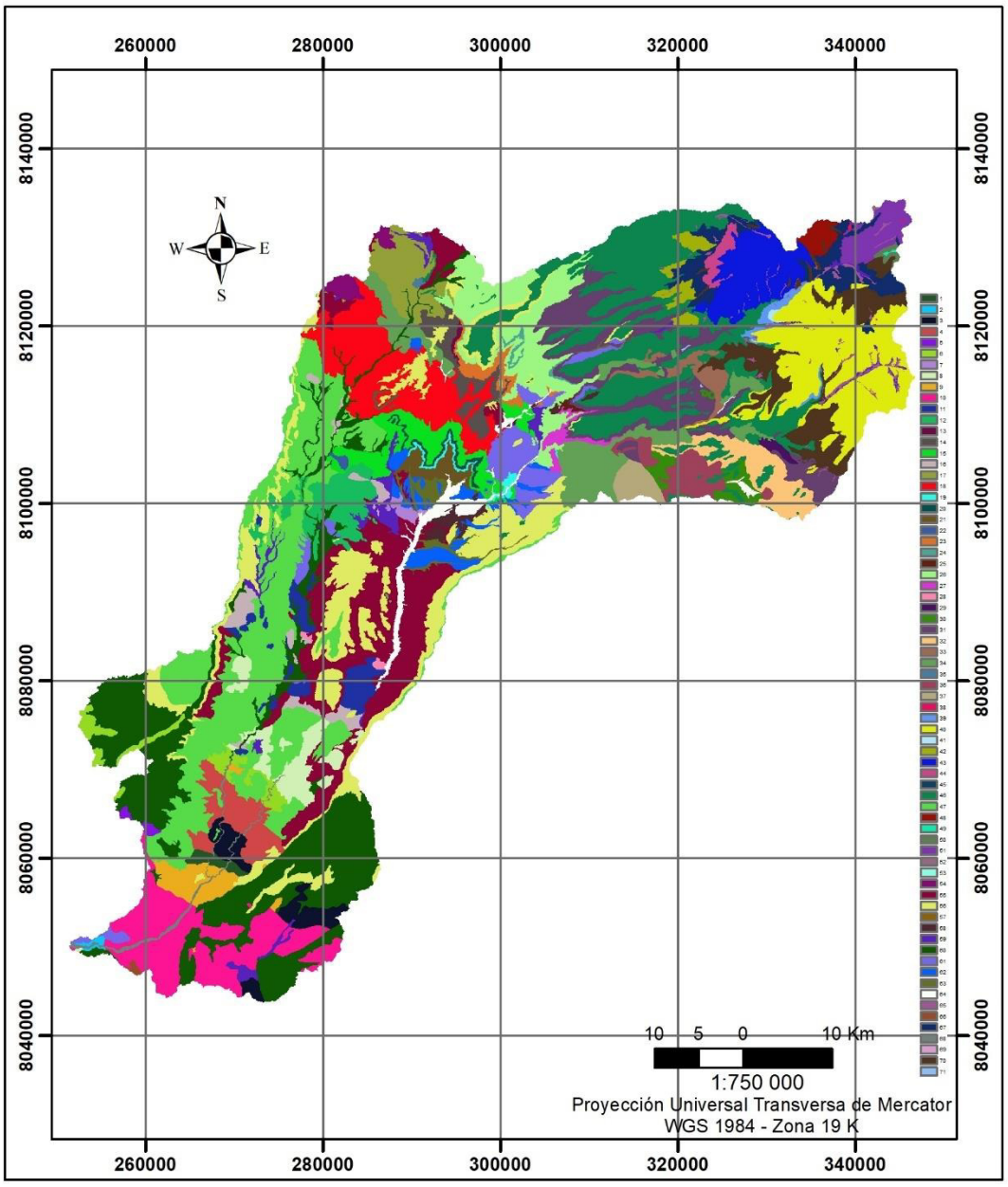


Figura 56

Mapa de capacidad de uso mayor de las tierras

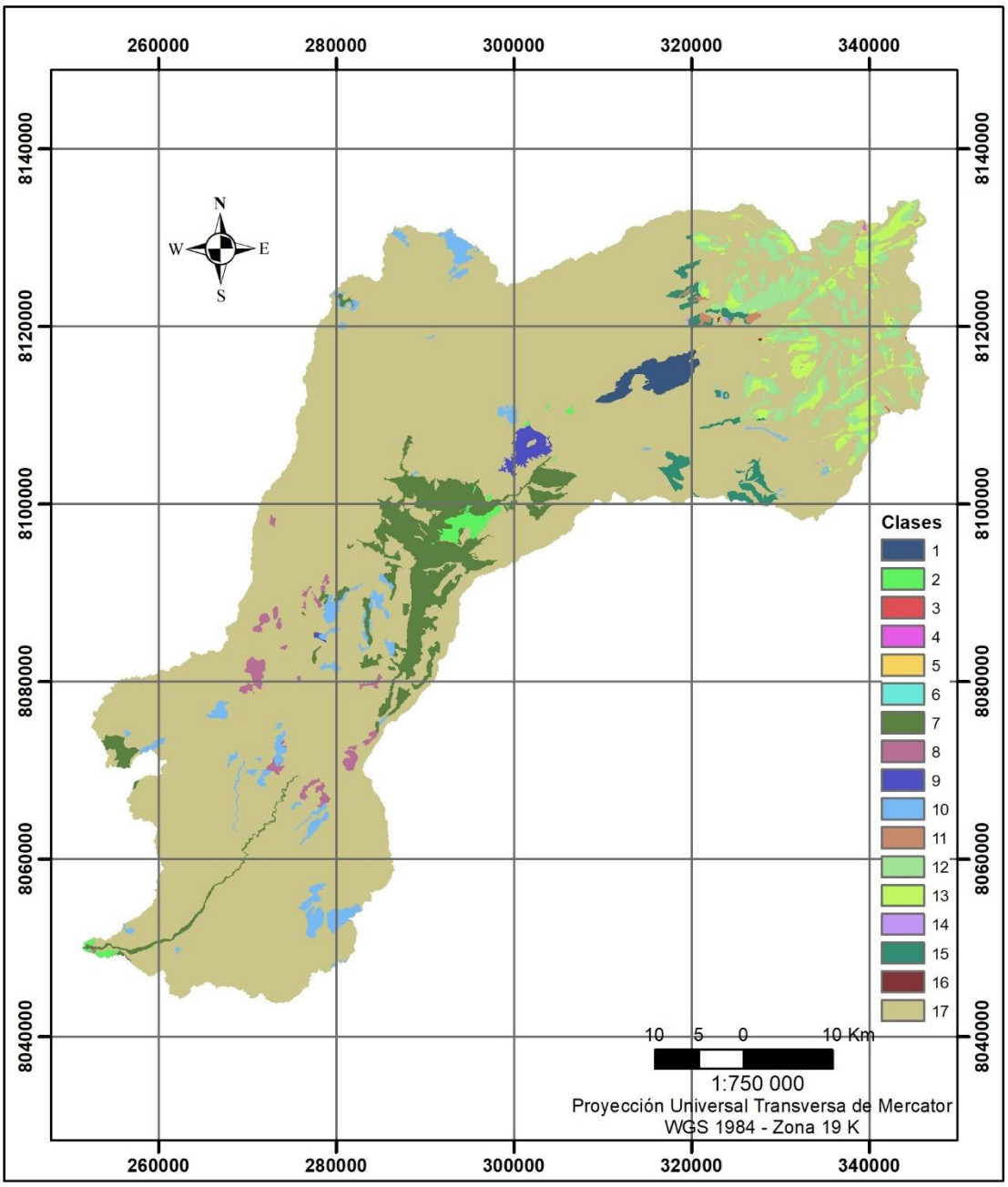
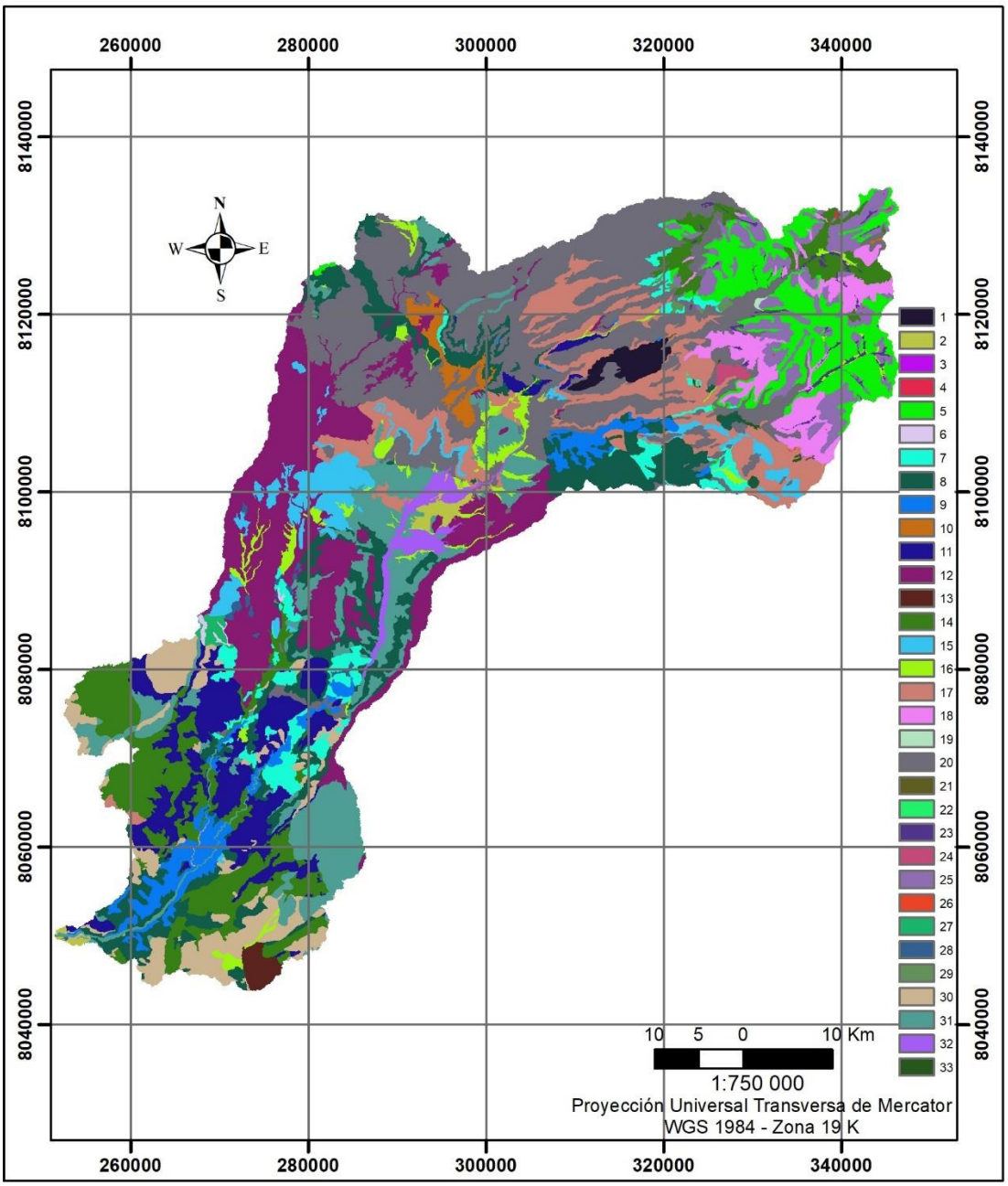


Figura 57

Mapa de suelos

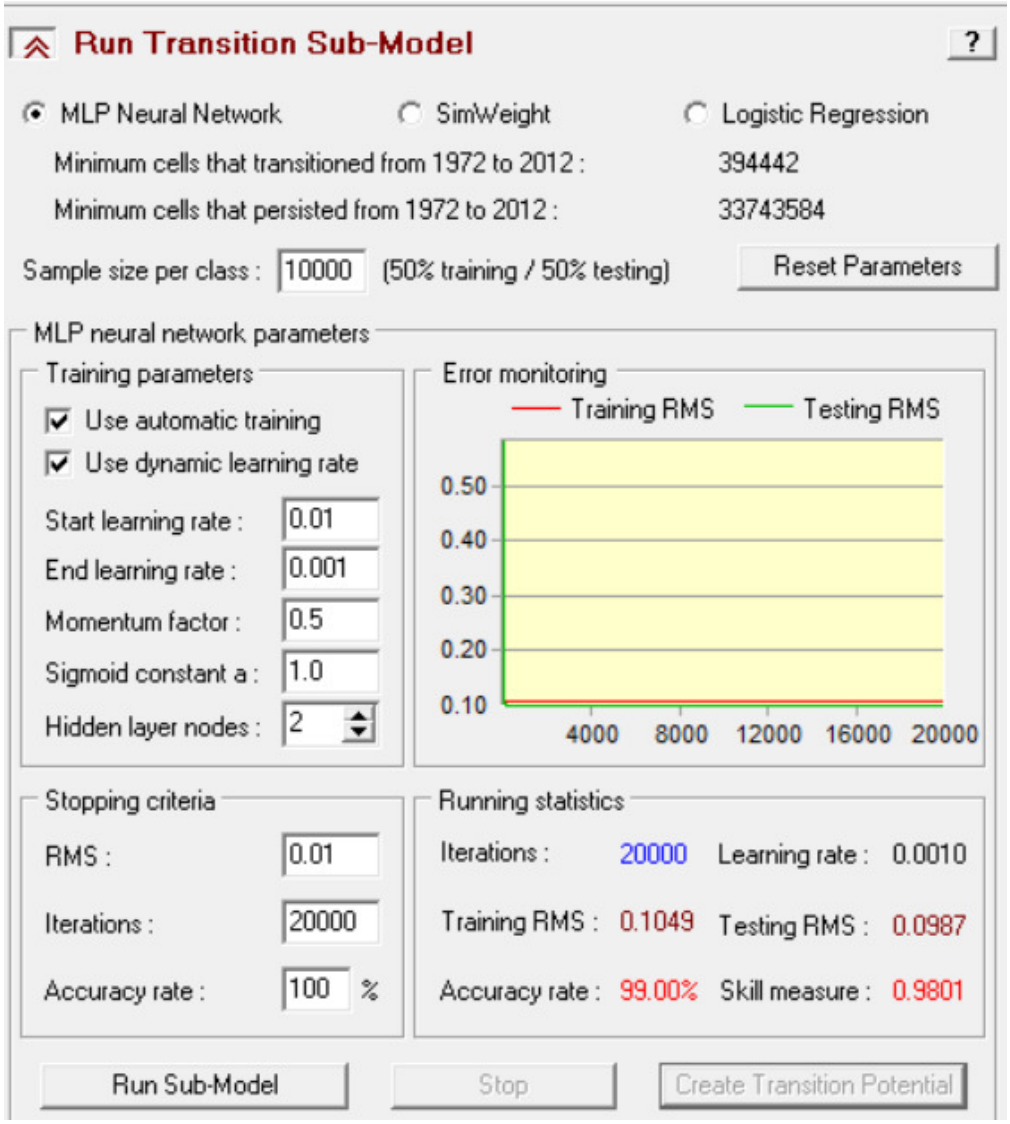


6. En la creación del modelo de cambio de uso y cobertura de la tierra de la cuenca Ilo-Moquegua, se tuvo 7 Sub-Modelos, mejorando en cada corrida para cada Sub Modelo, con la finalidad de obtener tasas de precisión mayores al 75 % como lo indica Eastman (2016), logrando alcanzar una tasa de precisión del 99 % en el Sub-Modelo Natural a Infraestructura Urbana como se muestra en la Figura 58 y su correspondiente

interpretación, dicho resultado también se observa en la Tabla 45, donde están las tasas de precisión y los Skill Measure para cada Sub Modelo.

Figura 58

Transición Potencial del Sub-Modelo Natural a Infraestructura Urbana



Nota. Transición Potencial del Sub-Modelo Natural a Infraestructura Urbana de 1972 al 2012, para proyectar el periodo 2023 en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua.

Para una interpretación detallada de los parámetros y resultados de la corrida de transición del Sub-Modelo mostrada en la Figura 58, se tiene:

a) Configuración de los parámetros del modelo

1. Algoritmo seleccionado:

En este caso, se ha utilizado una red neuronal MLP Neural Network, en lugar de SimWeight o Regresión Logística.

2. Tamaño de la muestra:

El tamaño de muestra por clase es de 10,000 celdas, con una división del 50 % para entrenamiento y el 50 % para prueba (testing).

3. Parámetros de entrenamiento de la red neuronal:

- *Learning rate dinámico:* El modelo ajusta automáticamente la tasa de aprendizaje durante el proceso de entrenamiento.
- *Learning rate inicial y final:* Se inicia con un valor de 0,01 y se reduce progresivamente hasta 0,001.
- *Factor de momento:* Es 0,5, lo que ayuda a estabilizar y acelerar la convergencia del modelo.
- *Constante sigmoide:* Es 1,0, utilizada en la función de activación para determinar la no linealidad del modelo.
- *Nodos de la capa oculta:* Hay 2 capas ocultas, lo que indica una configuración básica del modelo.

4. Criterios de detención (Stopping Criteria):

El modelo detiene el entrenamiento si el error RMS alcanza 0.01 o si se completan 20,000 iteraciones.

b) Monitoreo del error

En el gráfico del error RMS (Root Mean Square):

Se observa una disminución constante tanto en el error de entrenamiento como en el error de prueba, indicando que el modelo está aprendiendo de manera efectiva y no presenta problemas evidentes de sobreajuste.

c) Estadísticas finales

1. Iteraciones completadas:

- El modelo ejecutó 20,000 iteraciones, alcanzando la tasa de aprendizaje final de 0.001.

2. Errores RMS:

- Error RMS de entrenamiento: 0,1049.
- Error RMS de prueba: 0,0987.
- La cercanía entre estos valores, muestra un buen desempeño y generalización del modelo.

3. Tasa de exactitud:

- El modelo alcanzó una exactitud del 99,0 %, lo que refleja una alta capacidad para predecir correctamente los cambios.

4. Skill Measure:

- La medida de habilidad del modelo es 0,9801, lo que indica un excelente desempeño en la predicción de cambios.

d) Implicaciones

Celdas procesadas:

- Mínimo de celdas que cambiaron de uso (1972-2012): 394,442 celdas.
- Mínimo de celdas que permanecieron iguales: 3374,584 celdas.

El modelo MLP configurado en este caso demuestra un entrenamiento exitoso con valores de exactitud muy altos y errores bajos. Esto sugiere que el modelo es adecuado para capturar las transiciones de uso y cobertura de la tierra entre 1972 y 2012. Es importante evaluar los mapas de transición generados para validar visualmente si las predicciones son coherentes con la realidad espacial de los datos de entrada.

En los resultados de las corridas de transición de los Sub-Modelo que pertenece a la interfaz del modelo de transición en el Land Change Modeler de TerrSet (Idrisi), específicamente al sub modelo de transición basado en redes neuronales de tipo MLP (Multi-Layer Perceptron), nos brinda el *Skill Measure* que es el desglose de la habilidad del modelo por transición y persistencia en los cambios del uso y cobertura de la tierra en

la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua. En la Tabla 46 se presentan las transiciones y persistencias.

Tabla 45

Desglose de la habilidad del modelo de 1972 a 2012.

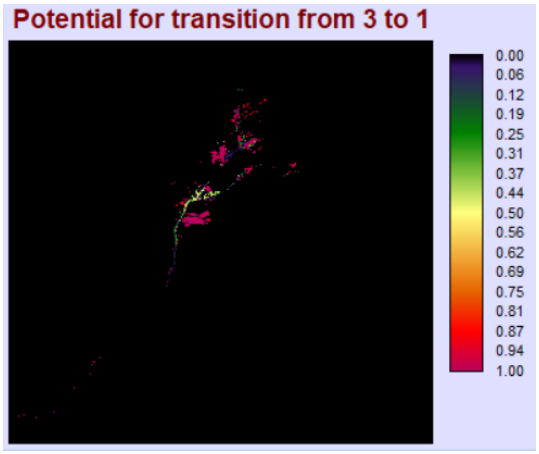
Sub-Modelo	Tasa de precisión %	Transición y persistencia	Skill Measure
Agricultura a Infraestructura Urbana	91,32	Transición: Agricultura a Infraestructura Urbana	0,7287
		Persistencia: Agricultura	0,9240
Bofedal a Natural	90,20	Transición: Bofedal a Natural	0,8726
		Persistencia: Bofedal	0,7551
Agua a Natural	98,35	Transición: Agua a Natural	1,0000
		Persistencia: Agua	0,9343
Natural a Infraestructura Urbana	99,00	Transición: Natural a Infraestructura Urbana	0,9834
		Persistencia: Natural	0,9748
Natural a Minera	95,79	Transición: Natural a Minera	0,8650
		Persistencia: Natural	0,9670
Natural a Agricultura	76,31	Transición: Natural a Agricultura	-1,0000
		Persistencia: Natural	1,0000
Natural a Agua	98,15	Transición: Natural a Agua	0,9383
		Persistencia: Natural	0,9871

Nota. Desglose de la habilidad del modelo por transición y persistencia en los cambios del uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua muestran valores mayores a 0.7551.

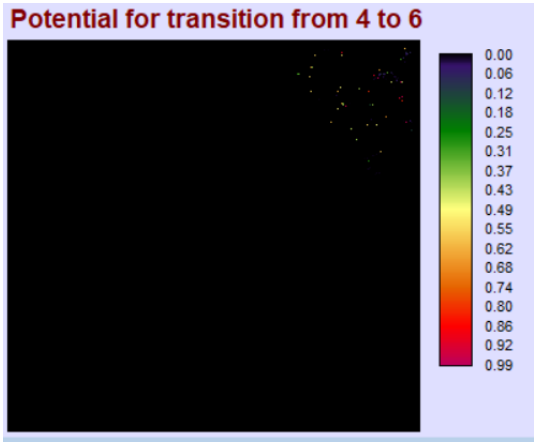
El resultado de la corrida de los Sub-Modelos, se plasma en la creación de los mapas potenciales de transición para los 7 Sub-Modelos, como se observa en la Figura 59.

Figura 59

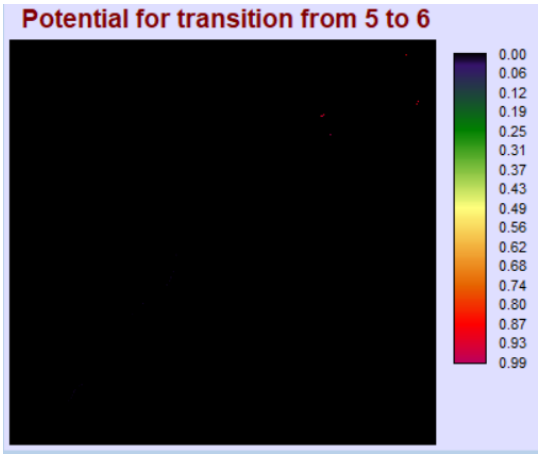
Mapas de potenciales de transición para los Sub-Modelo



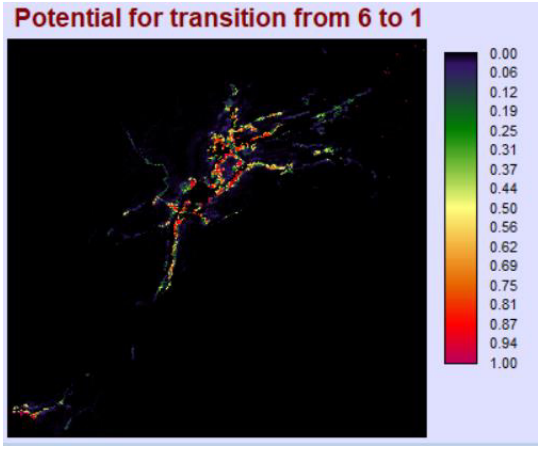
a)



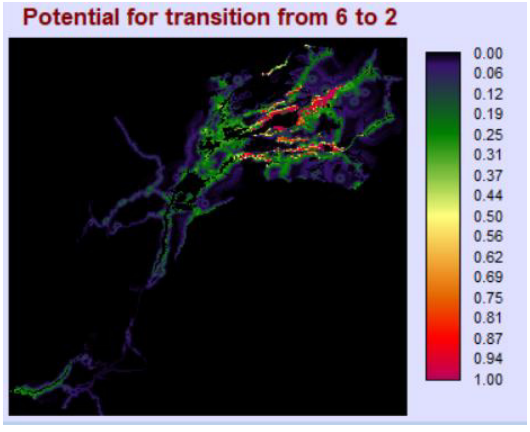
b)



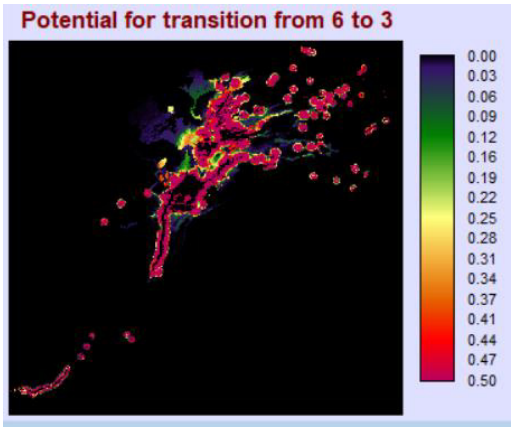
c)



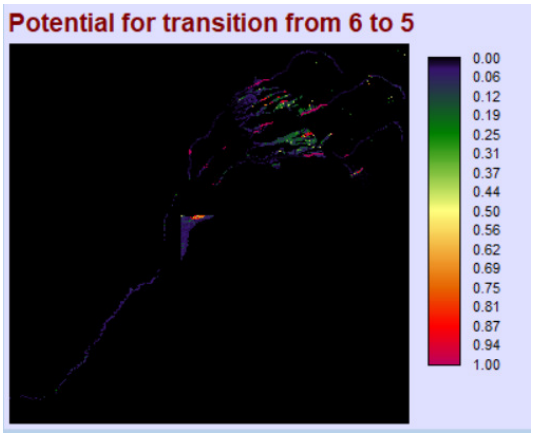
d)



e)



f)



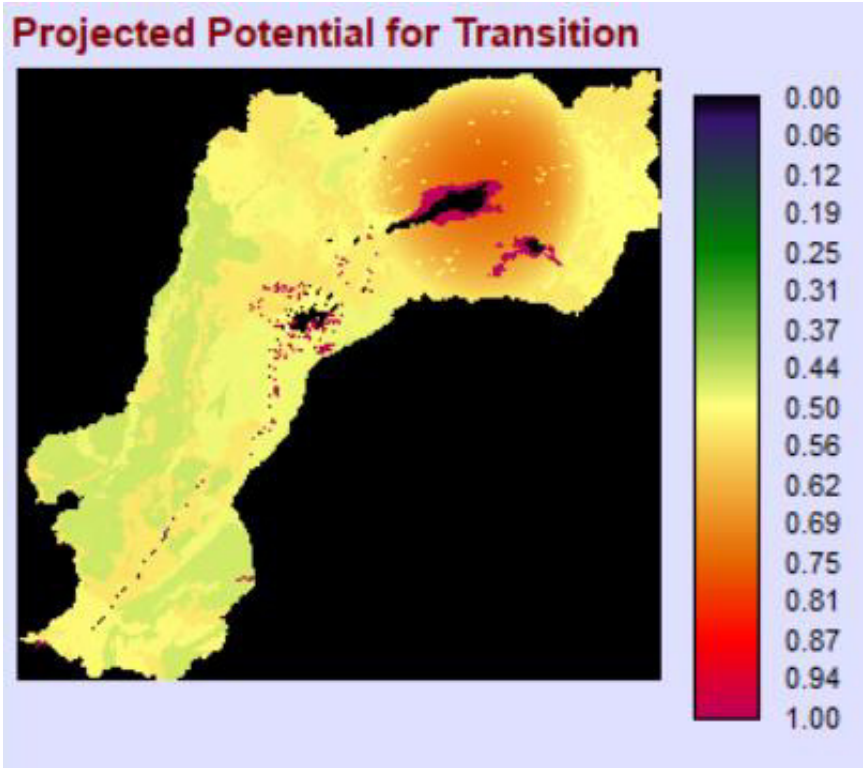
g)

Nota. La figura 59 muestra los mapas de potenciales de transición para los Sub-Modelo que se identifican son: a) Agricultura a Infraestructura Urbana, b) Bofedal a Natural, c) Agua a Natural, d) Natural a Infraestructura Urbana, e) Natural a Minera, f) Natural a Agricultura, g) Natural a Agua.

7. Para generar el mapa proyectado al 2023, se necesita del mapa de probabilidad que indica qué tan propensa es cada celda en la imagen a experimentar un cambio hacia una clase específica en el futuro, sobre el uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, el mismo que se muestra en la Figura 60.

Figura 60

Mapa del modelo potencial proyectado para las transiciones al 2023



La interpretación del mapa de la Figura 60 es la siguiente:

(a) **Colores y Escala**:

- La escala de colores representa el **potencial de transición** de una clase inicial a una clase objetiva.
- Los colores **oscuros (rojo/negro)** indican zonas con **mayor probabilidad** de cambio, mientras que los colores **claros (verde/amarillo)** representan áreas con menor probabilidad de cambio.
- El rango de valores varía de 0 (sin probabilidad de transición) a 1 (máxima probabilidad de transición).

(b) Distribución Espacial:

- Las zonas en color **rojo oscuro y negro** se concentran principalmente en el centro y en la parte superior derecha del mapa. Estas áreas probablemente estén sujetas a una presión más intensa de cambio de uso del suelo debido a factores como urbanización, agricultura intensiva, o extracción de recursos.
- Las áreas en tonos **amarillo y verde** tienen un menor potencial de cambio, lo cual podría estar asociado a zonas protegidas, terrenos con baja accesibilidad o condiciones menos favorables para la transformación.

(c) Patrones de Cambio:

- La distribución espacial refleja cómo los factores explicativos (como accesibilidad, topografía, proximidad a infraestructura, etc.) y los cambios históricos influyen en la probabilidad de transformación de las áreas.
- Por ejemplo, los puntos con alta probabilidad de cambio podrían coincidir con zonas cercanas a carreteras, ríos, o áreas de expansión urbana.

(d) Aplicación del Modelo:

- Este mapa es crucial para **simular escenarios futuros** y desarrollar estrategias de manejo territorial. Permite identificar regiones críticas para la planificación de políticas públicas, conservación ambiental o mitigación de impactos.

(e) Posibles Clases de Cambio:

En este caso, podría tratarse de transiciones entre clases como bosque a agricultura, áreas naturales a urbanas, o áreas agrícolas a suelo degradado.

8. Se genera el modelo de predicción del cambio de uso y cobertura de la tierra para el 2023, el mismo que se observa en la Figura 61.

Figura 61

Mapa de predicción del cambio de uso y cobertura de la tierra al 2023



Observando el mapa de uso y cobertura de la tierra de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua predicho al año 2023 (Figura 61), podemos identificar que la cobertura "Natural" debería ocupar la mayor superficie en el ámbito de estudio y la cobertura "Agua" continuará siendo la menor superficie en el ámbito de estudio, confirmándose con el reporte de datos numéricos de la Tabla 46, donde identificamos que la cobertura "Natural" tiene 330521,89 hectáreas y la cobertura "Agua" tiene 599,23 hectáreas, que representan el 93,49 % y 0,17 % respectivamente, los que se representan estadísticamente en el gráfico de sectores mostrados en la Figura 61.

Tabla 46

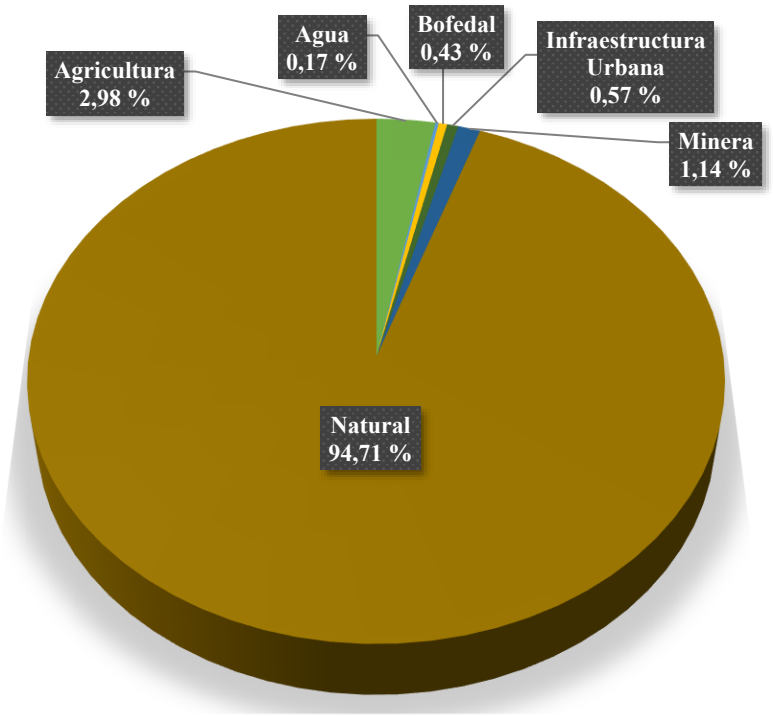
Clases de uso y cobertura de la tierra predichos al 2023

Clases	Área (ha)	Porcentaje (%)
Agricultura	10531,75	2,98
Agua	595,51	0,17
Bofedal	1528,78	0,43
Infraestructura Urbana	2025,79	0,57
Minera	4016,42	1,14

Natural	334832,16	94,71
TOTAL	353530,41	100,00

Figura 62

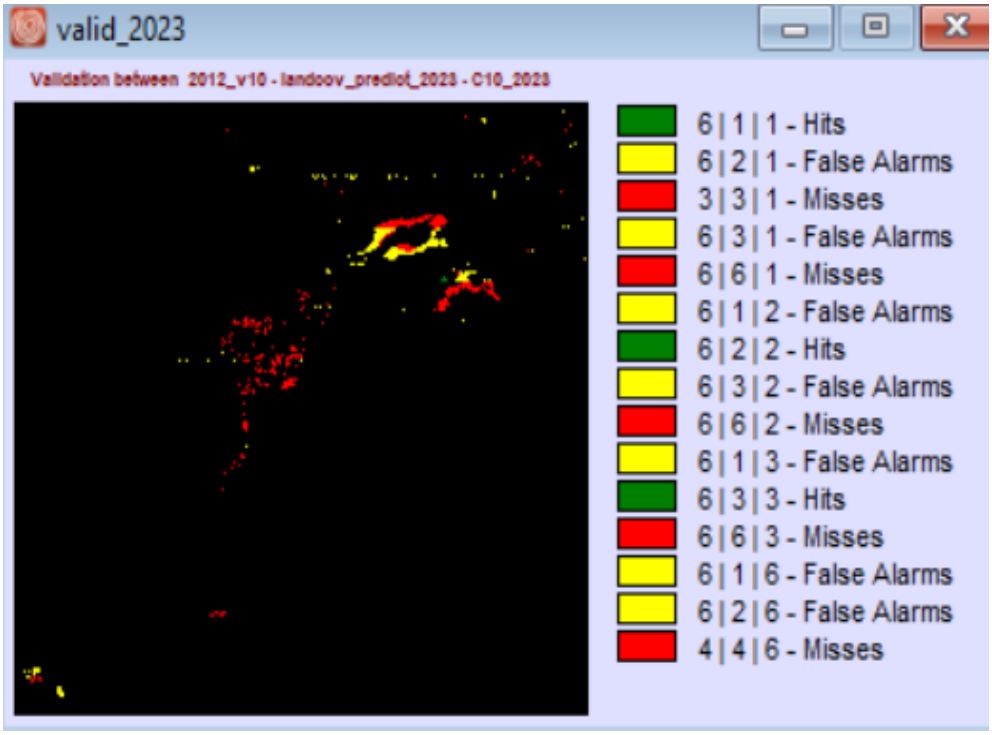
Representación estadística de clases de uso y cobertura de la tierra predichos al 2023



9. La validación de comparar el mapa espacial histórico del año 2023 con el mapa predicho por el modelo 2023 se muestra en la Figura 63.

Figura 63

Mapa de validación entre el mapa histórico y mapa predicho del año 2023



Para interpretar los colores de la validación de las clases del modelo en la leyenda de la Figura 63 es la siguiente:

1. Categorías de **color verde** representan los aciertos, indicando que el modelo predijo el cambio y cambio.
2. Categorías de **color rojo** representan los errores, es decir que el modelo predijo la persistencia y cambio, por ejemplo, en las zonas mineras cercanas al tajo de Cuajone y al tajo de Quellaveco deberían de permanecer como cobertura natural, pero cambiaron a clase minera.

3. Categorías de **color amarillo** representan las falsas alarmas, es decir, que el modelo predijo el cambio y persistió, por ejemplo, en las zonas mineras cercanas al tajo de Cuajone y al tajo de Quellaveco, deberían de cambiar a clase agrícola, pero persistió como clase minera.

Cantidad de áreas validadas en hectáreas del mapa de validación al comparar el mapa espacial histórico del año 2023 con el mapa predicho por el modelo 2023 (Figura 63) se muestran en el mismo orden en la Tabla 47.

Tabla 47

Cantidad de áreas validadas en hectáreas entre el mapa histórico y mapa predicho del año 2023

Categoría	Hectáreas	Leyenda
0	856174,790000	
1	4,380000	6 | 1 | 1 – Hits
2	1,610000	6 | 2 | 1 - False Alarms
3	40,810000	3 | 3 | 1 – Misses
4	19,780000	6 | 3 | 1 - False Alarms
5	947,200000	6 | 6 | 1 - Misses
6	4,830000	6 | 1 | 2 - False Alarms
7	0,560000	6 | 2 | 2 - Hits
8	2101,960000	6 | 3 | 2 - False Alarms
9	2679,170000	6 | 6 | 2 - Misses
10	5,550000	6 | 1 | 3 - False Alarms
11	38,540000	6 | 3 | 3 - Hits
12	1381,170000	6 | 6 | 3 - Misses
13	559,060000	6 | 1 | 6 - False Alarms
14	774,170000	6 | 2 | 6 - False Alarms
15	162,820000	4 | 4 | 6 – Misses

Nota. La tabla muestra la cantidad de áreas validadas en hectáreas del mapa de validación al comparar el mapa espacial histórico 2023 con el mapa proyectado por el modelo al 2023.

Por otro lado, aplicando el método de Matriz de confusión o tabulación cruzada (*Cross-tabulation*) entre el mapa espacial histórico del año 2023 con el mapa predicho por el modelo 2023, nos da un índice de Kappa general de 0,98350, que indica una concordancia global entre los mapas, el análisis se realizó a nivel de píxel cuyos resultados se muestran en la Tabla 48 y los valores proporcionales de la tabulación cruzada en la Tabla 49, recordando que los resultados son de la interfaz del módulo Cross Tab del software TerrSet (Idrisi), así como los índices de Kappa en la Tabla 50 y son los siguientes:

Tabla 48

Tabulación cruzada a nivel de píxel entre el mapa histórico y mapa predicho del año 2023.

Clase	0	1	2	3	4	5	6	Total
0	51136599	0	0	0	0	0	0	51136599
1	0	152750	0	4066	0	0	96988	253804
2	0	0	340884	0	0	0	451340	792224
3	0	289	0	885997	0	0	142526	1028812
4	0	0	0	0	136876	0	1592	138468
5	0	0	0	0	0	59886	37	59923
6	0	0	0	284	16004	0	33063522	33079810
Total	51136599	153039	340884	890347	152880	59886	33756005	86489640

Nota: Chi-square = 411760192.0000, df = 36, P-Level = 0.0000, Cramer's V = 0.8908

Tabla 49

Valores proporcionales de la tabulación cruzada a nivel de píxel entre el mapa histórico y mapa predicho del año 2023.

Category	0	1	2	3	4	5	6	Total
0	0,5912	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5912
1	0,0000	0,0018	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0011	0,0029
2	0,0000	0,0000	0,0039	0,0000	0,0000	0,0000	0,0052	0,0092
3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0102	0,0000	0,0000	0,0016	0,0119
4	0,0000	00000	0,0000	0,0000	0,0016	0,0000	0,0000	0,0016
5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0007	0,0000	0,0007
6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,0000	0,3823	0,3825
Total	0,5912	0,0018	0,0039	0,0103	0,0018	0,0007	0,3903	1,0000

Tabla 50

Índice de precisión KIA para el año 2023: Comparación entre datos históricos y predichos

Clase	**Uso y Cobertura**	**KIA 2023 histórico**	**KIA 2023 predicho**
0	Envolvente	1,0000	1,0000
1	Infraestructura Urbana	0,6011	0,9981
2	Minera	0,4280	1,0000
3	Agricultura	0,8597	0,9951
4	Bofedal	0,9885	0,8951

5	Agua	0,9994	1,0000
6	Natural	0,9992	0,9668

Nota: La evaluación del Índice KIA en la simulación de cambio de uso y cobertura de la tierra para el año 2023 nos da un valor de Kappa general de 0,9835.

La interpretación de estos resultados obtenidos de la comparación de dos mapas del 2023 (2023 histórico y 2023 predicho) en el módulo **Cross Tab** de **TerrSet Idrisi** puede desglosarse en varios aspectos:

1. Matriz de confusión (Cross-tabulation Results)

Esta tabla muestra el cruce entre las clases de los dos mapas. Aquí se destacan:

- **Diagonal principal:** Representa las coincidencias entre las clases de ambos mapas. Por ejemplo, para la clase 0 (envolvente de la cuenca) hay 51136599 píxeles coincidentes, lo cual indica una precisión perfecta para esta clase.
- **Valores fuera de la diagonal:** Indican discrepancias entre las predicciones y los datos de referencia. Por ejemplo, para la clase 1 hay 96988 píxeles clasificados como clase 6 en el mapa de predicción, lo que sugiere una confusión significativa entre estas clases.

La mayoría de las coincidencias están concentradas en la diagonal, lo que implica una alta similitud general entre los mapas.

2. Estadísticas globales

- **Chi-cuadrado (Chi-square):** Un valor de 411760,192 con un nivel de significancia P=0.0000P = 0,0000P=0,0000 indica que hay una asociación estadísticamente significativa entre los mapas. Esto sugiere que las similitudes no son producto del azar.
- **Cramer's V:** Un valor de 0,8908 indica una asociación muy fuerte entre las clases de los dos mapas. Este índice está escalado entre 0 (sin asociación) y 1 (asociación perfecta).

Los mapas tienen una correspondencia muy alta en términos de asociación entre clases.

3. Índice de Kappa (KIA)

- **KIA por clase (usando 2023 predicho como referencia):**

  - Las clases 4, 5 y 6 tienen valores de Kappa cercanos a 1, lo que indica una precisión casi perfecta.
  - La clase 1 tiene un valor de KIA=0,6011, lo que sugiere una precisión moderada.
  - La clase 2 tiene un KIA=0,4280, lo que indica una precisión más baja y destaca como un área de mejora.
  - La clase 3 tiene un KIA=0,8597, lo que representa una precisión alta pero no perfecta.

- **KIA por clase (usando 2023 predicho como referencia):**
  - Aquí las clases tienen valores de Kappa más altos en general. Por ejemplo, la clase 2 pasa a tener un valor perfecto de 1,000, lo que refleja que este mapa (2023 proyectado) considera mejor las predicciones para esta clase.
- **Kappa general:** Un valor de 0,9835 indica una concordancia global excelente entre los mapas, considerando tanto las coincidencias como las discrepancias.

El modelo predictivo reproduce con alta precisión las clases del mapa de referencia. Sin embargo, ciertas clases, como la 1 y la 2, presentan discrepancias que deberían analizarse más a fondo.

4. Proporciones (Proportional Cross-tabulation)

- La distribución proporcional de las clases confirma que:
  - La clase 6 también tiene una proporción significativa, representando el 38,23 % del total.
  - Las clases menores (1, 2, 3, 4, 5) ocupan proporciones muy pequeñas, pero estas clases tienen el potencial de ser más susceptibles a errores debido a su menor representación.

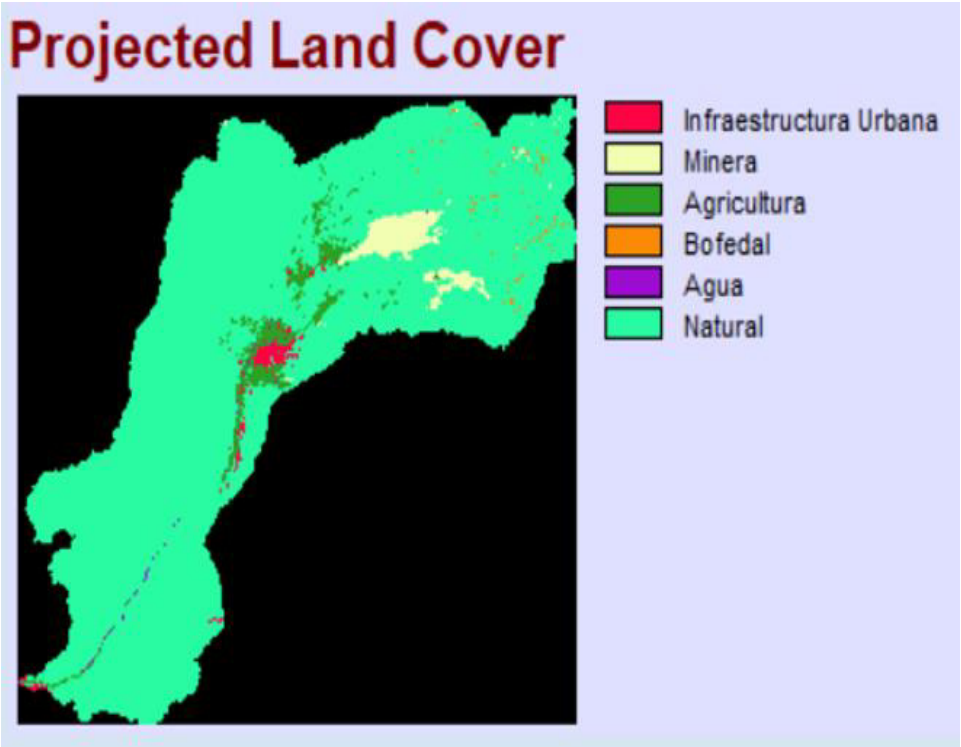
El dominio de la clase 6 puede influir en las métricas globales, pero los errores en clases menos representadas como la 1 y la 2 deben monitorearse cuidadosamente, especialmente si son importantes desde un punto de vista analítico o de toma de decisiones.

5.4. Escenarios del cambio de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua para el año 2040

La predicción de escenarios de uso y cobertura de la tierra para el año 2040, se muestran en el mapa de la Figura 64.

Figura 64

Mapa de predicción de escenarios para el año 2040



Observando el mapa de uso y cobertura de la tierra de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua de 2040 (Figura 64), podemos identificar que la cobertura "Natural" continuará ocupando la mayor superficie en el ámbito de estudio y la cobertura "Agua" continuará siendo la menor superficie en el ámbito de estudio, confirmándose con el reporte de datos numéricos de la tabla 4, donde identificamos que la cobertura "Natural" tiene 330521,89 hectáreas y la cobertura "Agua" tiene 599,23 hectáreas, que representan el 93,49 % y 0,17 % respectivamente, los que se representan estadísticamente en el gráfico de sectores mostrados en la Figura 65.

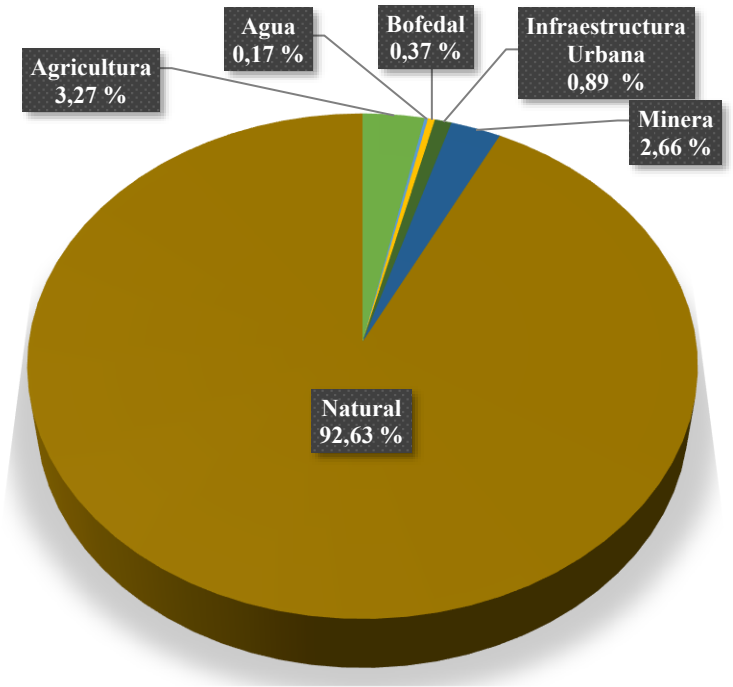
Tabla 51

Clases de uso y cobertura de la tierra para el año 2040

Clases de uso y cobertura de la tierra de 2040	Área (ha)	Porcentaje (%)
Agricultura	11565,96	3,27
Agua	603,27	0,17
Bofedal	1322,20	0,37
Infraestructura Urbana	3142,26	0,89
Minera	9421,38	2,66
Natural	327475,34	92,63
TOTAL	353530,41	100,00

Figura 65

Representación estadística de clases de uso y cobertura de la tierra para el año 2040



La Tabla 51 muestra los cambios que se podrían dar en el año 2040 evaluado a partir de los años 1971 y 2023, entre los datos más significativos se puede evidenciar el incremento en la clase infraestructura urbana con una tasa de cambio anual de 1,26 %/año y la disminución de la clase Bofedal con -0,27 %/año. También por los cambios de incremento y disminución, la clase Natural disminuirá en -0,05 %/año.

Tabla 52

Tasas de cambio anual de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua en el periodo de 1972 a 2040

Clase de uso y cobertura de la tierra	UCT 1972	UCT 2023	UCT 2040	Cambios de uso y cobertura (1972 – 2023)				Cambios de uso y cobertura (2023 – 2040)			
	Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)	Cambio de clase (ha)	Índice de Dinámica Temporal (%)	Tasa de cambio anual (ha/año)	Tasa de cambio anual (%/año)	Cambio de clase (ha)	Índice de Dinámica Temporal (%)	Tasa de cambio anual (ha/año)	Tasa de cambio anual (%/año)
Agricultura	5119,87	10288,12	11565,96	5168,25	1,98	101,34	1,38	1277,84	0,24	25,06	0,69
Agua	582,45	599,23	603,27	16,78	0,06	0,33	0,06	4,04	0,01	0,08	0,04
Bofedal	1638,55	1384,68	1322,20	-253,87	-0,34	-4,98	-0,33	-62,48	-0,09	-1,23	-0,27
Infraestructura Urbana	232,19	2541,13	3142,26	2308,94	21,62	45,27	4,80	601,13	0,46	11,79	1,26
Minera	1968,90	8195,36	9421,38	6226,46	6,87	122,09	2,84	1226,02	0,29	24,04	0,82
Natural	343988,45	330521,89	327475,34	-13466,56	-0,09	-264,05	-0,08	-3046,55	-0,02	-59,74	-0,05
Total	**353530,41**	**353530,41**	**353530,41**								

El modelo de regresión aplicado a las seis clases de uso y cobertura de la tierra en la Cuenca Hidrográfica Ilo-Moquegua permitió evaluar el ajuste de los modelos de regresión **lineal** y **cuadrático**, cuyos resultados se presentan en la Tabla 53 y Figura 66, El objetivo principal de este análisis fue determinar la mejor representación de las tendencias observadas en los años 1972, 2012 y 2023, así como la proyección de escenarios futuros al año 2040.

Tabla 53

Tendencias y ajuste para los modelos de regresión lineal y cuadrático

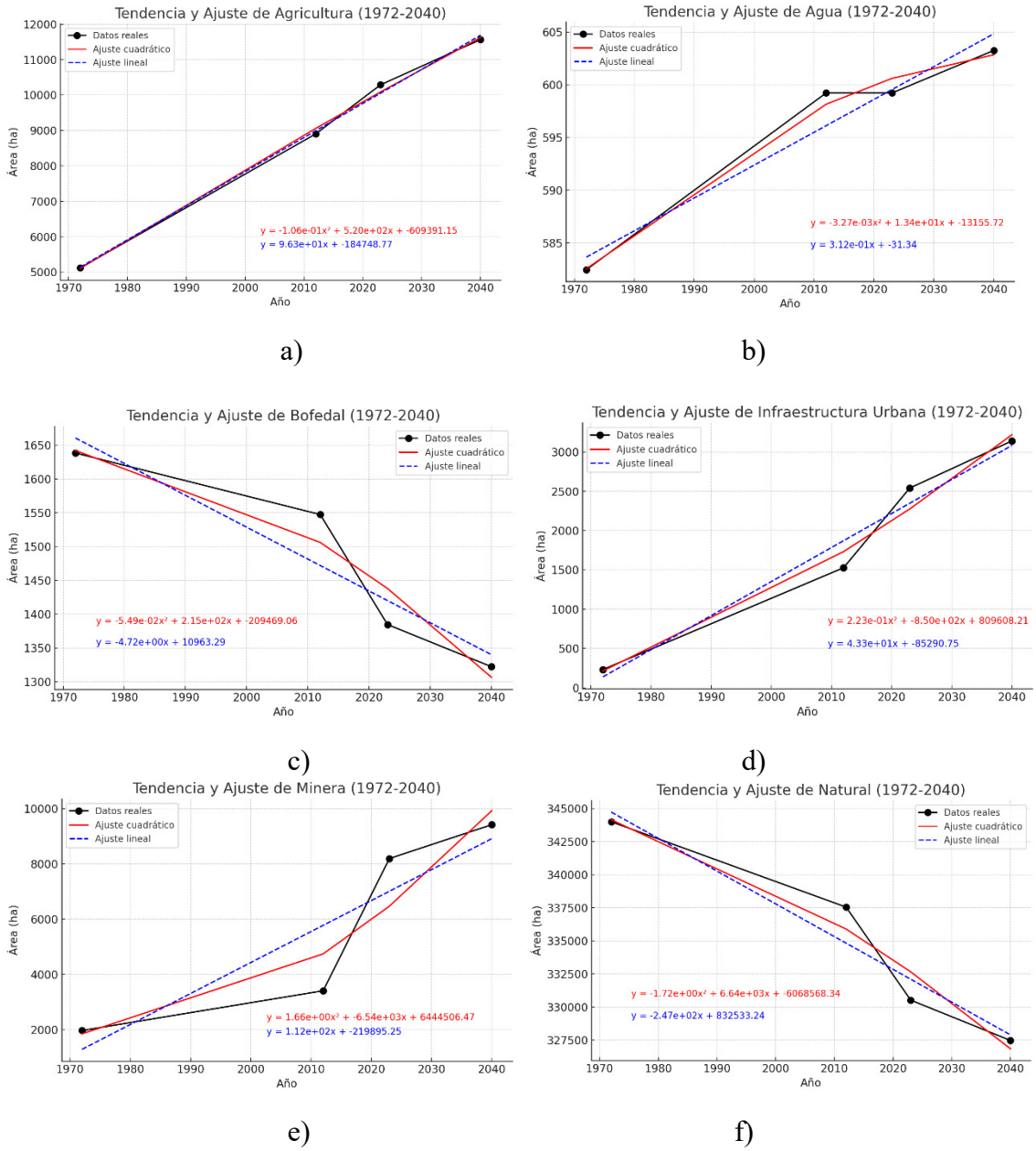
Clase de uso y cobertura de la tierra	R² Lineal	Ecuación Lineal	R² Cuadrático	Ecuación Cuadrática
Agricultura	0,9966	y = 9,63e+01x + -184748,77	0,9971	y = -1,06e-01x² + 5,20e+02x + -609391,15
Agua	0.9467	y = 3,12e-01x + -31,34	0,9874	y = -3,27e-03x² + 1,34e+01x + -13155,72
Bofedal	0,8778	y = -4,72e+00x + 10963,29	0,9243	y = -5,49e-02x² + 2,15e+02x + -209469,06
Infraestructura Urbana	0,9655	y = 4,33e+01x + -85290,75	0,9755	y = 2,23e-01x² + -8,50e+02x + 809608,21
Minera	0,8031	y = 1,12e+02x + -219895,25	0,8718	y = 1,66e+00x² + -6,54e+03x + 6444506.47
Natural	0,9353	y = -2,47e+02x + 832533,24	0,9529	y = -1,72e+00x² + 6,64e+03x + -6068568.34

Nota: En la tabla el valor mínimo para el R2 lineal esl valor de Kappa general es 0,9835.

El coeficiente de determinación (R^2) fue calculado para ambos modelos, en la Tabla 53 encontramos valores mínimos de 0,8031 en R^2 lineal y 0,8718 en R^2 cuadrático en la cobertura Minera, indicando que son modelos fiables para las previsiones futuras, ya que valores cercanos a 1 indican modelos con ajuste perfecto y valores carcaños 0 no se lograría modelar datos con precisión en absoluto. En términos generales, los valores de $R2$ para el modelo cuadrático fueron superiores a los del modelo lineal en todas las clases analizadas, lo que indica que los cambios en el uso y cobertura de la tierra no siguen un patrón estrictamente lineal, sino que presentan aceleraciones y desaceleraciones en su evolución temporal. Este comportamiento es claramente representado en la Figura 66.

Figura 66

Tendencias y ajuste para los modelos de regresión lineal y cuadrático



Nota: La figura muestra la tendencia y ajuste de la regresión lineal y cuadrática para los cambios del uso y cobertura de la tierra entre 1972 al 2040 en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua de las clases: a) Agricultura, b) Agua, c) Bofedal, d) Infraestructura Urbana, e) Minera y f) Natural

En base a las gráficas individuales de las seis clases de uso y cobertura de la tierra, se identifican las tendencias principales hacia el año 2040, considerando la regresión cuadrática como el modelo más adecuado para interpretar los datos observados. Este

enfoque permite capturar las aceleraciones y desaceleraciones sin ser excesivamente complejo. A continuación, se detallan las proyecciones para cada clase o clase.

1. Agricultura

Tendencia: Crecimiento continuo.

Proyección: El área destinada a la agricultura muestra una tendencia al alza, con un aumento progresivo desde 1972 hasta 2040. Este crecimiento es moderado pero sostenido, indicando un posible incremento de aproximadamente 2,000 hectáreas adicionales para 2040 respecto al año 2023.

Interpretación: Este cambio podría asociarse con la expansión de actividades agrícolas impulsadas por la necesidad de alimentos o cambios en la política del uso del suelo. Respecto al R^2 lineal 0,9966 y el R^2 cuadrático 0,9971 podemos indicar, que el modelo cuadrático mejora ligeramente la capacidad de ajuste respecto al modelo lineal, lo que sugiere que la expansión agrícola ha tenido una aceleración en ciertos periodos. La ecuación cuadrática indica que el crecimiento del área agrícola no ha sido constante, sino que ha incrementado su ritmo de expansión en las últimas décadas.

2. Agua

Tendencia: Estabilidad con ligeros aumentos.

Proyección: El área de agua presenta una tendencia casi constante, con un ligero incremento hacia el año 2040. Este crecimiento mínimo, de menos de 10 hectáreas en total, sugiere estabilidad en los cuerpos de agua existentes.

Interpretación: Los pequeños cambios pueden deberse a modificaciones naturales o mejoras en infraestructura hídrica. Respecto al R^2 lineal 0,9467 y el R^2 cuadrático 0,9874 podemos indicar, que aunque el ajuste lineal ya ofrece una buena representación de la tendencia, el modelo cuadrático captura mejor las fluctuaciones en el área de cuerpos de agua. Esto sugiere que la disponibilidad de agua ha experimentado variaciones más complejas, posiblemente relacionadas con factores climáticos o de gestión hídrica.

3. Bofedal

Tendencia: Disminución progresiva.

Proyección: Los bofedales muestran una reducción constante, con una aceleración en la pérdida de área en años recientes. Para 2040, se espera que disminuyan en alrededor de 60 hectáreas adicionales respecto a 2023.

Interpretación: Este patrón podría estar asociado con el impacto del cambio climático, actividades antropogénicas o cambios en el manejo del recurso hídrico. Respecto al R^2 lineal 0,8778 y el R^2 cuadrático 0,9243 podemos indicar, que el modelo cuadrático es más adecuado que el lineal, lo que sugiere que la reducción del área de bofedales ha sido variable en el tiempo. La ecuación cuadrática refleja que la pérdida de estos ecosistemas ha tenido periodos de mayor y menor intensidad, posiblemente debido a cambios en la dinámica hidrológica o impactos antrópicos.

4. Infraestructura Urbana

Tendencia: Crecimiento acelerado.

Proyección: El área destinada a infraestructura urbana evidencia un crecimiento significativo, especialmente a partir de 2012. Para 2040, se espera un incremento de aproximadamente 600 hectáreas adicionales respecto a 2023.

Interpretación: Esto refleja el desarrollo urbano y la expansión poblacional en la cuenca. Respecto al R^2 lineal 0,9655 y el R^2 cuadrático 0,9755 podemos indicar, que el crecimiento urbano sigue una tendencia predominantemente lineal, aunque el ajuste cuadrático muestra una mejora en la capacidad explicativa. Esto indica que la expansión urbana ha experimentado un aumento más acelerado en ciertos periodos, reflejado en la ecuación cuadrática.

5. Minera

Tendencia: Crecimiento rápido.

Proyección: Las áreas mineras muestran un crecimiento notable, especialmente desde 2012. Para 2040, se proyecta un incremento de cerca de 1,200 hectáreas adicionales, lo que sugiere una aceleración en la actividad extractiva.

Interpretación: Esta tendencia podría estar impulsada por la demanda de minerales estratégicos y el aumento de concesiones mineras. Respecto al R^2 lineal 0,8031 y el R^2 cuadrático 0,8718 podemos indicar, que este es el caso con la menor capacidad explicativa

del modelo lineal, lo que sugiere que la expansión minera no sigue un patrón constante en el tiempo. La regresión cuadrática presenta un mejor ajuste, indicando que la actividad minera ha tenido fases de expansión más aceleradas en ciertos periodos.

6. Natural

Tendencia: Disminución constante.

Proyección: La clase natural experimenta una pérdida continua de superficie, con una reducción acumulada significativa hacia el año 2040. Se espera una disminución adicional de 3,000 hectáreas respecto a 2023.

Interpretación: Este patrón probablemente refleja la conversión de áreas naturales a usos agrícolas, mineros o urbanos, así como los efectos del cambio climático. Respecto al R^2 lineal 0,9832 y el R^2 cuadrático 0,9981 podemos indicar, El alto valor de R^2 en ambos modelos indica que la tendencia es clara y bien representada, pero el ajuste cuadrático tiene un mejor desempeño en la explicación de los datos. Esto sugiere que la reducción del área natural no ha sido constante, sino que presenta una aceleración en la pérdida de cobertura natural en las últimas décadas.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

6.1. Delimitación y caracterización topográfica y morfométrica de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua

El análisis integral de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua se ha estructurado a partir de las delimitaciones obtenidas con los modelos digitales de elevación (DEM) ASTER, SRTM y ALOS PALSAR, comparándolos con la delimitación manual basada en la carta nacional (1:25,000) y la delimitación oficial de la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Los resultados confirman que la precisión en la delimitación depende tanto de la resolución del DEM como de los criterios aplicados para la evaluación, afectando la gestión hídrica y la planificación territorial.

6.1.1. Delimitación de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua.

Discrepancias en Altitud y Precisión

Los DEM ASTER, SRTM y ALOS PALSAR muestran variaciones significativas en altitudes extremas, especialmente en áreas montañosas. La altitud máxima reportada por ALOS PALSAR (5604 m s.n.m.) superó ligeramente las de SRTM (5557 m s.n.m.) y ASTER (5501 m s.n.m.), mientras que la referencia en la carta nacional fue de 5588 m s.n.m. Estas diferencias reflejan cómo la resolución y los algoritmos de interpolación afectan la precisión altimétrica (Liang & Wang, 2020). En áreas de alta complejidad, como las cabeceras, estas variaciones pueden influir en la precisión de los modelos de flujo y gestión del agua.

Comparación de Áreas y Desviaciones

El área media obtenida de los DEM fue de 3528,84 km², con una desviación estándar de 3,95 km², cercana a la delimitación manual (3535,31 km²), pero mayor que la reportada por la ANA (3406,57 km²). Esto sugiere que la menor resolución de las cartas utilizadas por la ANA pudo haber omitido detalles importantes, debido a la cartografía base utilizada en los años 1999-2000, fueron las hojas topográficas a escala 1:250000

IGN-DMA y del IGN-IPGH, y las cartas Nacionales Digitales 1:100000 del IGN-MED-INRENA explicado en el resumen ejecutivo de la delimitación y codificación de unidades hidrográficas del Perú (ANA, 2012). La delimitación manual se mostró más precisa en áreas sensibles, como el exutorio, lo que destaca la necesidad de complementar las herramientas digitales con verificaciones in situ para corregir errores en sectores complejos.

Evaluación Posicional según NMAS, EMAS y NSSDA

El modelo SRTM demostró la mayor precisión vertical, con un RMSE de 8.46 m y un sesgo de -1,71 m. En contraste, ASTER mostró un RMSE de 10,17 m y ALOS PALSAR presentó el peor desempeño con un RMSE de 39,57 m y un sesgo significativo de -38,72 m. Solo el SRTM cumplió con los estándares NMAS, manteniendo los errores dentro del umbral del 10 %, lo que lo posiciona como el modelo más adecuado para estudios que requieren alta precisión. La evaluación según EMAS resaltó la necesidad de aplicar correcciones sistemáticas en futuros estudios, dado que todos los modelos mostraron algún grado de sesgo.

De acuerdo con Cruz (2019), la precisión de los datos de los DEM depende tanto de la resolución espacial del píxel como de la calidad de la georreferenciación horizontal y vertical. Estos factores son esenciales para minimizar los errores en la generación de modelos digitales del terreno y asegurar una representación precisa de las características topográficas. Por lo tanto, futuras investigaciones deberían enfocarse en la integración de verificaciones en campo y ajustes en los algoritmos de procesamiento para optimizar la precisión de los DEM, particularmente en terrenos montañosos y complejos

Coincidencia con Estudios Previos

Los hallazgos coinciden con los resultados de Sena et al. (2020a), quienes identifican al SRTM como la opción más eficiente por su precisión, facilidad de procesamiento y bajo costo. Estos estudios enfatizan que la elección del DEM depende de los objetivos, la escala del proyecto y los recursos disponibles, aspectos fundamentales también considerados en esta investigación. La integración del SRTM con verificaciones de campo asegura una gestión hídrica más eficiente y una delimitación más precisa del territorio.

6.1.2. Características topográficas y morfométricas de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua

Planimetría y Forma de la Cuenca

El análisis del área y perímetro de la cuenca, junto con un índice de Gravelius de 2,60 y un factor de forma de 0,16, confirma una morfología alargada, lo que prolonga los tiempos de concentración del escurrimiento y disminuye el riesgo de crecidas repentinas (Horton, 1945; Zăvoianu, 1985). Esta forma sugiere que la respuesta hidrológica es lenta, permitiendo una mayor capacidad de gestión durante eventos de precipitación.

Relieve y Pendientes

La pendiente media del 27 % refleja un terreno inclinado, lo que incrementa la velocidad de escurrimiento y el riesgo de erosión, especialmente en las partes altas de la cuenca. Estas características requieren medidas de control de erosión para evitar degradación del suelo y manejar adecuadamente los caudales (Villela & Mattos, 1975; Asfaw & Workineh, 2019). La distribución altitudinal indica que la cuenca se encuentra en una fase de transición hacia la estabilidad, combinando zonas activamente erosionadas con áreas estabilizadas, lo que es coherente con las observaciones de Almeida et al. (2022).

Sistema de Drenaje

El análisis del sistema de drenaje, con un orden 5, según Strahler (1964), sugiere una cuenca madura con capacidad para manejar grandes volúmenes de agua. La baja densidad de drenaje (0,29 km/km²) y la sinuosidad del curso principal cercana a 1,00 indican un flujo eficiente, minimizando pérdidas por erosión y acumulación de sedimentos. Sin embargo, la complejidad del sistema de drenaje requiere una gestión adecuada para evitar la sedimentación en zonas planas y mantener la funcionalidad del sistema hídrico (Schumm, 1956; Camino et al., 2018).

6.2. Análisis de tendencias espaciales de cambios de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua entre los años 1972-2012-2023

6.2.1. Cartografiado de la distribución espacial de clases de uso y cobertura de la tierra para los años 1972, 2012 y 2023.

La cartografía generada para los años 1972, 2012 y 2023 permitió identificar los cambios espaciales y temporales en las seis clases de uso y cobertura de la tierra (agricultura, agua, bofedales, infraestructura urbana, minería y natural) dentro de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua. A continuación, se discuten los resultados observados:

1. **Distribución Espacial en 1972**

El análisis del mapa de 1972 refleja un predominio de la cobertura natural (97,30 %), evidenciando un territorio con bajo nivel de intervención humana. Estas áreas naturales servían como soporte principal de los servicios ecosistémicos, incluyendo regulación climática y soporte de biodiversidad. La escasa presencia de infraestructura urbana (0,07 %) refuerza la idea de un territorio con mínimo desarrollo urbano. Estudios como los de Ellis & Ramankutty (2008) destacan que paisajes predominantemente naturales, como los observados en 1972, suelen mantener una alta resiliencia ecosistémica frente a perturbaciones.

2. **Distribución Espacial en 2012**

En el mapa de 2012, se observan cambios notables, como la disminución de la cobertura natural al 95,48 % y el incremento de las clases agrícolas, mineras y urbanas. La expansión agrícola (2,52 %), es consistente con tendencias globales donde la intensificación agrícola responde a la creciente demanda de alimentos, como lo menciona Foley et al. (2011) y Barbosa et al. (2023).

La infraestructura urbana (0,43 %) muestra un crecimiento significativo respecto a 1972, reflejando un proceso de urbanización vinculado al aumento poblacional y la expansión de las actividades económicas, tal como señala Seto et al (2012) y K. Shi et al. (2023). No obstante, la pérdida de bofedales (1547,50 ha) es preocupante, dado su rol crítico en la regulación hídrica. Estudios recientes, como los de Gutiérrez Tito (2013) y Chávez et al. (2023), resaltan la vulnerabilidad de los humedales altoandinos frente a actividades humanas intensivas.

3. Distribución Espacial en 2023

El mapa de 2023 muestra la continuación de las tendencias observadas en 2012, con un descenso adicional de la cobertura natural al 93,49 %. La expansión minera (2,32 %) y urbana (0,72 %) se aceleró significativamente en este período, reflejando un proceso intensivo de uso del suelo que coincide con las políticas extractivas observadas en países andinos, según lo documentado por Bebbington et al. (2008) y Rivera (2020).

Precisión y Validación

El desempeño del modelo de clasificación para 2023, con una precisión general del 98 %, demuestra la fiabilidad del cartografiado. Sin embargo, las inconsistencias menores en clases como agricultura (94 %) y bofedales (96 %) resaltan la necesidad de mejorar los métodos de clasificación para zonas de transición, como lo recomiendan Congalton y Green (2019) en sus estudios sobre precisión en sistemas de teledetección.

6.2.2. Análisis de tendencias espaciales de cambios de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua entre los años 1972, 2012 y 2023

El análisis de los cambios en el uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua durante los períodos 1972-2012, 2012-2023 y 1972-2023 permite identificar patrones diferenciados en las seis clases en estudio: agricultura, agua, bofedales, infraestructura urbana, minería y cobertura natural. A continuación, se presenta una discusión integral basada en las métricas de cambio en hectáreas por año, el Índice de Dinámica Temporal (IDT) y la Tasa de Cambio Logarítmica.

1. Cambio en ha/año

El cambio promedio anual en hectáreas revela las siguientes dinámicas clave:

- **Agricultura:** La expansión agrícola ha sido sostenida, aumentando de 94,60 ha/año (1972-2012) a 125,86 ha/año (2012-2023). Este incremento refleja una intensificación agrícola impulsada por la demanda de alimentos y productos comerciales, alineándose con las tendencias globales de transformación de paisajes agrícolas reportadas por Foley et al. (2011) y Barbosa et al. (2023). Sin

embargo, esta expansión también representa una presión sobre ecosistemas vecinos, como los bofedales y las áreas naturales.

- **Agua:** La clasificación agua muestra un cambio casi nulo en hectáreas por año durante los tres períodos, lo que podría interpretarse como estabilidad en términos de área. Sin embargo, estudios como los de Junk (2013) advierten que la calidad y funcionalidad de los recursos hídricos pueden estar siendo afectadas por actividades antrópicas, incluso si la superficie no varía significativamente. Este riesgo es evidente en la cuenca Ilo-Moquegua, donde la expansión minera y la pérdida de bofedales pueden alterar los ciclos hídricos.
- **Bofedales:** La pérdida de 2,28 ha/año (1972-2012) que se intensifica a 14,80 ha/año (2012-2023) es una de las tendencias más preocupantes. Este ecosistema, esencial para la regulación hídrica y el almacenamiento de carbono, está siendo desplazado principalmente por actividades agrícolas y mineras, en línea con lo reportado por Gutiérrez Tito (2013) y Chávez et al. (2023) en humedales altoandinos.
- **Infraestructura Urbana:** El cambio anual de 92.16 ha/año entre 2012-2023 confirma la acelerada urbanización de la cuenca, consistente con lo descrito por Seto et al (2012) y K. Shi et al. (2023) sobre la rápida expansión de áreas urbanas en regiones en desarrollo. Este proceso plantea desafíos en la gestión del suelo y el acceso a servicios básicos.
- **Minería:** La minería presenta el cambio más significativo en hectáreas por año, pasando de 35,99 ha/año (1972-2012) a 435,14 ha/año (2012-2023). Este crecimiento exponencial coincide con las políticas extractivas recientes y la demanda global de minerales, tal como lo analizan Bebbington et al. (2008) y Rivera (2020).
- **Cobertura Natural:** La pérdida de 144,86 ha/año (1972-2012), que se acelera a 637,26 ha/año (2012-2023) refleja la transformación de áreas naturales hacia usos más intensivos. Este cambio es indicativo de una presión significativa sobre la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.

2. Índice de Dinámica Temporal (IDT)

El IDT permite analizar la intensidad relativa de cambio respecto al área inicial de cada clase:

- **Agricultura:** Con valores de 1,85 % (1972-2012) y 1,41 % (2012-2023), la agricultura muestra una dinámica estable, sugiriendo una transformación gradual pero sostenida. Este patrón está alineado con la transformación gradual de tierras naturales hacia tierras cultivables, como señalan Ellis y Ramankutty (2008).
- **Agua:** El IDT cercano a 0 % refuerza la estabilidad en términos de área, pero subestima posibles impactos indirectos en la calidad hídrica debido a la pérdida de bofedales y la expansión minera.
- **Bofedales:** El IDT de -0,14 % (1972-2012) y -1,01 % (2012-2023) evidencia una aceleración preocupante en la pérdida de estos ecosistemas, cruciales para la resiliencia hídrica y climática de la cuenca.
- **Infraestructura Urbana:** Con IDTs de 13,95 % (1972-2012) y 6,03 % (2012-2023), la urbanización es la clase más dinámica en términos relativos, reflejando su expansión continua.
- **Minería:** El IDT aumenta de 1,83 % (1972-2012) a 12,76 % (2012-2023), confirmando la intensificación reciente de esta actividad extractiva.
- **Cobertura Natural:** El IDT negativo en ambos períodos destaca la continua pérdida de áreas naturales, vinculada a la expansión de otras clases.

3. Tasa de Cambio entre años

La tasa de cambio entre años aplicando la ecuación de la FAO (1996), ofrece una perspectiva acumulativa sobre las transformaciones:

- **Agricultura y Cobertura Natural:** Muestran tasas opuestas pero estables, reflejando un equilibrio dinámico entre la expansión agrícola y la pérdida de áreas naturales.
- **Bofedales:** La tasa acumulativa de -0,33 % (1972-2023) subestima la gravedad de la reciente aceleración en su pérdida, evidenciada por métricas anuales.

- **Agua:** Aunque la tasa logarítmica es cercana a cero, la estabilidad no garantiza la ausencia de impactos indirectos, especialmente en términos de contaminación y cambios en el caudal.
- **Infraestructura Urbana y Minería:** Con tasas de 4,80 % y 8,30 % (2012-2023), respectivamente, son las clases con los cambios más dinámicos, impulsados por el crecimiento económico y la demanda de recursos.

Discusión General

El análisis de las seis clases en estudio revela una interacción compleja entre las dinámicas de cambio. La expansión agrícola, urbana y minera ha transformado significativamente el paisaje, desplazando áreas naturales y ecosistemas clave como los bofedales. La estabilidad aparente de los cuerpos de agua no debe considerarse como ausencia de impacto, ya que la presión antrópica, especialmente la minería, puede alterar su calidad y funcionalidad. Estas dinámicas subrayan la necesidad de integrar estrategias de conservación con un ordenamiento territorial sostenible.

Por otro lado, la expansión agrícola y urbana, aunque sostenida, se desarrolla a expensas de las áreas naturales. Esto resalta la necesidad de integrar el ordenamiento territorial con estrategias de conservación ambiental, priorizando los ecosistemas clave, como los bofedales, para asegurar la sostenibilidad de los recursos naturales en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua.

6.3. Construcción, comparación y validación del modelo de cambios de uso y cobertura de la tierra en el periodo 2023

Para el análisis y discusión se considera los siguientes aspectos:

1. Construcción y comparación de mapas

La comparación entre los mapas históricos y predichos del 2023 en TerrSet Idrisi refleja una alta concordancia global, como lo indica un índice Kappa global de 0,98350, lo que indica una precisión excelente (Blissag et al., 2024). Sin embargo, algunas discrepancias específicas en las clases, especialmente las clases 1 y 2, son dignas de análisis.

2. Evaluación y validación

- **Clases con Alta Precisión (KIA cercano a 1):**
  - Clases como la 0, 4, 5 y 6 tienen valores de Kappa muy altos (>0,98). Esto indica que el modelo predice con gran exactitud estas clases, lo cual puede deberse a que estas clases tienen áreas dominantes y características espectrales claras, como lo sugieren Pontius et al. (2004) en su análisis sobre modelos de cambio de uso del suelo.
  - La alta representación de la clase 0 (59,12 %) y la clase 6 (38,23 %) puede estar influyendo en la elevada concordancia global, ya que clases dominantes tienden a sesgar los indicadores globales (Sisay et al., 2023).
- **Clases con Precisión Moderada o Baja (KIA entre 0.4 y 0.6):**
  - Las clases 1 (KIA=0,6011) y 2 (KIA=0,4280) presentan discrepancias significativas. Esto puede deberse a:
    - **Confusión espectral:** Estas clases pueden compartir características espectrales con otras clases como la 6, resultando en errores de clasificación. Este fenómeno ha sido ampliamente discutido por Guo et al. (2020), en su análisis sobre la incertidumbre en la clasificación de imágenes.
    - **Representación insuficiente:** Al ser clases con menor proporción de píxeles en el área de estudio, estas pueden ser más susceptibles a errores por subrepresentación en los datos de entrenamiento o en el modelo predictivo Pontius et al. (2004).

3. Métricas Estadísticas

- **Chi-cuadrado y Cramer's V:**
  - El valor de Chi-cuadrado extremadamente alto (411760,192) y el nivel de significancia P=0,0000 confirman una relación fuerte entre los dos mapas, con un **Cramer's V de 0,8908** que indica una asociación muy robusta. Esto respalda la calidad del modelo en general, como lo sugieren

investigadores como Eastman (2016), quienes vinculan estos valores con alta precisión en modelamiento espacial.

- **Proporciones:**
    - La alta proporción de la clase 0 (59,12 %) y la clase 6 (38,23 %) domina el análisis y eleva las métricas globales. Esto implica que el índice Kappa global debe interpretarse con precaución, ya que puede enmascarar errores significativos en clases menores, como lo indica Vinayak et al. (2021).

4. Implicaciones Prácticas

El índice Kappa elevado respalda la confiabilidad del modelo para predicciones de uso del suelo en grandes áreas homogéneas (por ejemplo, clase 0 y clase 6). Sin embargo, las discrepancias en las clases 1 y 2 destacan la necesidad de:

1. **Mejorar la calidad de los datos de entrada:**
    - Aumentar la resolución espacial o espectral para mejorar la distinción entre clases espectralmente similares.
2. **Ajustar el modelo predictivo:**
    - Revisar la configuración de los algoritmos de clasificación, como Random Forest o Máxima Verosimilitud, para manejar mejor las clases subrepresentadas.
3. **Validación adicional:**
    - Implementar métricas adicionales, como el análisis de la tasa de omisión y comisión, para complementar el índice Kappa, como lo sugieren Vinayak et al. (2021).

5. Comparación con Estudios Previos

- **Modelos predictivos en cambio de uso del suelo:** Estudios como el de (Guo et al., 2020), encontraron que los valores de Kappa superiores a 0,8 son típicos en áreas dominadas por clases homogéneas, pero las clases menos frecuentes suelen presentar valores de Kappa inferiores a 0,6, similar a lo observado en las clases 1 y 2 de este análisis.

- **Efectos de la distribución desigual de clases:** Piao et al., (2023), discutieron que, en áreas con clases dominantes, el índice Kappa puede sobreestimar la precisión global. Esto resalta la necesidad de analizar las clases individualmente para obtener una evaluación más precisa del desempeño del modelo.

6. Limitaciones

El análisis está influenciado por:

1. **Clases dominantes:** El peso excesivo de las clases 0 y 6 puede enmascarar errores en clases minoritarias.
2. **Resolución del análisis:** Es necesario evaluar si la resolución espacial es adecuada para capturar variaciones locales en las clases.

6.4. Predicción de escenarios futuros de cambio de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua para el año 2040, utilizando técnicas de modelación espaciotemporal.

La predicción de escenarios obtenidos indica cambios significativos en las distintas clases de uso y cobertura de la tierra hacia el año 2040. A continuación, se analizan 4 tendencias de escenarios identificados:

1. Expansión de Áreas Agrícolas y Urbanas

- **Agricultura**: Se proyecta un incremento continuo en las áreas agrícolas desde el año 1972 al 2040, como lo indica. Este fenómeno ha sido observado en diversas regiones, donde la expansión agrícola responde a la creciente demanda de alimentos y recursos. Sin embargo, esta expansión puede conducir a la pérdida de biodiversidad y degradación de ecosistemas naturales, como lo indica Duo et al. (2016) y H. Wang et al. (2021).

- **Infraestructura Urbana**: Los resultados de los cambios de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua con respecto a la clase Infraestructura Urbana, demuestran un crecimiento acelerado de áreas urbanas, esta tendencia regional refleja la tendencia global de urbanización, especialmente

en países en desarrollo. Como lo indica Rengifo (2022) que la expansión urbana a menudo se produce a expensas de tierras agrícolas y ecosistemas naturales, generando conflictos de uso del suelo y afectando la sostenibilidad ambiental. Por lo tanto, se debe considerar la planificación del ordenamiento territorial urbano según las disposiciones que indica el Ministerio del Ambiente (2016), considerando las modificatorias en el Decreto Legislativo Nº 1764 (2024).

2. Reducción de Áreas Naturales y Bofedales

- **Áreas Naturales**: La disminución constante de áreas naturales es una tendencia preocupante en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua, ya que estos espacios son esenciales para la conservación de la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos. La conversión de tierras naturales en áreas agrícolas o urbanas puede tener consecuencias negativas, como la erosión del suelo y la pérdida de hábitats, como lo indica Hokkanen (2024).

- **Bofedales**: La reducción de bofedales es particularmente alarmante, dado su papel crucial en la regulación hídrica y como hábitat de especies endémicas dentro de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua. La expansión de actividades humanas, junto con el cambio climático, amenaza la integridad de estos ecosistemas frágiles sustentados por el Ministerio del Ambiente (2019).

3. Crecimiento de Áreas Mineras

- **Minería**: El aumento significativo de áreas mineras refleja la intensificación de la explotación de recursos naturales. Si bien la minería contribuye al desarrollo económico, también puede generar impactos ambientales negativos, como la contaminación de suelos y aguas, y la alteración de paisajes naturales, concordando con Sánchez Montoya (2022).

4. Tendencia de estabilidad de cuerpo de agua.

La clase "Agua" muestra una tendencia aparente de estabilidad a lo largo del periodo analizado (1972-2040), con incrementos mínimos proyectados hacia 2040 (menos de 10 hectáreas adicionales), pero en realidad se observa que está reduciendo la cantidad de recursos hídricos naturales y gracias al aumento de los reservorios y represas artificiales se tiene una aparente estabilización. Esta estabilidad refleja el incremento de represas y/o reservorios cercanos al tajo de la Mina Cuajone con la Represa Viña Blanca y Represa Chica, así como la Represa Quellaveco que está próxima al Tajo de la Mina Quellaveco. Por lo que se observa cambios drásticos en los cuerpos naturales de agua existentes, lo cual es típico en regiones donde el impacto del cambio climático o la actividad antropogénica como la minería intensiva suelen alterar significativamente los recursos hídricos como lo indica también Sánchez Montoya (2022).

CONCLUSIONES

- **Delimitación y caracterización topográfica y morfométrica de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua**

Delimitación de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua.

1. La utilización del modelo digital de elevación SRTM, evaluado con los estándares de precisión NMAS, permitió obtener una delimitación más precisa de la cuenca Ilo-Moquegua en comparación con los modelos ASTER y ALOS PALSAR. Esto confirma la hipótesis de que un DEM validado puede mejorar la representación del área de estudio.
2. Las visitas de campo corroboraron la importancia de combinar técnicas geomáticas con mediciones in situ para corregir errores en áreas complejas. Este proceso refuerza la precisión en la delimitación, asegurando una representación más realista del territorio.
3. Las discrepancias entre las delimitaciones manuales y automáticas revelan que, aunque los modelos digitales de elevación proporcionan bases sólidas, la intervención manual sigue siendo necesaria en sectores clave, como las zonas de Lomas Corrales y Cuesta Jahuay.
4. Las diferencias detectadas en las delimitaciones afectan la planificación hidrológica y la gestión de recursos hídricos. La precisión del DEM SRTM lo convierte en una herramienta clave para optimizar la gestión del uso y cobertura del suelo en la cuenca.

Características topográficas y morfométricas de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua

1. El modelo SRTM destacó por su consistencia en la caracterización topográfica y morfométrica, lo que contribuye a una gestión más precisa del recurso hídrico.

2. La inclinación pronunciada del terreno y la complejidad del sistema de drenaje requieren estrategias específicas de control de erosión y gestión de caudales, especialmente en las partes altas de la cuenca.

- **Análisis de tendencias espaciales de los cambios en el uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua entre los años 1972-2012-2023**

Cartografiado de la distribución espacial de las clases de uso y cobertura de la tierra para los años 1972, 2012 y 2023.

La cartografía generada para los años 1972, 2012 y 2023 permitió identificar los cambios espaciales y temporales en las seis clases de uso y cobertura de la tierra (agricultura, agua, bofedales, infraestructura urbana, minería y natural) dentro de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua. A continuación, se discuten los resultados observados:

1. Dominio de la Cobertura Natural: La cobertura natural sigue siendo predominante en los tres períodos estudiados, aunque su pérdida progresiva (1972-2023) destaca los impactos acumulativos de las actividades humanas.

2. Expansión de Usos Antropogénicos: La agricultura, minería e infraestructura urbana muestran un crecimiento constante a lo largo de los períodos analizados. Este aumento refleja la intensificación de actividades económicas, aunque plantea desafíos significativos para la sostenibilidad ambiental.

3. Pérdida de Bofedales: La disminución de los bofedales es una de las tendencias más preocupantes, dada su importancia para la regulación hídrica y la biodiversidad. Este cambio subraya la necesidad de implementar medidas urgentes de conservación.

4. Impactos en Recursos Hídricos: Aunque la superficie de agua se mantiene estable, los cuerpos hídricos están expuestos a presiones indirectas, como contaminación y cambios en los caudales, que afectan su funcionalidad.

5. Precisión y Validación del Cartografiado: El alto desempeño del modelo de clasificación para 2023, validado mediante técnicas modernas y datos históricos, refuerza la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Análisis de tendencias espaciales de los cambios en el uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua entre los años 1972, 2012 y 2023

1. **Expansión de la Agricultura**

La superficie agrícola ha mostrado un crecimiento sostenido durante los tres periodos analizados. Aunque el cambio anual en hectáreas es modesto en comparación con otras clases, su consistencia indica un proceso acumulativo significativo. Esto resalta la presión continua sobre áreas naturales y otros ecosistemas adyacentes, como los bofedales, para satisfacer las demandas crecientes de alimentos y productos agrícolas.

2. Urbanización Acelerada

La infraestructura urbana es la clase con los cambios más marcados en términos de IDT y tasa de cambio logarítmica. Entre 1972 y 2023, esta clase experimentó un aumento sustancial, reflejando un proceso de urbanización en expansión que transforma grandes áreas. Este crecimiento plantea desafíos para la planificación territorial, especialmente para equilibrar el desarrollo urbano con la conservación de ecosistemas clave.

3. Intensificación de la Minería

La actividad minera ha mostrado un crecimiento dramático, especialmente en el período reciente (2012-2023), con una alta tasa de cambio logarítmica y un cambio absoluto anual significativo. Este aumento está asociado a políticas extractivas y a la creciente demanda de minerales en el mercado global. La expansión minera no solo implica la transformación directa de áreas naturales, sino que también representa una amenaza indirecta para la calidad de los recursos hídricos y la integridad de los ecosistemas como los bofedales.

4. Estabilidad Relativa del Agua

Aunque la cobertura de agua muestra una aparente estabilidad en términos de superficie durante los tres períodos analizados, esta estabilidad no garantiza la conservación de su calidad ni su funcionalidad. Las actividades mineras, agrícolas y la pérdida de bofedales podrían estar afectando indirectamente los cuerpos hídricos a través de la sedimentación, contaminación y alteración de caudales. Es fundamental

implementar estrategias de manejo integral del agua para garantizar su sostenibilidad a largo plazo.

5. Pérdida Acelerada de los Bofedales

La reducción significativa de los bofedales en términos de hectáreas por año (-14,80 ha/año entre 2012-2023) es uno de los hallazgos más preocupantes. Este ecosistema, esencial para la regulación hídrica, el almacenamiento de carbono y el soporte de biodiversidad, está siendo desplazado principalmente por la agricultura y la minería. Su pérdida compromete la resiliencia ambiental de la cuenca y destaca la necesidad urgente de políticas de conservación específicas.

6. Pérdida Progresiva de la Cobertura Natural

La cobertura natural sigue siendo la clase dominante en la cuenca, pero los cambios negativos en hectáreas por año y el IDT reflejan una pérdida constante de áreas naturales. Esta transformación está impulsada por el crecimiento de actividades humanas, como la agricultura, la minería y la urbanización. La reducción de esta clase pone en riesgo los servicios ecosistémicos esenciales que provee, como la regulación climática y la biodiversidad.

- **Construcción, comparación y validación del modelo de cambios de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua en el periodo 2023**

Los resultados muestran que el modelo predictivo para el 2023 tiene un excelente desempeño global (Kappa = 0,9835), respaldado por una fuerte concordancia estadística. Sin embargo, las clases menos representadas (1 y 2) presentan errores significativos que deben ser abordados para mejorar la precisión del modelo. Esto puede lograrse mediante una combinación de mejoras en los datos, ajustes en el modelo y validación adicional.

- **Predicción de escenarios futuros del cambio de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua para el año 2040, utilizando técnicas de modelación espaciotemporal**

La proyección hacia 2040 indica un **incremento en las actividades humanas** (agrícolas, mineras y urbanas) en detrimento de las áreas naturales y los bofedales. Estas

tendencias sugieren la necesidad de implementar políticas de manejo sostenible del territorio en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua para mitigar los impactos sobre los ecosistemas.

.

RECOMENDACIONES

- **Delimitación y caracterización topográfica y morfométrica de la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua**

1. Se recomienda el uso del DEM SRTM como modelo base para futuros estudios en la cuenca Ilo-Moquegua, complementado con verificaciones en campo y análisis longitudinales. La aplicación de correcciones sistemáticas también es esencial para mejorar la precisión y minimizar el sesgo.
2. Es fundamental realizar mediciones in situ y delimitar subcuencas para complementar los análisis automatizados y mejorar la precisión en la toma de decisiones.

- **Análisis de tendencias espaciales de los cambios en el uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua entre los años 1972-2012-2023**

1. **Conservación de Bofedales y Recursos Hídricos:** Implementar políticas de conservación específicas para los bofedales y monitorear la calidad de los cuerpos de agua, priorizando medidas de restauración en áreas afectadas por la minería y la agricultura.
2. **Gestión Territorial Integral:** Diseñar un plan de manejo integrado que equilibre el desarrollo económico con la conservación de los ecosistemas clave. Este plan debe incluir regulaciones para la expansión urbana y minera, asegurando un uso sostenible del suelo.
3. **Incentivos para Prácticas Sostenibles:** Fomentar prácticas agrícolas sostenibles que reduzcan la presión sobre las áreas naturales, como el uso de técnicas agroforestales y la rehabilitación de tierras degradadas.
4. **Fortalecimiento de la Infraestructura de Monitoreo:** Establecer un sistema de monitoreo continuo que integre datos satelitales y mediciones de campo para evaluar cambios en el uso del suelo y sus impactos sobre los recursos naturales.

5. **Sensibilización Comunitaria:** Desarrollar programas educativos dirigidos a las comunidades locales para fomentar prácticas responsables en el uso del suelo y el manejo del agua.
6. **Implementar Políticas de Ordenamiento Territorial.** Diseñar e implementar políticas de ordenamiento territorial integrales que regulen de manera eficaz la expansión urbana y minera. Estas políticas deben priorizar el uso sostenible del suelo, minimizando los impactos negativos en los ecosistemas clave, como los bofedales y los cuerpos de agua, mientras promueven un desarrollo equilibrado.
7. **Regular la Expansión de la Infraestructura Urbana.** Establecer límites claros para la expansión de infraestructura urbana, fomentando la densificación en lugar de la ocupación de nuevas áreas. Esto reducirá la presión sobre tierras agrícolas, ecosistemas naturales y bofedales, al tiempo que optimiza el uso de los recursos existentes.
8. **Controlar la Expansión de la Minería.** Diseñar regulaciones más estrictas para la actividad minera, exigiendo estudios de impacto ambiental exhaustivos y mitigaciones efectivas que reduzcan los efectos negativos sobre los bofedales, cuerpos de agua y la cobertura natural. Además, fomentar la minería responsable con tecnologías menos invasivas.
9. **Integrar las Clases de Cobertura en Planes de Manejo Integral.** Incorporar las seis clases de cobertura estudiadas (agricultura, agua, bofedales, infraestructura urbana, minería y cobertura natural) en un plan de manejo integral que garantice la sostenibilidad de los recursos naturales en la cuenca. Este enfoque permitirá abordar las interacciones y conflictos entre las diferentes clases de uso del suelo de manera holística.
10. **Promover la Conciencia y Participación Comunitaria.** Establecer programas educativos y de participación comunitaria que sensibilicen a la población sobre la importancia de los bofedales, el agua y las áreas naturales, fomentando prácticas responsables y colaborativas en la gestión del territorio.

- **Construcción, comparación y validación del modelo de cambios de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua en el periodo 2023**

1. Se recomienda utilizar la metodología basada en el índice Kappa como base principal, dado su robustez estadística y aceptación en la literatura científica.
2. Se recomienda el método utilizado desde la construcción, comparación y validación del modelo de cambios de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua en el periodo 2023, porque el enfoque combinado permitirá una validación más exhaustiva y generalizable en análisis de cambio de uso y cobertura de la tierra. Esto resulta especialmente valioso en estudios orientados a la gestión territorial, planificación ambiental o predicción de cambios futuros.

- **Predicción de escenarios futuros del cambio de uso y cobertura de la tierra en la cuenca hidrográfica Ilo-Moquegua para el año 2040, utilizando técnicas de modelación espaciotemporal**

Se recomienda los siguientes aspectos:

1. Escenarios futuros a evaluar:

- **Escenario de línea base:** Continuación de las tendencias actuales sin intervenciones adicionales.
- **Escenario de expansión urbana:** Considerando un aumento acelerado de infraestructura urbana a expensas de áreas agrícolas o ecosistemas naturales.
- **Escenario de conservación:** Incorporación de políticas y programas destinados a proteger áreas clave como bofedales, cultivos sostenibles y zonas de recarga hídrica.

2. Uso de datos históricos:

- Es fundamental utilizar datos de satélite para calibrar los modelos de transición y asegurarse de que representen con precisión las dinámicas de la cuenca desde el pasado hacia el futuro.

3. Herramientas recomendadas:

- **Land Change Modeler (TerrSet):** Ideal para modelar transiciones históricas y simular escenarios futuros.
- **CA-Markov:** Útil para integrar modelos de transición basados en autómatas celulares y cadenas de Markov.
- **Modelos basados en Machine Learning (Redes Neuronales, Random Forest):** Para capturar relaciones no lineales y mejorar la precisión en la predicción de cambios complejos.

4. **Impactos esperados para 2040:**
   - **Expansión urbana:** Es probable un aumento significativo, especialmente en las zonas de exutorio (Zona 7) y áreas aledañas a Moquegua e Ilo.
   - **Reducción de bofedales y pajonales:** Estos ecosistemas podrían estar en riesgo si no se implementan medidas de protección, lo que afectará la recarga hídrica y la biodiversidad.
   - **Agricultura intensiva:** Las áreas agrícolas podrían experimentar cambios hacia monocultivos más rentables, pero menos sostenibles.
5. **Seguimiento continuo:**
   - Actualizar las predicciones regularmente con datos nuevos y refinar los modelos para asegurar que las decisiones basadas en estos resultados sean precisas y adaptables a cambios inesperados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acevedo-Díaz, J. A., García-Carmona, A., Aragón-Méndez, M. del M., & Oliva-Martínez, J. M. (2017). Modelos científicos: significado y papel en la práctica científica. *Revista Científica*, *3*(30), 155–166.

Ait El Haj, F., Ouadif, L., & Akhssas, A. (2023). Simulating and predicting future land-use/land cover trends using CA- Markov and LCM models. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, *7*(January), 100342. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100342

Akay, S. S. (2024). Exploring Land Use/Land Cover Dynamics and Statistical Assessment of Various Indicators. *Applied Sciences (Switzerland)*, *14*(6). https://doi.org/10.3390/app14062434

Alam, I., Nahar, K., & Morshed, M. M. (2023). Measuring urban expansion pattern using spatial matrices in Khulna City, Bangladesh. *Heliyon*, e13193. https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E13193

Almeida, G. C., Montenegro, A. A. de A., Carvalho, A. A., Lourenço, V. R., Almeida, T. A. B., & Silva, M. J. (2022). Morphometric characterization of the Alto do Ipojuca hydrographic basin. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, *12*(3), 99. https://doi.org/10.29150/2237-2202.2022.251977

Alonso-Sarría, F. (2013). *Sistemas de Información Geográfica. Temario de la asignatura (2013-2014)* (U. de Murcia (ed.)).

Alshari, E. A., & Gawali, B. W. (2021). Development of classification system for LULC using remote sensing and GIS. *Global Transitions Proceedings*, *2*(1), 8–17. https://doi.org/10.1016/J.GLTP.2021.01.002

Alshari, E. A., & Gawali, B. W. (2022). Analysis of Machine Learning Techniques for Sentinel-2A Satellite Images. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, *2022*. https://doi.org/10.1155/2022/9092299

Alves, D. C. L., Weschenfelder, J., Ferreira-Cravo, M., Espinoza, J. M. de A., & Albuquerque, M. da G. (2021). Advances in the application of Digital Elevation Models (DEMs) for the evaluation of coastal flooding. *Mercator*, *20*, 1–19.

Ambarwulan, W., Yulianto, F., Widiatmaka, W., Rahadiati, A., Tarigan, S. D., Firmansyah, I., & Hasibuan, M. A. S. (2023). Modelling land use/land cover projection using different scenarios in the Cisadane Watershed, Indonesia: Implication on deforestation and food security. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, *26*(2), 273–283. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2023.04.002

ANA. (2009a). *Demarcación y delimitación de las autoridades administrativas del agua*. http://repositorio.ana.gob.pe/handle/ANA/213

ANA, A. N. del A. (2009b). *Unidades hidrográficas del Perú*. Unidades Hidrográficas Del Perú. https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/101

ANA, A. N. del A. (2012). Delimitacion y codificación de unidades hidrográficas del Perú. In *Dirección De Conservación Y Planeamiento De Los Recurso Hídricos*.

Anderson, J. R., Hardy, E. E., Roach, J. T., & Witmer, R. E. (1976). A Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data. *Geological Survey Profesional*, *964*(1), 34. https://pubs.er.usgs.gov/publication/pp964

Anthony, T., Shohan, A. A. A., Oludare, A., Alsulamy, S., Kafy, A. Al, & Khedher, K. M. (2024). Spatial analysis of land cover changes for detecting environmental degradation and promoting sustainability. *Kuwait Journal of Science*, *51*(2), 100197. https://doi.org/10.1016/j.kjs.2024.100197

Aparicio, F. J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie* (G. Noriega (ed.); Primera re). Limusa, S.A.

Arakaki, M., & Cano, A. (2003). Composición florística de la cuenca del río Ilo-Moquegua y Lomas de Ilo, Moquegua, Perú. *Revista Peruana de Biologia*, *10*(1), 5–19. https://doi.org/10.15381/rpb.v10i1.2472

Arias, J., & Covinos, M. (2021). Diseño y metodología de la investigación. In *Enfoques Consulting EIRL*. https://repositorio.concytec.gob.pe/handle/20.500.12390/2260

Aristizabal Murillo, V. M., Vélez Upegui, J. J., & Botero Hernández, B. A. (2012). *Manual de hidrología para obras viales basado en el uso de sistemas de información geográfica*.

Ariza-López, F. J., García-Balboa, J. L., Rodríguez-Avi, J., & Robledo, J. (2019). Guía para la evaluación de la exactitud posicional de datos espaciales. In *Guía para la evaluación de la exactitud posicional de datos espaciales*.

Ariza-López, F. J., García-Balboa, J. L., Rodríguez-Avi, J., & Robledo, J. C. (2021). Guide for the positional accuracy assessment of geospatial data. In *Pan American Institute of Geography and History* (Vol. 49, Issue 2). https://doi.org/10.2478/arsa-2014-0008

Asfaw, D., & Workineh, G. (2019). Quantitative analysis of morphometry on Ribb and Gumara watersheds: Implications for soil and water conservation. *International Soil and Water Conservation Research*. https://doi.org/10.1016/J.ISWCR.2019.02.003

Asori, M., & Adu, P. (2023). Modeling the impact of the future state of land use land cover change patterns on land surface temperatures beyond the frontiers of greater Kumasi: A coupled cellular automaton (CA) and Markov chains approaches. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *29*, 100908. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100908

Asuquo Enoh, M., Ebere Njoku, R., & Chinenye Okeke, U. (2022). Modeling and

mapping the spatial–temporal changes in land use and land cover in Lagos: A dynamics for building a sustainable urban city. *Advances in Space Research*, *2050*(xxxx). https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.07.042

Aybar, C., Lavado, W., Sabino, E., Huerta, A., Felipe, O., & Ramírez, S. (2017). Atlas de zonas de vida del Perú Guía Explicativa. In *Senamhi* (Vol. 003). https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01402SENA-9.pdf

Bao, S., Cui, W., & Yang, F. (2024). Future land use prediction and optimization strategy of Zhejiang Greater Bay Area coupled with ecological security multi-scenario pattern. *PLoS ONE*, *19*(4 April). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291570

Barbosa, F. R. G. M., Duarte, V. N., Staduto, J. A. R., & Kreter, A. C. (2023). Land-Use Dynamics for Agricultural and Livestock in Central-West Brazil and its Reflects on the Agricultural Frontier Expansion. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, *4*(November 2022), 1–10. https://doi.org/10.1016/j.clcb.2022.100033

Batty, M. (2018). *Inventing future cities*. MIT press.

Bebbington, A., Humphreys Bebbington, D., Bury, J., Lingan, J., Muñoz, J. P., & Scurrah, M. (2008). Mining and Social Movements: Struggles Over Livelihood and Rural Territorial Development in the Andes. *World Development*, *36*(12), 2888–2905. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2007.11.016

Bellone, T., & Mussio, L. (2018). *Space Time and Maps BT - New Advanced GNSS and 3D Spatial Techniques* (R. Cefalo, J. B. Zieliński, & M. Barbarella (eds.); pp. 15–34). Springer International Publishing.

Bhatta, B., Saraswati, S., & Bandyopadhyay, D. (2010). Urban sprawl measurement from remote sensing data. *Applied Geography*, *30*(4), 731–740. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.02.002

Bill, R., Blankenbach, J., Breunig, M., Haunert, J.-H., Heipke, C., Herle, S., Maas, H.-G., Mayer, H., Meng, L., Rottensteiner, F., Schiewe, J., Sester, M., Sörgel, U., & Werner, M. (2022). Geospatial Information Research: State of the Art, Case Studies and Future Perspectives. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, *90*(4), 349–389. https://doi.org/10.1007/s41064-022-00217-9

Blissag, B., Yebdri, D., & Kessar, C. (2024). Spatiotemporal change analysis of LULC using remote sensing and CA-ANN approach in the Hodna basin, NE of Algeria. *Physics and Chemistry of the Earth*, *133*(December 2023), 103535. https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103535

Bovet, J., Reese, M., & Köck, W. (2018). Taming expansive land use dynamics – Sustainable land use regulation and urban sprawl in a comparative perspective. *Land Use Policy*, *77*, 837–845. https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2017.03.024

Braz, A. M., García, P. H. M., Pinto, A. L., Chávez, E. S., & de Oliveira, I. J. (2020).

Manejo integrado de cuencas hidrográficas: posibilidades y avances en los análisis de uso y cobertura de la tierra. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, *29*(1), 69–85. https://doi.org/10.15446/RCDG.V29N1.76232

Briassoulis, H., & Ph, D. (2000). Analysis of Land Use Change : Theoretical and Modeling Approaches Table of Contents. *Morgantown: West Virginia University*, 4–6. https://researchrepository.wvu.edu/rri-web-book

Buffara, A. A. F. (2018). *Iniciando em Geoprocessamento*. https://docs.ufpr.br/~felipe/sig.pdf

Callo, E. A. M. (2020). *Análisis de los cambios de cobertura y uso del suelo en el departamento de Tacna, Periodo 2007, 2012 y 2017*. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

Camacho-Sanabria, R., Camacho-Sanabria, J. M., Balderas-Plata, M. Á., Sánchez-López, M., Camacho-Sanabria, R., Camacho-Sanabria, J. M., Balderas-Plata, M. Á., & Sánchez-López, M. (2017). Cambios de cobertura y uso de suelo: estudio de caso en Progreso Hidalgo, Estado de México. *Madera y Bosques*, *23*(3), 39–60. https://doi.org/10.21829/MYB.2017.2331516

Cámara, G., & Jiménez Ortiz, M. (1998). *SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA PARA APLICAÇÕES AMBIENTAIS E CADASTRAIS: UMA VISÃO GERAL*. http://www.dpi.inpe.br/geopro/trabalhos/analise.pdf

Camino, M. A., Bó, M. J., Cionchi, J. L., López de Armentia, A., Del Río, J. L., & De Marco, S. G. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Revista Universitaria de Geografía*, *27*(1), 73–97. http://bibliotecadigital.uns.edu.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-42652018001100005

Chang, K. (2019). Introduction to Geographic Information Systems. In U. of Idaho (Ed.), *Edis* (Ninth, Vol. 2012, Issue 4). McGraw-Hill Education. https://doi.org/10.32473/edis-fr356-2012

Charizopoulos, N., Mourtzios, P., Psilovikos, T., Psilovikos, A., & Karamoutsou, L. (2019). Morphometric analysis of the drainage network of Samos Island (northern Aegean Sea): Insights into tectonic control and flood hazards. *Comptes Rendus - Geoscience*, *351*(5), 375–383. https://doi.org/10.1016/j.crte.2019.03.001

Chávez, R. O., Meseguer-Ruiz, O., Olea, M., Calderón-Seguel, M., Yager, K., Isela Meneses, R., Lastra, J. A., Núñez-Hidalgo, I., Sarricolea, P., Serrano-Notivoli, R., & Prieto, M. (2023). Andean peatlands at risk? Spatiotemporal patterns of extreme NDVI anomalies, water extraction and drought severity in a large-scale mining area of Atacama, northern Chile. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *116*(November 2022). https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103138

Chen, W., Li, X., He, H., & Wang, L. (2018). A review of fine-scale land use and land cover classification in open-pit mining areas by remote sensing techniques. *Remote Sensing*, *10*(1). https://doi.org/10.3390/rs10010015

Chereque Morán, W. (1989). *Hidrología para estudiantes de Ingeniería Civil*.

Chiaka, J. C., Liu, G., Li, H., Zhang, W., Wu, M., Huo, Z., & Gonella, F. (2024). Land cover changes and management effectiveness of protected areas in tropical coastal area of sub-Saharan Africa. *Environmental and Sustainability Indicators*, *22*(October 2023), 100340. https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100340

Chicalla-Ríos, K. J. (2021). Comunidades vegetales del matorral desértico en las cuencas de los ríos Tambo y Moquegua en el sur de Perú. *Revista Peruana de Biologia*, *28*(1). https://doi.org/10.15381/RPB.V28I1.17497

Chughtai, A. H., Abbasi, H., & Karas, I. R. (2021). A review on change detection method and accuracy assessment for land use land cover. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *22*, 100482. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100482

Chuvieco, E. (1990). Fundamentos de teledetection espacial. In *(Fundamentals of remote sensing from space*.

Collischonn, W., & Tassi, R. (2008). *Introduzindo hidrologia* (IPH UFRGS (ed.); Quinta). http://197.249.65.74:8080/biblioteca/bitstream/123456789/687/1/INTRODUÇAO A HIDROLOGIA.pdf

Con, R., Agua, E. L., Rodríguez, W., & Miranda, W. R. R. (2022). *LAS VARIACIONES ESPACIALES Y TEMPORALES DE LOS ECOSISTEMAS* (Issue October).

Congalton, R., & Green, K. (2019). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data Principles and Practices* (Vol. 3, Issues 978-1-4987-7666–0).

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2022). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches Sixth Edition*.

Cruz, J. F. M. de la. (2019). La identificación de las cabeceras de cuencas hidrográficas: métodos y aplicaciones. *Investigaciones Sociales*, *22*(40), 111–120. https://doi.org/10.15381/is.v22i40.15890

Cuentas Toledo, O. (2017). *ANÁLISE ESPAÇO TEMPORAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO DO RIO MOQUEGUA NO PERU*. Universidade Estadual de Feira de Santana.

Cuentas Toledo, O. (2019). *Análisis espacio temporal de cambios de uso y cobertura de la tierra en la ciudad de Moquegua y el pueblo de Samegua de 1955 y 2018* [Universidad José Carlos Mariátegui]. https://doi.org/10.22533/at.ed.3892126085

da Silva, G. C. G., Campos, P. C. de O., Reis, M. de M., & Paz, I. (2024). Spatiotemporal

Land Use and Land Cover Changes and Associated Runoff Impact in Itaperuna, Brazil. *Sustainability (Switzerland)*, *16*(1). https://doi.org/10.3390/su16010325

Değermenci, A. S. (2023). Spatio-temporal change analysis and prediction of land use and land cover changes using CA-ANN model. *Environmental Monitoring and Assessment*, *195*(10), 1229. https://doi.org/10.1007/s10661-023-11848-9

del Pozo, A., Catenacci-Aguilera, G., & Acosta-Gallo, B. (2024). Consequences of Land Use Changes on Native Forest and Agricultural Areas in Central-Southern Chile during the Last Fifty Years. *Land*, *13*(5), 610. https://doi.org/10.3390/land13050610

Decreto Supremo Nº 087-2004-PCM, Pub. L. No. D.S. N° 087-2004-PCM, 6 (2004). https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-reglamento-zonificacion-ecologica-economica-zee

Dembélé, F., Guuroh, R. T., Ansah, P. B., Asare, D.-C. B. M., Da, S. S., Aryee, J. N. A., & Adu-Bredu, S. (2024). Land use land cover change and intensity analysis of land transformation in and around a moist semi-deciduous forest in Ghana. *Trees, Forests and People*, 100507. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100507

Deyner, T. C. (2020). CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE LA TIERRA POR ACTIVIDADES ANTRÓPICAS EN EL DISTRITO DE CHOTA, PERIODO 2003-2019 [Universidad Nacional de Chota]. In *Universidad Nacional de Chota*. https://repositorio.unach.edu.pe/handle/20.500.14142/313

Do, T. A. T., Do, A. N. T., & Tran, H. D. (2022). Quantifying the spatial pattern of urban expansion trends in the period 1987–2022 and identifying areas at risk of flooding due to the impact of urbanization in Lao Cai city. *Ecological Informatics*, *72*(November). https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101912

Duo, A., Wenji, Z., Xinyuan, Q., Ran, J., & Kai, X. (2016). Spatio-temporal variation of vegetation coverage and its response to climate change in North China plain in the last 33 years. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *53*, 103–117. https://doi.org/10.1016/J.JAG.2016.08.008

Eastman, J. R. (2016). *TerrSet Geospatial Monitoring and Modeling System–Manual* (C. University (ed.)).

Eastman, J. R., & He, J. (2020). A Regression-Based Procedure for Markov Transition Probability Estimation in Land Change Modeling. *Land 2020, Vol. 9, Page 407*, *9*(11), 407. https://doi.org/10.3390/LAND9110407

Edosa, B. T., & Nagasa, M. D. (2024). Spatiotemporal assessment of land use land cover change, driving forces, and consequences using geospatial techniques: The case of Naqamte city and hinterland, western Ethiopia. *Environmental Challenges*, *14*(December 2023), 100830. https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100830

El Peruano. (2010). *D.S. N° 13-2010-AG Reglamento para ejecución de levantamiento de suelo*. Presidencia de la República.

https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/marcolegal/normaslegales/decretossupremos/2010/ds13-2010-ag.pdf

Resolución Ministerial Nº 108-2020-MINAM, 2 (2020). www.gob.pe/minam

Ellis, E. C., & Ramankutty, N. (2008). Putting people in the map: Anthropogenic biomes of the world. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *6*(8), 439–447. https://doi.org/10.1890/070062

Entahabu, H. H., Minale, A. S., & Birhane, E. (2023). Modeling and Predicting Land Use/Land Cover Change Using the Land Change Modeler in the Suluh River Basin, Northern Highlands of Ethiopia. *Sustainability (Switzerland)*, *15*(10), 21–25. https://doi.org/10.3390/su15108202

ESRI. (2011). Arc Hydro Tools - Tutorial. In *New York* (Issue January).

ESRI. (2018). *World Imagery (WGS84)*. http://www.arcgis.com/home/item.html?id=898f58f2ee824b3c97bae0698563a4b3

ESRI. (2019). Arc Hydro: Overview of Terrain Preprocessing Workflows. In *esri*. https://community.esri.com/t5/water-resources-documents/arc-hydro-overview-of-terrain-preprocessing/ta-p/920499?attachment-id=21634

Facco, D. S., Benedetti, A. C., Kaiser, E. A., & Pereira, F. W. (2017). Avaliação da dinâmica do uso e cobertura da terra no município de Faxinal do Soturno no estado do Rio Grande do Sul. In *Os Desafíos da Geografía Física na Fronteira do Conhecimento* (pp. 6846–6855). INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNICAMP. https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.1876

Fallas, J. (2003). *CONCEPTOS BÁSICOS DE CARTOGRAFÍA* (L. de T. y S. de I. Geográfica (ed.)).

FAO. (2016). *El Estado de los bosques del mundo 2016. Los bosques y la agricultura: desafíos y oportunidades en relación con el uso de la tierra*.

FAO, F. and A. O. of the U. N. (1996). *Forest resources assessment 1990: Survey of tropical forest cover and study of change processes* (Issue 130). Food & Agriculture Org. https://www.fao.org/4/w0015e/w0015e00.htm

FAO, F. and A. O. of the U. N. (2021). *Land use statistics and indicators Global, regional and country trends 1990-2019*.

Faruque, M. J., Hasan, M. Y., Islam, K. Z., Young, B., Ahmed, M. T., Monir, M. U., Shovon, S. M., Kakon, J. F., & Kundu, P. (2022). Monitoring of land use and land cover changes by using remote sensing and GIS techniques at human-induced mangrove forests areas in Bangladesh. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *25*(February), 100699. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100699

Fattorelli, S., & Fernandez, P. (2011). Diseño Hidrológico. In *Water Assessment &*

Advisory Global Network. http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/download/791/749%0Ahttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Inteligencia+Artificial:+un+enfoque+moderno#0%0Ahttp://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf%0Ahttps://drive.google

Fernández-Maldonado, A. M. (2019). Unboxing the Black Box of Peruvian Planning. *Planning Practice and Research*, *34*(4), 368–386. https://doi.org/10.1080/02697459.2019.1618596

Ferreira, B. M., Soares-Filho, B. S., & Pereira, F. M. Q. (2019). The Dynamic EGO virtual machine. *Science of Computer Programming*, *173*, 3–20. https://doi.org/10.1016/j.scico.2018.02.002

Fleming, M. J., & Doan, J. H. (2013). *HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension User ' s Manual*. *February*. https://doi.org/10.1

Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., … Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, *478*(7369), 337–342. https://doi.org/10.1038/nature10452

Frimpong, B. F., Koranteng, A., Atta-Darkwa, T., Junior, O. F., & Zawiła-Niedźwiecki, T. (2023). Land Cover Changes Utilising Landsat Satellite Imageries for the Kumasi Metropolis and Its Adjoining Municipalities in Ghana (1986–2022). *Sensors*, *23*(5). https://doi.org/10.3390/s23052644

Galton, A. (2019). *Space, Time and the Representation of Geographical Reality* (T. Tambassi (ed.); pp. 75–97). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16829-2_4

Gao, J. (2022). *Fundamentals of Spatial Analysis and Modelling*. CRC Press.

Garay, D., & Agüero, J. (2018). Delimitación hidrográfica y caracterización morfométrica de la cuenca del río Anzulón. In *Integration The Vlsi Journal*.

GARMIN. (2015). *Manual del usuario de Montana 680 GARMIN* (Issue 1, pp. 1–26). https://buy.garmin.com/es-ES/ES/p/523643

Gaur, S., & Singh, R. (2023). A Comprehensive Review on Land Use/Land Cover (LULC) Change Modeling for Urban Development: Current Status and Future Prospects. *Sustainability*, *15*(2), 903. https://doi.org/10.3390/su15020903

Ge, Y., Zhang, X., Atkinson, P. M., Stein, A., & Li, L. (2022). Geoscience-aware deep learning: A new paradigm for remote sensing. *Science of Remote Sensing*, *5*(January), 100047. https://doi.org/10.1016/j.srs.2022.100047

Gharaibeh, A., Shaamala, A., Obeidat, R., & Al-Kofahi, S. (2020). Improving land-use

change modeling by integrating ANN with Cellular Automata-Markov Chain model. *Heliyon*, *6*(9), e05092. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05092

Gilbert, K. M., & Shi, Y. (2024). Urban Growth Monitoring and Prediction Using Remote Sensing Urban Monitoring Indices Approach and Integrating CA-Markov Model: A Case Study of Lagos City, Nigeria. *Sustainability (Switzerland)*, *16*(1). https://doi.org/10.3390/su16010030

Gillins, D. T., Dennis, M. L., & Ng, A. Y. (2022). *Surveying and Geomatics Engineering: Principles, Technologies, and Applications* (Issue 152). American Society of Civil Engineers. https://doi.org/10.1061/9780784416037

Girma, R., Fürst, C., & Moges, A. (2022). Land use land cover change modeling by integrating artificial neural network with cellular Automata-Markov chain model in Gidabo river basin , main Ethiopian rift. *Environmental Challenges*, *6*(November 2021), 100419. https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100419

Gobierno Regional Moquegua. (2018). *Meso zonificación ecológica económica de la región de moquegua*.

Godoy Aquino, L. M. (2019). *Impactos de los cambios de cobertura y uso de la tierra sobre los componentes ambientales en la provincia de San Pablo, entre los años 1996-2016*.

Gomarasca, M. A. (2013). Basic of Geomatics. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53).

Gregory, K. J., & Walling, D. E. (1973). *Drainage Basin Form and Process: A Geomorphological Approach* (E. Arnold (ed.); First). Edward Arnold Ltd. https://books.google.com.pe/books?id=obE1AAAAMAAJ

Guilherme, F., Vicente, J. R., Carretero, M. A., & Farinha-Marques, P. (2024). Mapping multigroup responses to land cover legacy for urban biodiversity conservation. *Biological Conservation*, *291*(November 2023), 110508. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2024.110508

Guo, A., Zhang, Y., & Hao, Q. (2020). Monitoring and Simulation of Dynamic Spatiotemporal Land Use/Cover Changes. *Complexity*, *2020*. https://doi.org/10.1155/2020/3547323

Gutiérrez, O. H. (2014). Comparación de datos SRTM y ASTER GDEM para delimitación de la microcuenca de la quebrada El Zancudal en el Cicfor - Macuya, en Pucallpa [Universidad Nacional de Ucayali]. In *Universidad Nacional de Ucayali*. http://repositorio.unu.edu.pe/handle/UNU/1806

Gutiérrez Tito, E. R. (2013). *Diagnóstico de la Diversidad Biológica de la Región Moquegua*. https://sinia.minam.gob.pe/%0A

Hamed Fahmy, A., Amin Abdelfatah, M., & El-Fiky, G. (2023). Investigating land use

land cover changes and their effects on land surface temperature and urban heat islands in Sharqiyah Governorate, Egypt. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, *26*(2), 293–306. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2023.04.001

Hao, J., Lin, Q., Wu, T., Chen, J., Li, W., Wu, X., Hu, G., & La, Y. (2023). Spatial–Temporal and Driving Factors of Land Use/Cover Change in Mongolia from 1990 to 2021. *Remote Sensing*, *15*(7), 1813. https://doi.org/10.3390/rs15071813

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta). McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V. https://pics.unison.mx/maestria/wp-content/uploads/2020/05/Metodologia_de_la_Investigacion-Sampieri.pdf

Hernández Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). Metodología de la investigación. In *Mc Graw Hill* (Vol. 1, Issue Mexico).

Hokkanen, S. (2024). Soil extractivism: Political ontology of soil erasure in the European Union's agricultural politics. *Journal of Rural Studies*, *108*(May 2023), 103298. https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2024.103298

Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions, American Geophysical Union*, *13*(1), 350. https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350

Horton, R. E. (1945). EROSIONAL DEVELOPMENT OF STREAMS AND THEIR DRAINAGE BASINS; HYDROPHYSICAL APPROACH TO QUANTITATIVE MORPHOLOGY. *GSA Bulletin*, *56*(3), 275–370. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2

Hrdina, A., & Romportl, D. (2024). Global Environmental Systems—A Spatial Framework for Better Understanding the Changing World. *Environments - MDPI*, *11*(2). https://doi.org/10.3390/environments11020033

Huang, B. (2017). *Comprehensive geographic information systems*. Elsevier.

Hurskainen, P., Adhikari, H., Siljander, M., Pellikka, P. K. E., & Hemp, A. (2019). Auxiliary datasets improve accuracy of object-based land use/land cover classification in heterogeneous savanna landscapes. *Remote Sensing of Environment*, *233*, 111354. https://doi.org/10.1016/J.RSE.2019.111354

Hussain, S., Lu, L., Mubeen, M., Nasim, W., Karuppannan, S., Fahad, S., Tariq, A., Mousa, B. G., Mumtaz, F., & Aslam, M. (2022). Spatiotemporal Variation in Land Use Land Cover in the Response to Local Climate Change Using Multispectral Remote Sensing Data. *Land*, *11*(5). https://doi.org/10.3390/land11050595

Ibarcena Balbuena, J. F. (2017). *Moquegua entre vinos y piscos* (U. N. de Moquegua (ed.); Primera).

IGN, I. G. N. (2021). *CATÁLOGO DE METADATOS DE DATOS FUNDAMENTALES*. Catálogo de Metadatos.

https://portalgeo.idep.gob.pe:8443/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/home

INEGI. (2015). Guía para la interpretación de cartografía : uso del suelo y vegetación : escala 1:250,000 : serie V. In *Uso De Suelo Y Vegetación* (Vol. 5). https://www.inegi.org.mx/contenidos/temas/mapas/usosuelo/metadatos/guia_interusosuelov.pdf

INEI, I. N. de E. e I. (2018). *Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas*.

INGEMMET, I. G. M. y M. (2016). *GEOCATMIN: Geología Nacional Millón 1000000, Perú, 2016*. http://catalogo.geoidep.gob.pe:8080/metadata/srv/api/records/0ebbba1d-a562-4d09-9dae-c7845e28102a

INRENA, I. N. de R. N. (2008). *Aprueban metodología de Codificación de Unidades Geográficas de Pfafstetter, Memoria Descriptiva y el Plano de delimitación y Codificación de las Unidades Hidrográficas del Perú*. https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/rm_033-2008-ag_0_0_1.pdf

Resolución Ministerial Nº 135-2013-MINAM, 20 (2013). https://www.minam.gob.pe/disposiciones/resolucion-ministerial-no-135-2013-minam-2/

Jafarpour Ghalehteimouri, K., Shamsoddini, A., Mousavi, M. N., Binti Che Ros, F., & Khedmatzadeh, A. (2022). Predicting spatial and decadal of land use and land cover change using integrated cellular automata Markov chain model based scenarios (2019–2049) Zarriné-Rūd River Basin in Iran. *Environmental Challenges*, *6*(November 2021), 100399. https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100399

Jing, Q., He, J., Li, Y., Yang, X., Peng, Y., Wang, H., Yu, F., Wu, J., Gong, S., Che, H., & Zhang, X. (2024). Analysis of the spatiotemporal changes in global land cover from 2001 to 2020. *Science of the Total Environment*, *908*(August 2023), 168354. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168354

Jordán, R., Riffo, L., & Prado, A. (2017). Desarrollo sostenible, urbanización y desigualdad en América Latina y el Caribe: dinámicas y desafíos para el cambio estructural. In *Cepal* (Issue October). https://www.cepal.org/es/publicaciones/42141-desarrollo-sostenible-urbanizacion-desigualdad-america-latina-caribe-dinamicas

Junk, W. J. (2013). Current state of knowledge regarding South America wetlands and their future under global climate change. *Aquatic Sciences*, *75*(1), 113–131. https://doi.org/10.1007/s00027-012-0253-8

Kafy, A. A., Naim, M. N. H., Subramanyam, G., Faisal, A. Al, Ahmed, N. U., Rakib, A. Al, Kona, M. A., & Sattar, G. S. (2021). Cellular Automata approach in dynamic

modelling of land cover changes using RapidEye images in Dhaka, Bangladesh. *Environmental Challenges*, *4*, 100084. https://doi.org/10.1016/J.ENVC.2021.100084

Kesaulija, F. F., Aipassa, M. I., Sumaryono, M., & Suhardiman, A. (2021). Modeling Land Cover Change Using Markov Chain-Cellular Automata in Sorong, West Papua Province. *Proceedings of the Joint Symposium on Tropical Studies (JSTS-19)*, *11*, 157–162. https://doi.org/10.2991/absr.k.210408.026

Kitchin, R. (2014). *The Data Revolution: Big Data, Open Data, Data Infrastructures & Their Consequences* (p. 285). https://doi.org/10.4135/9781473909472

Kiziridis, D. A., Mastrogianni, A., Pleniou, M., Tsiftsis, S., Xystrakis, F., & Tsiripidis, I. (2023). Improving the predictive performance of CLUE-S by extending demand to land transitions: The trans-CLUE-S model. *Ecological Modelling*, *478*, 110307. https://doi.org/10.1016/J.ECOLMODEL.2023.110307

Koko, A. F., Han, Z., Wu, Y., Abubakar, G. A., & Bello, M. (2022). Spatiotemporal Land Use/Land Cover Mapping and Prediction Based on Hybrid Modeling Approach: A Case Study of Kano Metropolis, Nigeria (2020–2050). *Remote Sensing 2022, Vol. 14, Page 6083*, *14*(23), 6083. https://doi.org/10.3390/RS14236083

Koomen, E., Stillwell, J., Bakema, A., & Scholten, H. J. (2007). Modelling land-use change: Progress and applications. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9). Springer.

Koranteng, A., Poku, I. A., Donkor, E., & Niedźwiecki, T. Z. (2021). Multi-Temporal Study of Land Use Land Cover Changes Int J Environ Sci Nat Res. *Int J Environ Sci Nat Res*, *29*(1). https://doi.org/10.19080/IJESNR.2021.29.556254

Kuon, C. L. E. (1996). *Retazos de la historia de Samegua* (Municipalidad Distrital de Samegua (ed.)). http://www.luiskuoncabello.com/uploads/7/4/5/5/74552227/retazos_de_la_historia_de_samegua_v.1.pdf

Lambert, N., & Zanin, C. (2020). Practical Handbook of Thematic Cartography: Principles, Methods, and Applications. In *CRC Press* (Vol. 1, Issue 1).

Lambin, E. F. (1994). *Modelling Deforestation Processs, A Review*. EUROPEAN COMMISSION. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/c1a558c6-d264-11e6-ad7c-01aa75ed71a1

Lamichhane, S., Devkota, N., Subedi, T. R., & Thapa, A. B. (2024). Impact of land use and land cover change in river flow and hydro-energy generation: The case of Bagmati basin in central Nepal. *Energy Nexus*, *14*(May), 100305. https://doi.org/10.1016/j.nexus.2024.100305

Lencinas, J. D., & Siebert, A. (2009). Relevamiento de bosques con información satelital: Resolución espacial y escala Forest survey based on satellite imagery: spatial

resolution and scale. *Revista de Ciencias Forestales Quebracho*, *17*(2), 101–105.

Leta, M. K., Demissie, T. A., & Tränckner, J. (2021). Modeling and prediction of land use land cover change dynamics based on land change modeler (Lcm) in nashe watershed, upper blue nile basin, Ethiopia. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(7). https://doi.org/10.3390/su13073740

Li, H. (2021). *Geographic Ontology BT - Advances in Cartography and Geographic Information Engineering* (J. Wang & F. Wu (eds.); pp. 479–501). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0614-4_13

Li, L., Yang, J., & Wu, J. (2019). A method of watershed delineation for flat terrain using sentinel-2A imagery and DEM: A case study of the Taihu basin. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *8*(12). https://doi.org/10.3390/ijgi8120528

Liang, S., & Wang, J. (2020). *Advanced Remote Sensing: Terrestrial Information Extraction and Applications* (Shunlin Li). Candice Janco. https://www.elsevier.com/books-and-journals

Linsley, R. K. (1943). Application of the synthetic unit-graph in the western mountain states. *Transactions, American Geophysical Union*, *24*(2), 580–587. https://doi.org/10.1029/TR024i002p00580

Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulus, J. L. H. (1977). Hidrología para ingenieros. In *McGraw-Hill* (Issue 2).

Liu, J. G., & Mason, P. J. (2016). *Image processing and GIS for remote Sensing Techniques and applications* (W. Blackwell (ed.); Secon Edit). WILEY Blackwell.

Liu, W., Wu, J., Xu, F., Mu, D., & Zhang, P. (2024). Modeling the effects of land use/land cover changes on river runoff using SWAT models: A case study of the Danjiang River source area, China. *Environmental Research*, *242*(126), 117810. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117810

Londoño Arango, C. (2001). Cuencas hidrográficas: Bases Conceptuales, Carracterización, planificación, administración. In *Universidad del Tolima* (Vol. 1). www.ut.edu.co/academico/images/archivos/Fac_Forestal/Documentos/LIBROS/cuencas hidrográficas bases conceptuales caracterización planificación y organización - CARLOS LONDOO.pdf

Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic information science and systems*. John Wiley & Sons.

Majeed, M.; Tariq, A. ., Anwar, M.M.; Khan, A.M.; Arshad, F. ., Mumtaz, F.; Farhan, M.; Zhang, L. ., & Zafar, A.; Aziz, M. (2021). Monitoring of Land Use – Land Cover Change and Potential. *Land*, *9*, 2–17.

Mammadova, L., & Negri, S. (2024). Understanding the impacts of overexploitation on the Salento aquifer: A Comprehensive review through well data analysis.

Sustainable Futures, *7*(November 2023), 100188. https://doi.org/10.1016/j.sftr.2024.100188

Mao, M., Wei, L., Gong, W., Wu, G., & Liu, T. (2024). Impacts of Spatio-Temporal Changes in Anthropogenic Disturbances on Landscape Patterns in the Nandu River Basin, China. *Sustainability (Switzerland)* , *16*(7). https://doi.org/10.3390/su16072724

Mapbiomas Perú, M. (2023). *Aspectos destacados del mapeo anual de la cobertura y uso del suelo en Perú de 1985 a 2022*. https://peru.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/14/2024/02/1_ES_FactSheet_Mapbiomas_Peru_2.0-1080x1080px.pdf

Mármol, L. A. (2008). *Introducción al Manejo de Cuencas Hidrográficas y Corrección de Torrentes* (Universidad).

Marquina, J. J., & Mogollón R., A. (2018). Levels and scales of geographic-information surveying in remote sensing. *Revista Geográfica Venezolana*, *59*(1), 42–52.

McHarg. (1969). Ian McHarg, Overlay Maps and the Evaluation of Social and Environmental Costs of Land Use Change. CSISS Classics. *Center for Spatially Integrated Social Science*, 5.

MED, M. de E. (2015). *Descarga de información espacial del MED*. https://sigmed.minedu.gob.pe/descargas/

Mendoza-Ponce, A. V., Corona-Núñez, R. O., Kraxner, F., & Estrada, F. (2020). Spatial prioritization for biodiversity conservation in a megadiverse country. *Anthropocene*, *32*. https://doi.org/10.1016/j.ancene.2020.100267

Mercuri, P., Díaz, R. A., & Fernández, N. (2018). Evaluación de fuentes de datos topográficos para la modelación hidrológica. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*. https://www.researchgate.net/publication/228626429_Evaluacion_de_fuentes_de_datos_topograficos_para_la_modelacion_hidrologica

Meyfroidt, P., & Lambin, E. F. (2011). Global Forest Transition: Prospects for an End to Deforestation. *Annual Review of Environment and Resources*, *36*(Volume 36, 2011), 343–371. https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev-environ-090710-143732

Meyfroidt, P., Rudel, T. K., & Lambin, E. F. (2010). Forest transitions, trade, and the global displacement of land use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *107*(49), 20917–20922. https://doi.org/10.1073/pnas.1014773107

Meza, J. C. (2020). Análisis comparativo de los modelos digitales de elevaciones SRTM y MDE-Ar 2.0 para la identificación de áreas de peligrosidad por inundaciones y anegamientos en un área urbana de llanura. *Geográfica Digital*, *17*(33), 44. https://doi.org/10.30972/geo.17334015

MIDAGRI, & INEI. (2023). Encuesta Nacional Agropecuaria 2022. *2215-552X*, 235.

MINAM, M. del A. (2021). *Informe nacional sobre el estado del ambiente 2014-2019*.

MINAM, M. del A. (2023). *Documento de Resultados del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 2000-2019*. https://infocarbono.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2023/01/Informe-INGEI-2019-VF_2.pdf

Ministerio del Ambiente, M. (2016). *Ordenamiento Territorial en el Perú*. https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/21F28BAF36AFB3F7052580FF00749240/$FILE/1_pdfsam_3.Avances-concretos.pdf

Ministerio del Ambiente, M. (2019). Guía de evaluación del Ecosistema de bofedal. *Ministerio Del Ambiente*, 150. https://sinia.minam.gob.pe/documentos/guia-evaluacion-estado-ecosistema-bofedal

Mohamed, A., & Worku, H. (2020). Simulating urban land use and cover dynamics using cellular automata and Markov chain approach in Addis Ababa and the surrounding. *Urban Climate*, *31*, 100545. https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2019.100545

Molina-Navarro, E., Nielsen, A., & Trolle, D. (2018). A QGIS plugin to tailor SWAT watershed delineations to lake and reservoir waterbodies. *Environmental Modelling & Software*, *108*, 67–71. https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2018.07.003

Monsalve Sáenz, G. (1999). Hidrología en la Ingeniería. In *Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería* (p. 382).

Montero Mora, A., & Viales Hurtado, R. (2015). La teoría del cambio en el paisaje a partir del cambio del uso de la tierra y la cobertura del suelo (Enfoque LUCC). Su utilidad para la historia ambiental. In *Rev.* (Vol. 94, Issue 2). http://www.igbp-es.org/

MTC, M. de T. y C. (2016). *MAPAS TEMATICOS DEL PERU: Mapa Vial del Perú - Shapefile (shp)*. http://mapasplanosperu.blogspot.com/2014/08/mapa-vial-del-peru-shapefile-shp.html

Mungai, L. M., Messina, J. P., Zulu, L. C., & Qi, J. (2022). *Modeling Spatiotemporal Patterns of Land Use / Land Cover Change in Central Malawi Using a Neural Network Model*.

Mylopotamitaki, D., Weiss, M., Fewlass, H., Zavala, E. I., Rougier, H., Sümer, A. P., Hajdinjak, M., Smith, G. M., Ruebens, K., Sinet-Mathiot, V., Pederzani, S., Essel, E., Harking, F. S., Xia, H., Hansen, J., Kirchner, A., Lauer, T., Stahlschmidt, M., Hein, M., … Hublin, J. J. (2024). Homo sapiens reached the higher latitudes of Europe by 45,000 years ago. *Nature*, *626*(7998), 341–346. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06923-7

Näschen, K., Diekkrüger, B., Evers, M., Höllermann, B., Steinbach, S., & Thonfeld, F. (2019). The Impact of Land Use/Land Cover Change (LULCC) on Water Resources in a Tropical Catchment in Tanzania under Different Climate Change Scenarios.

Sustainability (Switzerland), *11*(24). https://doi.org/10.3390/su11247083

Nie, Z. (2024). The suitability assessment for land territorial spatial planning based on ANN-CA model and the Internet of Things. *Heliyon*, *10*(10), e31237. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31237

Ochoa-Tocachi, B., Cuadros-Adriazola, J., Arapa, E., Aste, N., Ochoa-Tocachi, E., & Bonnesoeur, V. (2022). *Guide to Hydrologic Modeling of Natural Infrastructure* (Forest Tre). https://www.forest-trends.org/publications/guide-to-hydrologic-modeling-of-natural-infrastructure/

Ocloo, M. D., Huang, X., Fan, M., & Ou, W. (2024). Study on the spatial changes in land use and landscape patterns and their effects on ecosystem services in Ghana, West Africa. *Environmental Development*, *49*(59), 100947. https://doi.org/10.1016/j.envdev.2023.100947

Ondiek, R. A., Vuolo, F., Kipkemboi, J., Kitaka, N., Lautsch, E., Hein, T., & Schmid, E. (2020). Socio-Economic Determinants of Land Use/Cover Change in Wetlands in East Africa: A Case Study Analysis of the Anyiko Wetland, Kenya. *Frontiers in Environmental Science*, *7*(January). https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00207

ONERN, O. N. de E. de R. N. (1973). Cuencas de los ríos Moquegua, Locumba, Sama y Caplina. In *Autoridad Nacional del Agua*. ONERN.

ONERN, O. N. de E. de R. N. (2009). *GEO GPS PERÚ: Mapa de Capacidad de Uso Mayor de Tierras - ONERN - ONLINE*. https://www.geogpsperu.com/2015/10/mapa-de-capacidad-de-uso-mayor-de.html

ONERN, O. N. de E. de R. N. (2020). *Mapa de Suelos*. Geo GPS PERÚ. https://www.geogpsperu.com/2018/02/mapa-de-suelos-shapefile-memoria.html

ONU-Hábitat. (2016). Reporte Ciudades del Mundo 2016: urbanización y desarrollo. Futuros emergentes. In *Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (ONU-Habitat)*. http://nua.unhabitat.org/uploads/Reportedelasciudades2016.pdf

ONU, O. de las N. U. (2023). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023: Edición especial*. https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf

Resolución Ministerial Nº 026-2010-MINAM, 24 (2010). https://www.minam.gob.pe/disposiciones/resolucion-ministerial-no-026-2010-minam/

Oscar, M., Shoko, C., Dube, T., & Mazvimavi, D. (2024). Remote Sensing Applications : Society and Environment An analysis of the effects of changes in land use and land cover on runoff in the Luvuvhu catchment , South Africa. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *33*(August 2023), 101144. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101144

Padmaja, G., & Giridhar, M. V. S. S. (2022). *Utility of Geomatics in Land Use Land Cover Change Detection and Accuracy Analysis BT - Advanced Modelling and Innovations in Water Resources Engineering* (C. M. Rao, K. C. Patra, D. Jhajharia, & S. Kumari (eds.); pp. 517–527). Springer Singapore.

Papadimitriou, F. (2023). *Geo-topology and Epistemology* (F. Papadimitriou (ed.); pp. 163–171). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48185-7_13

Patru-Stupariu, I., Hossu, C. A., Gradinaru, S. R., Nita, A., Stupariu, M. S., Huzui-Stoiculescu, A., & Gavrilidis, A. A. (2020). A review of changes in mountain land use and ecosystem services: From theory to practice. *Land*, *9*(9), 1–21. https://doi.org/10.3390/LAND9090336

Pei, W., Peng, Y., Fan, K., Zhang, J., Chen, Y., Wang, B., Chen, L., Liu, S., & Li, J. (2024). Heliyon The impact of land use on eco-environment in the Dianchi Basin. *Heliyon*, *10*(11), e32085. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32085

Peng, B., Yang, J., Li, Y., & Zhang, S. (2023). Land-Use Optimization Based on Ecological Security Pattern—A Case Study of Baicheng, Northeast China. *Remote Sensing*, *15*(24), 1–23. https://doi.org/10.3390/rs15245671

Piao, Y., Xiao, Y., Ma, F., Park, S., Lee, D., Mo, Y., Jeong, S., Hwang, I., & Kim, Y. (2023). Monitoring Land Use/Land Cover and Landscape Pattern Changes at a Local Scale: A Case Study of Pyongyang, North Korea. *Remote Sensing*, *15*(6). https://doi.org/10.3390/rs15061592

Decreto Legislativo Nº 1764, 17 (2024). http://www.leyes.congreso.gob.pe/Documentos/DecretosLegislativos/00768.pdf

Poggi, F., Firmino, A., & Amado, M. (2018). Planning renewable energy in rural areas: Impacts on occupation and land use. *Energy*, *155*, 630–640. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.05.009

Pontius, R. G., Shusas, E., & Mceachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *101*, 251–268. https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008

Posada, E., & Salvatierra, H. C. (2017). Análisis comparativo de las metodologías de los sistemas de clasificación de la cobertura de la tierra LCCS y CORINE, para mapeo de coberturas terrestres. *Revista Geográfica 157*, 25. https://revistasipgh.org/index.php/regeo/article/view/215/218

Potapov, P., Hansen, M. C., Pickens, A., Hernández-Serna, A., Tyukavina, A., Turubanova, S., Zalles, V., Li, X., Khan, A., Stolle, F., Harris, N., Song, X.-P., Baggett, A., Kommareddy, I., & Kommareddy, A. (2022). The Global 2000-2020 Land Cover and Land Use Change Dataset Derived From the Landsat Archive: First Results. *Frontiers in Remote Sensing*, *3*. https://doi.org/10.3389/frsen.2022.856903

Pouleurs, D. (2021). El gran libro del agua. In *Xilem Watermark*. https://read.worldreader.org/sw/Book/Details/63841eb9-bcd7-49ff-b421-b886608b8fe3?version=4#:~:text=El gran libro del agua%3A Latinoamérica trata sobre la importancia, muchos fenómenos en la Naturaleza.

Pradhan, B., Al-sharif, A. A. A., & Abdullahi, S. (2017). Urban sprawl assessment. In *Spatial Modeling and Assessment of Urban Form: Analysis of Urban Growth: From Sprawl to Compact Using Geospatial Data*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54217-1_4

Pradhan, B., Yoon, S., & Lee, S. (2024). Examining the Dynamics of Vegetation in South Korea: An Integrated Analysis Using Remote Sensing and In Situ Data. *Remote Sensing*, *16*(2). https://doi.org/10.3390/rs16020300

Puerta Tuesta, R. H. (2023). *Análisis De La Cobertura Boscosa En El Parque Nacional Tingo María - Perú Utilizando Algortimos De Inteligencia Artificial*. Universidad Nacional Federico Villareal.

Pulgar, V. J. (2014). Las ocho regiones naturales del Perú. *Terra Brasilis*, *3*. https://doi.org/10.4000/terrabrasilis.1027

Purwanto, Latifah, S., Yonariza, Akhsani, F., Sofiana, E. I., & Ferdiansah, M. R. (2023). Land cover change assessment using random forest and CA markov from remote sensing images in the protected forest of South Malang, Indonesia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *32*(September), 101061. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101061

Quispetera Chambi, L. G. (2023). *Análisis y modelación de cambios de cobertura de la tierra en la reserva nacional salinas y aguada blanca - Arequipa, Moquegua*. Universidad Nacional de Moquegua.

Rengifo, D. (2022). *Impacto de la expansión urbana sobre tierras productivas y sus repercusiones en la producción agrícola*.

Rentería-Guevara, S. A., Sanhouse-García, A., Bustos-Terrones, Y., Rodríguez-Mata, A. E., & Rangel-Peraza, J. G. (2019). A proposal to integrate the legal definition and official delineation of watersheds in Mexico: Eight model case studies. *Revista Ambiente e Agua*, *14*(2). https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2198

Rienow, A., Kantakumar, L. N., Ghazaryan, G., Dröge-Rothaar, A., Sticksel, S., Trampnau, B., & Thonfeld, F. (2022). Modelling the spatial impact of regional planning and climate change prevention strategies on land consumption in the Rhine-Ruhr Metropolitan Area 2017–2030. *Landscape and Urban Planning*, *217*(March 2021). https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104284

Rimal, B., Zhang, L., Keshtkar, H., Haack, B. N., Rijal, S., & Zhang, P. (2018). Land use/land cover dynamics and modeling of urban land expansion by the integration of cellular automata and markov chain. *ISPRS International Journal of Geo-*

Information, *7*(4), 21. https://doi.org/10.3390/ijgi7040154

Rivarola, R., Malquichagua, M., & Chuquipiondo, A. (2020). *MAPEO Y TIPOLOGÍA DE LA EXPANSIÓN URBANA EN EL PERÚ*.

Rivera, N. M. (2020). Is Mining an Environmental Disamenity? Evidence from Resource Extraction Site Openings. *Environmental and Resource Economics*, *75*(3), 485–528. https://doi.org/10.1007/s10640-019-00397-w

Procedimiento Técnico y Metodológico para la Elaboración del Estudio Especializado de "Análisis de los Cambios de la Cobertura y Uso de la Tierra," Ministerio del Ambiente 46 (2016). https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/RM-N°-081-2016-MINAM.pdf

Rocha, J., Duarte, A., Silva, M., Fabres, S., Vasques, J., Revilla-Romero, B., & Quintela, A. (2020). The importance of high resolution digital elevation models for improved hydrological simulations of a mediterranean forested catchment. *Remote Sensing*, *12*(20), 1–17. https://doi.org/10.3390/rs12203287

Romero Díaz, A., & López Bermúdez, F. (1987). Morfometría de redes fluviales: revisión critica de los parámetros más utilizados y aplicación al alto Guadalquivir. *Papeles de Geografía*, *12*, 47–62. https://revistas.um.es/geografia/article/view/42391/40741

Rukundo, E., Liu, S., Dong, Y., Rutebuka, E., Asamoah, E. F., Xu, J., & Wu, X. (2018). Spatio-temporal dynamics of critical ecosystem services in response to agricultural expansion in Rwanda, East Africa. *Ecological Indicators*, *89*, 696–705. https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2018.02.032

Rystedt, B., Li de Chine -PR of China SE, L. R., Morita Japon -Japan, T., & Auringer Wood Canada -Canada Ferjan Ormeling, A. (2003). *A Strategic Plan for the International Cartographic Association 2003-2011*.

Saavedra, C., Córdova, R., Madrid, E., Zubieta, J., González, J., Paz, S., Alborta, D., & Portugal, R. (2018). *Cuencas sostenibles: Fundamentos y recomendaciones*. www.edaadmin.ch/lapaz

Sabino, E. (2019). *Estimación de las zonas de vida de Holdridge en el Perú*. https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/443/Estimación-Zonas-Vida-Holdrdge-Perú-formato-artículo-científico.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Saha, P., Mitra, R., Chakraborty, K., & Roy, M. (2022). Application of multi layer perceptron neural network Markov Chain model for LULC change detection in the Sub-Himalayan North Bengal. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *26*, 100730. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100730

Sánchez Montoya, R. M. (2022). *Minería, institucionalidad y desarrollo humano en Moquegua*. https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/8565/1/TD169-DELA-Sanchez-Mineria.pdf

Sanders, L. (2007). Models in Spatial Analysis. In *Models in Spatial Analysis*. https://doi.org/10.1002/9780470612255

Sandoval, V., & Real, P. (2005). Modelamiento y prognosis estadística y cartográfica del cambio en el uso de la tierra. *Bosque (Valdivia)*, *26*(1), 55–63. https://doi.org/10.4067/S0717-92002005000100006

Sankarrao, L., Ghose, D. K., & Rathinsamy, M. (2021). Predicting land-use change: Intercomparison of different hybrid machine learning models. *Environmental Modelling and Software*, *145*(September), 105207. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105207

Schulp, C. J. E., Levers, C., Kuemmerle, T., Tieskens, K. F., & Verburg, P. H. (2019). Mapping and modelling past and future land use change in Europe's cultural landscapes. *Land Use Policy*, *80*, 332–344. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.04.030

Schumm, S. A. (1956). EVOLUTION OF DRAINAGE SYSTEMS AND SLOPES IN BADLANDS AT PERTH AMBOY, NEW JERSEY. *GSA Bulletin*, *67*(5), 597–646. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2

Sena, N. C., Veloso, G. V., Fernandes-Filho, E. I., Francelino, M. R., & Schaefer, C. E. G. R. (2020a). Analysis of terrain attributes in different spatial resolutions for digital soil mapping application in southeastern Brazil. *Geoderma Regional*, *21*. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00268

Sena, N. C., Veloso, G. V., Fernandes-Filho, E. I., Francelino, M. R., & Schaefer, C. E. G. R. (2020b). Analysis of terrain attributes in different spatial resolutions for digital soil mapping application in southeastern Brazil. *Geoderma Regional*, *21*, e00268. https://doi.org/10.1016/J.GEODRS.2020.E00268

SENAMHI. (2021). Climas del Perú - Mapa de Clasificación Climática Nacional. In *Ministerio del Ambiente*. https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru

Seto, K. C., Güneralp, B., & Hutyra, L. R. (2012). Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *109*(40), 16083–16088. https://doi.org/10.1073/pnas.1211658109

Shahfahad, Naikoo, M. W., Towfiqul Islam, A. R. M., Mallick, J., & Rahman, A. (2022). Land use/land cover change and its impact on surface urban heat island and urban thermal comfort in a metropolitan city. *Urban Climate*, *41*(November 2021), 101052. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.101052

Shao, Z., Wu, W., & Li, D. (2021). Spatio-temporal-spectral observation model for urban remote sensing. *Geo-Spatial Information Science*, *24*(3), 372–386. https://doi.org/10.1080/10095020.2020.1864232

Shi, K., Liu, G., Zhou, L., Cui, Y., Liu, S., & Wu, Y. (2023). Satellite remote sensing data

reveal increased slope climbing of urban land expansion worldwide. *Landscape and Urban Planning*, *235*(October 2022), 104755. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104755

Shi, L., Fang, J., & Zhao, Y. (2023). Automatic shadow detection in high-resolution multispectral remote sensing images. *Computers and Electrical Engineering*, *105*(December 2022), 108557. https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108557

Shi, L., & Zhao, Y. feng. (2023). Urban feature shadow extraction based on high-resolution satellite remote sensing images. *Alexandria Engineering Journal*, *77*, 443–460. https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.06.046

Shit, P. K., Bera, B., Islam, A., Ghosh, S., & Bhunia, G. S. (2022). *Drainage Basin Dynamics: An Introduction to Morphology, Landscape and Modelling*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79634-1_22

Silva, J. R. I., Montenegro, A. A. de A., Farias, C. W. L. de A., Jardim, A. M. da R. F., Silva, T. G. F. da, & Montenegro, S. M. G. L. (2022). Morphometric characterization and land use of the Pajeú river basin in the Brazilian semi-arid region. *Journal of South American Earth Sciences*, *118*, 103939. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103939

Silvennoinen, H., Chadzynski, A., Farazi, F., Grišiūtė, A., Shi, Z., von Richthofen, A., Cairns, S., Kraft, M., Raubal, M., & Herthogs, P. (2023). A semantic web approach to land use regulations in urban planning: The OntoZoning ontology of zones, land uses and programmes for Singapore. *Journal of Urban Management*, *12*(2), 151–167. https://doi.org/10.1016/j.jum.2023.02.002

Simancas, K. C. Y. (2003). *Reacondicionamiento bioclimático de viviendas de segunda residencia en clima mediterráneo*. 49–83. https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93425

Singh, V. P., & Fiorentino, M. (1996). Geographical Information Systems in Hydrology. In V. P. Singh & M. Fiorentino (Eds.), *Water Science and Technology Library* (Vol. 26, Issue map C). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8745-7

Sisay, G., Gesesse, B., Fürst, C., Kassie, M., & Kebede, B. (2023). Modeling of land use/land cover dynamics using artificial neural network and cellular automata Markov chain algorithms in Goang watershed, Ethiopia. *Heliyon*, *9*(9), e20088. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20088

Soille, P., & Ansoult, M. (1990). Automated basin delineation from digital elevation models using mathematical morphology. *Signal Processing*, *20*, 171–182.

Soza, D. A., & Falaschi, D. (2020). Validación de modelos de elevación digital en los Andes centrales de Chile. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, *56*, 22–40.

Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, *63*, 1117–1142.

https://api.semanticscholar.org/CorpusID:129100782

Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions American Geophysical Union*, *38*(6), 913–920. https://pdfs.semanticscholar.org/3ca6/892addbb48f2858886f6380a194671410386.pdf

Strahler, A. N. (1964). *Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks*. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:129764714

SUBDERE. (2013). Guía análisis y zonificación de cuencas hidrográficas para el ordenamiento territorial. In *Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo*. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/36817/S2014205_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Svoray, T. (2022). *Spatial Decision Support Systems* (T. Svoray (ed.); pp. 305–333). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91536-0_8

Tambassi, T. (2019). The Philosophy of GIS. In T. Tambassi (Ed.), *Springer Geography*. Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16829-2_2

Témez Peláez, J. R. (1992). Generalización y mejora del método racional. Versión de la Dirección General de Carreteras de España. *Revista Digital Del Cedex*. http://193.145.71.12/index.php/ingenieria-civil/article/view/833/807

Terfa, B. K., Chen, N., Liu, D., Zhang, X., & Niyogi, D. (2019). Urban Expansion in Ethiopia from 1987 to 2017: Characteristics, Spatial Patterns, and Driving Forces. *Sustainability 2019, Vol. 11, Page 2973*, *11*(10), 2973. https://doi.org/10.3390/SU11102973

Tiné, M. de O., Perez, L., Molowny-Horas, R., Tiné, M. de O., Pérez, L., & Molowny-Horas, R. (2020). Modelagem das mudanças espaço-temporais de áreas úmidas: estudo de caso da Região Administrativa de Abitibi-Témiscamingue, Québec, Canadá. *Revista Cartográfica*, *101*, 119–134. https://doi.org/10.35424/RCARTO.I101.672

Tønnesen, A., Guillen-Royo, M., & Cottis Hoff, S. (2023). The integration of nature conservation in land-use management practices in rural municipalities: A case study of four rural municipalities in Norway. *Journal of Rural Studies*, *101*(October 2022). https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2023.103066

Trevisan, D. P., Ruggiero, M. H., Bispo, P. da C., Almeida, D., Imani, M., Balzter, H., & Moschini, L. E. (2021). Evaluation of Environmental Naturalness: A Case Study in the Tietê-Jacaré Hydrographic Basin, São Paulo, Brazil. *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 3021*, *13*(6), 3021. https://doi.org/10.3390/SU13063021

Trujillo, A. R., Barroso, F. U., & Escobar, Y. C. (2010). *Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas* (1st ed.). Universidad del Valle. http://www.jstor.org/stable/j.ctt1rfsqf5

Turner II, B. L., Skole, D., Sanderson, S., Fischer, G., Fresco, L., & Leemans, R. (1995). Land-Use and Land-Cover Change Science / Research Plan. In *IGBP & HDP* (Vols. 35 & 7, p. 70). https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.6.1069

UN-Habitat. (2022). Envisaging the Future of Cities. In *World City Report*.

US Army Corps of Engineers. (2021). *Hydrologic Engineering Center Software*. Hydrologic Engineering Center Software. https://www.hec.usace.army.mil/software/default.aspx

Useche, M. C., Artigas, W., Queipo, B., & Perozo, É. (2019). *Técnicas e Instrumentos de recolección de datos cuali-cuantitativos* (U. de La Guajira (ed.)).

Valentina, S. M., & Matar, de S. M. A. (2016). *Nociones sobre teledetección*. Universidad Nacional de San Juan. http://www.unsj.edu.ar/unsjVirtual/cartografiaaplicadaminas/wp-content/uploads/2016/10/Apuntes-de-cátedra-para-Cartografía-Aplicada.pdf

Veldkamp, A., & Fresco, L. O. (1996). CLUE: a conceptual model to study the Conversion of Land Use and its Effects. *Ecological Modelling*, *85*(2–3), 253–270. https://doi.org/10.1016/0304-3800(94)00151-0

Verburg, P. H. (2010). The CLUE model. *Institute for Environmental Studies*, *January*, 53. http://environmentalgeography.nl/files/data/public/cluemanual

Villela, S. M., & Mattos, A. (1975). *Hidrología aplicada* (McGraw-Hill do Brasil (ed.)). https://ecivilufes.files.wordpress.com/2011/04/villela-s-m-matos-a-hidrologia-aplicada-caps-1-2-e-3.pdf

Villón, B. M. (2002). *Cálculos hidrológicos e hidráulicos en Cuencas Hidrográficas* (Primera). CATIE. https://www.academia.edu/16705366/Calculos_hidrologicos_e_hidraulicos_Maximo_Villon

Vinayak, B., Lee, H. S., & Gedem, S. (2021). Prediction of land use and land cover changes in Mumbai city, India, using remote sensing data and a multilayer perceptron neural network-based Markov Chain model. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(2), 1–22. https://doi.org/10.3390/su13020471

Wang, H., Liu, X., Zhao, C., Chang, Y., Liu, Y., & Zang, F. (2021). Spatial-temporal pattern analysis of landscape ecological risk assessment based on land use/land cover change in Baishuijiang National nature reserve in Gansu Province, China. *Ecological Indicators*, *124*. https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2021.107454

Wang, S. W., Munkhnasan, L., & Lee, W. K. (2021). Land use and land cover change detection and prediction in Bhutan's high altitude city of Thimphu, using cellular automata and Markov chain. *Environmental Challenges*, *2*(December 2020). https://doi.org/10.1016/j.envc.2020.100017

Watson, C. S., Elliott, J. R., Amey, R. M. J., & Abdrakhmatov, K. E. (2022). Analyzing Satellite-Derived 3D Building Inventories and Quantifying Urban Growth towards Active Faults : A Case Study of Bishkek , Kyrgyzstan. *Remote Sensing*, *14*(5790), 22.

Winkler, K., Fuchs, R., Rounsevell, M., & Herold, M. (2021). Global land use changes are four times greater than previously estimated. *Nature Communications*, *12*(1), 1–10. https://doi.org/10.1038/s41467-021-22702-2

Woldesenbet, T. A., Elagib, N. A., Ribbe, L., & Heinrich, J. (2018). Catchment response to climate and land use changes in the Upper Blue Nile sub-basins, Ethiopia. *Science of The Total Environment*, *644*, 193–206. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.06.198

Xu, L., Liu, X., Tong, D., Liu, Z., Yin, L., & Zheng, W. (2022). Forecasting Urban Land Use Change Based on Cellular Automata and the PLUS Model. *Land 2022, Vol. 11, Page 652*, *11*(5), 652. https://doi.org/10.3390/LAND11050652

Xu, X., & Min, X. (2013). Quantifying spatiotemporal patterns of urban expansion in China using remote sensing data. *Cities*, *35*, 104–113. https://doi.org/10.1016/j.cities.2013.05.002

Decreto del Consejo Directivo Nº 010-2006-CONAM-CD, 29 (2006). https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-directiva-metodologia-zonificacion-ecologica-economica

Yanbo, Q., Shilei, W., Yaya, T., Guanghui, J., Tao, Z., & Liang, M. (2023). Territorial spatial planning for regional high-quality development – An analytical framework for the identification, mediation and transmission of potential land utilization conflicts in the Yellow River Delta. *Land Use Policy*, *125*(November 2022), 106462. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106462

Yue, W., Zhou, Q., Li, M., & van Vliet, J. (2023). Relocating built-up land for biodiversity conservation in an uncertain future. *Journal of Environmental Management*, *345*(April), 118706. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118706

Zăvoianu, I. (1985). *Morphometry of Drainage Basins*. 251. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:127403857

Zhang, H., Cheng, X., Jin, L., Zhao, D., Feng, T., & Zheng, K. (2020). A method for dynamical sub-watershed delimitating by no-fill digital elevation model and defined precipitation: A case study of Wuhan, China. *Water (Switzerland)*, *12*(2). https://doi.org/10.3390/w12020486

Zhang, X., Zhou, J., & Song, W. (2020). Simulating Urban Sprawl in China Based on the Artificial Neural Network-Cellular Automata-Markov Model. *Sustainability 2020, Vol. 12, Page 4341*, *12*(11), 4341. https://doi.org/10.3390/SU12114341

Zhao, Y., Cui, B., & Murayama, Y. (2014). Neighborhood Interaction in Urban Land-

Use Changes Using Cellular Automata-Based Geo-Simulation. In *Progress in Geospatial Analysis*. https://doi.org/10.1007/978-4-431-54000-7_15

Zheng, Y., He, Y., Zhou, Q., & Wang, H. (2022). Quantitative Evaluation of Urban Expansion using NPP-VIIRS Nighttime Light and Landsat Spectral Data. *Sustainable Cities and Society*, *76*(1799), 103338. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103338