

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

**“INFLUENCIA DEL CRECIMIENTO POBLACIONAL, EN UN
ÍNDICE DE CALIDAD AMBIENTAL (ICA) URBANO DE LA
CIUDAD DE TACNA, A PARTIR DE IMÁGENES
SATELITALES”**

PARA OPTAR:

TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

Bach. RUFO BAYLON TARQUI MONTALICO
Bach. DIEGO EDUARDO FLORES CALDERÓN

TACNA – PERÚ

2022

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS

**“INFLUENCIA DEL CRECIMIENTO POBLACIONAL, EN UN
ÍNDICE DE CALIDAD AMBIENTAL (ICA) URBANO DE LA
CIUDAD DE TACNA, A PARTIR DE IMÁGENES
SATELITALES”**

Tesis sustentada y aprobada el 06 de julio del 2022; estando el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE : Mtra. MILAGROS HERRERA REJAS

SECRETARIO : Dr. WILLIAMS SERGIO ALMANZA QUISPE

VOCAL : Dr. GERMAN MAMANI AGUILAR

ASESOR : Ing. CARMEN ROSA ROMÁN ARCE

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Nosotros, Rufo Baylon Tarqui Montalico identificado con documento de identidad 47050162 y Diego Eduardo Flores Calderón identificado con documento de identidad 73880923, en calidad de: Bachilleres en Ingeniería Ambiental de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental.

Declaramos bajo juramento:

Somos autores de la tesis titulada: "Influencia del crecimiento poblacional, en un índice de calidad ambiental (ICA) urbano de la ciudad de Tacna, a partir de imágenes satelitales" la cual presentamos para optar el Título Profesional de Ingeniería Ambiental.

1. La tesis no ha sido plagiada ni total ni parcialmente, para lo cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas.
2. La tesis presentada no atenta contra derechos de terceros.
3. La tesis no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido falsificados, ni duplicados, ni copiados.

Por lo expuesto, mediante la presente asumimos frente a la universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad presentada. En consecuencia, nos hacemos responsable frente a la universidad y a terceros, de cualquier daño que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo declarado o que pudiera encontrar como causa del trabajo presentado, asumiendo todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse de ello a favor de terceros con motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontrasen causa en el contenido de la tesis, libro y/o invento.


De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumimos las consecuencias y sanciones que de nuestras acciones se deriven, sometiéndome a la normatividad vigente de la Universidad Privada de Tacna.

Tacna, 30 de marzo del 2022



Bach. Diego Eduardo Flores Calderón

DNI: 73880923



Bach. Rufo Baylon Tarqui Montalico

DNI: 47050162

DEDICATORIA

Dedico de manera especial a mis padres, que han sido los pilares de mi formación como persona, juntos me han inculcado valores indispensables para la vida, gracias a su confianza, apoyo, comprensión, a sus consejos, he logrado culminar una meta más en mi vida.

A mi querido hermano por ser fuente de inspiración y apoyo incondicional en el logro de mis objetivos.

Bach. Rufo Baylon Tarqui Montalico

DEDICATORIA

Dedico de todo corazón a mi querida madre y abuelitos, no existen palabras para expresar la infinita gratitud que siento hacia ustedes, les dedico esto como una pequeña muestra de agradecimiento, por su eterno apoyo incondicional en todas las actividades que he realizado en cada etapa de mi vida hasta ahora, y por sus constantes consejos y enseñanzas para hacer de mi la persona que hoy soy.

A toda mi familia por confiar en mí, a mis hermanos, a mis tíos, gracias por ser parte de mi vida y por permitirme ser parte de su orgullo.

Bach. Diego Eduardo Flores Calderón

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirnos llegar a este momento tan especial en nuestras vidas.

A la Universidad Privada de Tacna, a la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, a mis docentes que me brindaron el aprendizaje necesario para mi desempeño profesional.

Un agradecimiento especial a nuestra asesora de tesis la Ing. Carmen Román Arce, por su valioso apoyo desinteresado, para así poder culminar la presente tesis.

A todas las personas que la vida nos dio la gratitud de conocer, a nuestros amigos que de una y otra forma supieron fortalecer nuestros conocimientos y forjar nuestro camino.

Bach. Rufo Baylon Tarqui Montalico

Bach. Diego Eduardo Flores Calderón

ÍNDICE GENERAL

PÁGINA DE JURADO	ii
DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD	iii
DEDICATORIA.....	iv
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.1. Descripción del problema	2
1.2. Formulación del problema	2
1.2.1. Problema general	2
1.2.2. Problemas específicos	3
1.3. Justificación e importancia.....	3
1.4. Objetivos	4
1.4.1. Objetivo General	4
1.4.2. Objetivos Específicos	4
1.5. Hipótesis	4
1.5.1. Hipótesis general.....	4
1.5.2. Hipótesis específicas.....	4
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	5
2.1. Antecedentes del estudio.....	5
2.2. Bases Teóricas	6
2.2.1. Calidad ambiental.....	6
2.2.2. Indicadores de calidad ambiental.....	7
2.2.3. Índice de kappa	9
2.2.4. Matriz de confusión	10
2.2.5. Clasificación de imágenes satelitales	11
2.2.6. Imágenes satelitales.....	11
2.2.7. Imágenes Satelitales Landsat	13
2.3. Definición de términos	13
2.3.1. Calidad ambiental.....	13
2.3.2. Crecimiento poblacional	14
2.3.3. Teledetección	14
2.3.4. Modelamiento Geoespacial.....	14
2.3.5. Índice de Calidad Ambiental (ICA)	14
2.3.6. Índice de Áreas Construidas de Diferencia Normalizada (NDBI)	14
2.3.7. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	15
2.3.8. Índices de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI).....	15
2.3.9. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)	15

2.3.10. Imágenes satelitales.....	16
2.3.11. Indicadores de calidad ambiental.....	16
2.3.12. Sistemas de información geográfica (SIG)	17
2.3.13. Temperatura de superficie	17
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO.....	19
3.1. Tipo y diseño de la investigación.....	19
3.2. Población y/o muestra de estudio.....	19
3.3. Operacionalización de variables.....	20
3.4. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos.....	21
3.4.1. Técnicas de recolección de datos.....	21
3.4.2. Instrumentos para la recolección de datos	22
3.5. Procesamiento y análisis de datos	22
3.5.1. Imágenes Satelitales	22
3.5.2. Datos meteorológicos y climatológicos	24
3.5.3. Población.....	27
3.5.4. Preprocesamiento de la Imagen Satelital	28
3.5.5. Índice de Áreas Construidas de Diferencia Normalizada (NDBI).	31
3.5.6. Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI)	31
3.5.7. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI).....	32
3.5.8. Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI).....	32
3.5.9. Índice de Área construida (BU)	33
3.5.10. Validación de puntos.....	33
CAPITULO IV: RESULTADOS	43
4.1. Índice de Áreas Construidas de Diferencia Normalizada (NDBI).....	43
4.2. Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI).....	47
4.3. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI).....	51
4.4. Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI).....	55
4.5. Crecimiento Poblacional y los Índices de Calidad Ambiental.....	59
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN.....	66
5.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	66
5.2. Contrastación de resultados con otros estudios similares	70
CONCLUSIONES	72
RECOMENDACIONES	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
ANEXO.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valoración Índice de Kappa	10
Tabla 2. Métodos de Clasificación en Teledetección	11
Tabla 3. Periodo de Actividad de Satélite Landsat	13
Tabla 4. Operacionalización de Variables	20
Tabla 5. Descarga de Imágenes Satelitales	22
Tabla 6. Datos de Humedad Relativa (%)	24
Tabla 7. Datos Temperatura Máxima Mensual (°C)	25
Tabla 8. Datos Temperatura Mínima Mensual (°C)	26
Tabla 9. Dato poblacional de los Distritos de la Zona Urbana de la Región de Tacna	28
Tabla 10. Coordenadas tomadas en el área de estudio	37
Tabla 11. Clasificación de Kappa	42
Tabla 12. Resultado del Índice de Áreas Construidas de Diferencia Normalizada (NDBI) ..	43
Tabla 13. Resultado del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI)	47
Tabla 14. Resultado del Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)	51
Tabla 15. Resultado del Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI)	55
Tabla 16. Resultado del Índice de Área Construida (BU)	59
Tabla 17. Resultado de la clasificación supervisada entre los años 2000-2019	63
Tabla 18. Correlación de Pearson entre NDBI y Crecimiento Urbano Periodo Húmedo	66
Tabla 19. Correlación de Pearson entre NDBI y Crecimiento Urbano Periodo Seco	66
Tabla 20. Correlación de Pearson entre NDVI y Crecimiento Urbano Periodo Húmedo	67
Tabla 21. Correlación de Pearson entre NDVI y Crecimiento Urbano Periodo Seco	67
Tabla 22. Correlación de Pearson entre SAVI y Crecimiento Urbano Periodo Húmedo	68
Tabla 23. Correlación de Pearson entre SAVI y Crecimiento Urbano Periodo Seco	69
Tabla 24. Correlación de Pearson entre NDWI y Crecimiento Urbano Periodo Húmedo	69
Tabla 25. Correlación de Pearson entre NDWI y Crecimiento Urbano Periodo Seco	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Ubicación de la zona de estudio.....	19
Figura 2. Fases de la metodología de trabajo	21
Figura 3. Promedio de Humedad Relativa (%)	24
Figura 4. Temperatura Máxima (°C)	25
Figura 5. Temperatura Mínima (°C)	26
Figura 6. Data poblacional de los Distritos de la Zona Urbana de la Región de Tacna	27
Figura 7. Corrección del Bandeado de la Imagen Satelital Landsat 7	29
Figura 8. Imagen Satelital Landsat 7 con Radiancia y Reflectancia	30
Figura 9. Ubicación de Puntos Aleatorios Año 2000	34
Figura 10. Ubicación de Puntos Aleatorios Año 2019	34
Figura 11. Clasificación supervisada del año 2000	35
Figura 12. Clasificación supervisada del año 2019	35
Figura 13. Validación de la Clasificación Supervisada	36
Figura 14. Validación en Campo de la Clasificación de Cobertura Vegetal	38
Figura 15. Validación en Campo de la Clasificación de Cuerpos de Agua	39
Figura 16. Validación en Campo de la Clasificación de Zona Urbana	40
Figura 17. Validación en Campo de la Clasificación de Zona Desértica	41
Figura 18. Porcentaje de Crecimiento del Índice NDBI en el Periodo Húmedo	44
Figura 19. Porcentaje de Crecimiento del Índice NDBI en el Periodo Seco.....	44
Figura 20. Resultado Multitemporal del índice NDBI en el Periodo Húmedo.....	45
Figura 21. Resultado Multitemporal del índice NDBI en el Periodo Seco	46
Figura 22. Porcentaje de Crecimiento del Índice NDVI en el Periodo Húmedo	48
Figura 23. Porcentaje de Crecimiento del Índice NDVI en el Periodo Seco.....	48
Figura 24. Resultado Multitemporal del índice NDVI en el Periodo Húmedo.....	49
Figura 25. Resultado Multitemporal del índice NDVI en el Periodo Seco	50
Figura 26. Porcentaje de Crecimiento del Índice SAVI en el Periodo Húmedo.....	52
Figura 27. Porcentaje de Crecimiento del Índice SAVI en el Periodo Seco	52
Figura 28. Resultado Multitemporal del índice SAVI en el Periodo Húmedo	53
Figura 29. Resultado Multitemporal del índice SAVI en el Periodo Seco.....	54
Figura 30. Porcentaje de Crecimiento del Índice NDWI en el Periodo Húmedo	56
Figura 31. Porcentaje de Crecimiento del Índice NDWI en el Periodo Seco.....	56
Figura 32. Resultado Multitemporal del índice NDWI en el Periodo Húmedo.....	57
Figura 33. Resultado Multitemporal del índice NDWI en el Periodo Seco	58
Figura 34. Porcentaje de Crecimiento del Índice BU en el Periodo Húmedo.....	60
Figura 35. Porcentaje de crecimiento del índice BU en Periodo Seco.....	60
Figura 36. Resultado Multitemporal del índice BU en el Periodo Húmedo	61
Figura 37. Resultado Multitemporal del índice BU en el Periodo Seco.....	62

RESUMEN

La presente investigación titulada “Influencia del crecimiento poblacional, en un índice de calidad ambiental (ICA) urbano de la ciudad de Tacna, a partir de imágenes satelitales” en un periodo de 19 años, entre los años 2000 y 2019. Cuyo objetivo principal fue determinar la relación que existe entre el crecimiento poblacional y su influencia en el índice de calidad ambiental en la zona urbana de la ciudad de Tacna en el año 2021. Los tipos de cobertura fueron: zona urbana, cobertura vegetal, zona desértica y cuerpos de agua. Utilizando técnicas de teledetección a través de un software especializado en información geográfica, ArcGis, los cuales nos permiten obtener la relación que existe entre el crecimiento poblacional y su influencia en el índice de calidad ambiental en la zona urbana de Tacna. La metodología se enfocó en determinar la influencia del crecimiento poblacional en un índice de calidad ambiental urbano; para lo cual se emplearon imágenes satelitales landsat 7. Se aplicaron los métodos de análisis multitemporal, método de vectorización visual de la superficie urbana y la clasificación supervisada de máxima verosimilitud. La validación se realizó mediante una visita de campo para verificar los tipos de coberturas y su comprobación en las imágenes landsat 7, el cual demostró tener una adecuada separación espectral para cada una de las coberturas. Al final de esta investigación. Lo más determinante fue desarrollar el procesamiento de las imágenes satelitales con las cuales se obtuvo 5 índices ambientales NDBI, NDVI, SAVI, NDWI y BU para el área urbana de Tacna, esto permitió conocer diferentes aspectos como la zona urbana, cobertura vegetal, cuerpos de agua y zona desértica, con la cual se ha logrado representar en el espacio geográfico multitemporalmente con áreas en Km². Finalmente concluimos que, si existe una alta correlación de los índices de calidad ambiental con respecto al crecimiento urbano, a excepción del NDWI, que haciendo la correlación de Pearson nos indica que no presenta una correlación.

Palabras claves: Imágenes Satelitales, Análisis Multitemporal, Índice de Calidad Ambiental, ArcGis.

ABSTRACT

The present investigation entitled "Influence of population growth, in an urban environmental quality index (ICA) of the city of Tacna, from satellite images" in a period of 19 years, between the years 2000 and 2019. Whose main objective was determining the relationship between population growth and its influence on the environmental quality index in the urban area of the city of Tacna in the year 2021. The types of coverage were: urban area, vegetation cover, desert area and bodies of water. Using remote sensing techniques through specialized geographic information software, ArcGis, which allow us to obtain the relationship between population growth and its influence on the environmental quality index in the urban area of Tacna. The methodology focused on determining the influence of population growth on an urban environmental quality index; for which landsat 7 satellite images were used. The multi-temporal analysis methods, visual vectorization method of the urban surface and the supervised classification of maximum likelihood were applied. The validation was carried out through a field visit to verify the types of coverage and its verification in the Landsat 7 images, which showed adequate spectral separation for each of the coverages. At the end of this investigation, the most decisive thing was to develop the processing of satellite images with which 5 environmental indices NDBI, NDVI, SAVI, NDWI and BU were obtained for the urban area of Tacna, this allowed knowing different aspects such as the urban area, vegetation cover, bodies of water and desert area, with which it has been possible to represent multi-temporally in the geographical space with areas in Km². Finally, we conclude that, if there is a high correlation of the environmental quality indices with respect to urban growth, with the exception of the NDWI, which by doing the Pearson correlation indicates that there is no correlation.

Key words: satellite imagery, multitemporal analysis, environmental quality index, ArcGIS.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación “Influencia del crecimiento poblacional, en un Índice de Calidad Ambiental (ICA) urbano de la ciudad de Tacna, a partir de imágenes satelitales”, aborda el problema en relación a que, debido al crecimiento poblacional, ha provocado que los centros urbanos crezcan de manera acelerada y con poca planificación. Un índice de calidad ambiental es una variable o suma de variables que brinda información sobre un fenómeno ambiental complejo que permite conocer, evaluar el estado y variación de la calidad ambiental. En la actualidad los Sistemas de Información Geográfica (SIG), son herramientas, tecnologías o sistemas que sirven de apoyo en la toma de decisiones en diferentes escenarios de la sociedad, permiten estructurar y visualizar la información espacial dentro de un espacio geográfico, como características topográficas, uso del suelo entre otras, y es posible ubicarla y visualizarla de una manera fácil y rápida, la observación remota de superficies, análisis de patrones, entre otros, con ventajas en relación a costos, insumos y menor tiempo de preparación de los mismos.

Bajo esta perspectiva, el presente estudio tiene por objetivos: Determinar la relación que existe entre el crecimiento poblacional y su influencia en el índice de calidad ambiental en la zona urbana de la ciudad de Tacna en el año 2021, Determinar la zona urbana en la ciudad de Tacna haciendo uso del Índice de Áreas Construidas de Diferencia Normalizada (NDBI), Establecer la relación que existe entre el crecimiento poblacional y el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI), Explicar la relación que existe entre el crecimiento poblacional y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) y Establecer la relación que existe entre el crecimiento poblacional y el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI).

El presente trabajo de investigación consta de cinco capítulos: El primer capítulo abarca el planteamiento del problema, objetivos e hipótesis, descripción del problema y la importancia de la investigación. El segundo capítulo aborda el marco teórico, seguido de las bases teóricas y la definición de conceptos básicos. El tercer capítulo describe el marco metodológico, se establece el tipo y diseño de la investigación, la población, procesamiento y análisis de datos. El cuarto capítulo presenta los resultados en base a la metodología y/o técnica utilizada para el desarrollo de la investigación. En el quinto capítulo se realiza el análisis de las hipótesis con los resultados.

CAPÍTULO I: PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción del problema

Según Álvarez & Padilla (2014), nos dicen que la pérdida de calidad ambiental urbana se ha convertido en uno de los problemas más apremiantes de las ciudades del siglo XXI. Actualmente se busca reducir los efectos de este proceso de degradación y entender el comportamiento de los factores causales, tales como la contaminación atmosférica, generación y propagación del ruido, pérdida de vegetación, entre otros, mediante técnicas de teledetección y sensores in situ, que permitan identificar su distribución geográfica y proveer conocimiento para la generación de estrategias de gestión ambiental para las zonas afectadas.

Según Carrillo & Choquehuanca (2019), el crecimiento de las ciudades es un tema de gran importancia, en la medida como afecta el desarrollo de las mismas, por tal motivo una evaluación de su desarrollo debe hacerse tanto espacial como temporalmente, y una acertada planificación, permite organizar la expansión urbana, minimizando los efectos sobre el medio ambiente. En países como el Perú, en los últimos 40 años, se ha observado que la dinámica urbana se caracteriza por un debilitamiento de los criterios de planeamiento urbano y económico de las ciudades, y el proceso de construcción de la ciudad resulta como una suma de intereses privados y decisiones públicas que son las que moldean la forma física de una ciudad.

A nivel local cabe resaltar que no existen trabajos de investigación sobre este tema, la falta de vegetación en nuestra zona de estudio radica por el mal uso de suelo, construcciones inadecuadas, la expansión de la zona urbana (invasiones), mala gestión de las autoridades en el tema de medio ambiente, es por ello que el presente trabajo de investigación servirá de apoyo para otras investigaciones.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Qué relación existe entre el crecimiento poblacional y su influencia en el índice de calidad ambiental en la zona urbana de la ciudad de Tacna en el año 2021?

1.2.2. Problemas específicos

- a. ¿Cómo determinar la zona urbana en la ciudad de Tacna utilizando el Índice de Áreas Construidas de Diferencia Normalizada (NDBI)?
- b. ¿Cuál es la relación que existe entre el crecimiento poblacional y el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI)?
- c. ¿Cuál es la relación que existe entre el crecimiento poblacional y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)?
- d. ¿Cuál es la relación que existe entre el crecimiento poblacional y el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI)?

1.3. Justificación e importancia

En la ciudad de Tacna el crecimiento poblacional acelerado ha generado un ordenamiento territorial desordenado, a su vez carece de un índice de calidad ambiental; el beneficio de la presente investigación es poder identificar el crecimiento poblacional a través de los índices de calidad ambiental, para poder ser utilizado por las entidades encargadas de la gestión ambiental de la ciudad y que sirva como línea base para programas de monitoreo a largo plazo que permitan elaborar políticas de gestión más adecuadas y lograr el desarrollo urbano sostenible e identificar los cambios de zonas urbanas.

Sin embargo, los índices de calidad ambiental en muchas ciudades pequeñas e intermedias de América Latina y otras partes del mundo no cuentan con información sobre el comportamiento espacio-temporal de los factores que inciden en la calidad ambiental que permita implementar programas de gestión ambiental (Santana et al, 2010).

La importancia de la presente investigación es realizar un estudio en este ámbito que nos permita conocer los índices de calidad ambiental urbano y que con el uso de las herramientas cartográficas avanzadas constituyen un aporte para la planificación y ordenamiento territorial eficiente y la evaluación de riesgos de una ciudad.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Determinar la relación que existe entre el crecimiento poblacional y su influencia en el índice de calidad ambiental en la zona urbana de la ciudad de Tacna en el año 2021.

1.4.2. Objetivos Específicos

- a. Determinar la zona urbana en la ciudad de Tacna haciendo uso del índice de áreas construidas de diferencia normalizada (NDBI)
- b. Establecer la relación que existe entre el crecimiento poblacional y el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI)
- c. Explicar la relación que existe entre el crecimiento poblacional y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)
- d. Establecer la relación que existe entre el crecimiento poblacional y el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI)

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis general

Existe una relación entre el crecimiento poblacional y su influencia en el índice de calidad ambiental

1.5.2. Hipótesis específicas

- a. Es posible determinar la zona urbana en la ciudad de Tacna haciendo uso del Índice de Áreas Construidas de Diferencia Normalizada (NDBI)
- b. Existe relación entre el crecimiento poblacional y el índice de vegetación normalizada (NDVI)
- c. Existe relación entre el crecimiento poblacional y el Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)
- d. Existe relación entre el crecimiento poblacional y el Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI)

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

Lema (2017), en su tesis: Estimación del índice de calidad ambiental urbana, a partir de imágenes satélites, tuvo como finalidad estimar el índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite en la ciudad de Riobamba; se hizo a través de imágenes satelitales de Landsat 8, se realizó en base a cinco índices (vegetación, suelo, agua y temperatura de superficie) cuyos resultados, siendo el NDVI más representativo del 2014 con vegetación media con 247,9 ha, el NDSI el más representativo es del 2015 con respecto a suelo desnudo y construcciones de 2328,6 ha, y el NDWI más representativo es del 2014, que corresponde a humedad de suelo con 697,7 ha. Para la determinación del ICA se realizó en base al ANOVA la cual permitió determinar que el índice de calidad ambiental de la ciudad de Riobamba es de 2,7 % correspondiente a regular.

Sánchez (2017), en la investigación: Elaboración de un índice de calidad ambiental (ICA), plantea la generación de indicadores derivadores de imágenes satelitales Landsat 8 y de información secundaria de la ciudad de Cuenca para los años 2014 y 2015, obteniendo ocho indicadores (NDVI), (LWCI), (NSI) (TSAVI), (TS), concentraciones de dióxido de nitrógeno, ozono y niveles de ruido. Estos se realizan mediante dos metodologías, análisis multicriterio y análisis de componentes principales. Se determinó que la metodología de análisis de componentes principales representa de mejor manera la ciudad, agrupando categorías de calidad ambiental favorable en sectores con altas humedades e índices altos de vegetación, así como bajas temperaturas y menores concentraciones de contaminantes atmosféricos; y, en sectores con calidad ambiental deteriorada con efectos de islas de calor, altas concentraciones de dióxido de nitrógeno, suelo desnudo con baja cantidad de humedad y mayor cantidad de área construida.

Escobar (2006), concluyo en su trabajo: Un modelo general para grandes zonas urbanas, en este artículo se define el índice de calidad ambiental (ICA) como una variable latente determinada por un conjunto de factores que lo afectan de manera positiva y negativa. Partimos de la hipótesis de la no homogeneidad ambiental del territorio urbano, y nos proponemos definir un modelo general para la estimación del ICA a partir de la construcción de un sistema de indicadores simples y su aplicación en grandes ciudades.

Jiménez (2018), en su tesis: Análisis de crecimiento urbano a partir de imágenes Landsat en el cantón Durán, provincia del Guayas, en el período 1990 –

2015, tiene como objetivo principal analizar el crecimiento urbano mediante la aplicación de índices espectrales derivados de imágenes Landsat, entre el año 1990 y 2015, con los indicadores ambientales: vegetación, agua y como cobertura principal áreas urbanas, se validó la clasificación de la imagen del año 2015 con la matriz de confusión con una exactitud del 100 % para las áreas urbanas, con niveles de concordancia adquiridos mediante el cálculo del coeficiente Kappa que mostró 62 % de fiabilidad. El análisis multitemporal permitió detectar los cambios ocurridos entre estas fechas, en las áreas urbanas con un 29,7 % de incremento, lo que equivale a 78,2 Km², hasta el año 2015. Al final se pudo determinar que las coberturas de vegetación presentaron una disminución del 11,7 %, y las áreas que no fueron clasificadas por lo consiguiente con un porcentaje de 15,3 %, que probablemente eran suelos desnudos y fueron convertidos en áreas urbanas.

Gonzaga (2014), en su estudio: Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la Caracterización de la Cobertura Vegetal, consistió en la evaluación de tres índices; los índices fueron: el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI, Índice de Estrés Hídrico MSI y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo SAVI; A través de imágenes Landsat. Se aplicaron técnicas de análisis espacial como Kriging para establecer superficies climáticas. Los resultados muestran que no hubo diferencias significativas entre los tres, en cuanto a la capacidad para estimar el estado de las coberturas el MSI fue el índice que tuvo ligeramente mejor correspondencia entre sus valores y los estados de las coberturas vegetales en las dos imágenes. Finalmente, se empleó una técnica de análisis espacial, que, a partir de una red de elevaciones contenidas en un modelo de elevación digital, permitió determinar las diferencias entre el área real y el área proyectada para cada cobertura presente en la zona de estudio la cual presenta relieves irregulares.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Calidad ambiental

La calidad ambiental urbana abarca un conjunto complejo de factores humanos y ambientales interrelacionados, tales como densidad poblacional, disposición de las construcciones, áreas verdes, calidad de aire, entre otros, que influyen positiva o negativamente en la vida de los ciudadanos. La valoración y evaluación de la calidad ambiental suele estar basada en la construcción, medición y monitoreo de indicadores ambientales. Estos indicadores son mediciones

científicas de la trayectoria de las condiciones ambientales a través del tiempo, incluyendo el estado del aire, agua y suelo, la presión de ellos y los efectos resultantes sobre la salud ecológica y humana (Nichol & Wong, 2005).

La calidad ambiental se refiere a juicios de valor cualificados y cuantificados que se otorgan a un estado o condición del ambiente, donde el estado se refiere a los valores componentes (no necesariamente numéricos), adoptados en una situación y momentos dados, por las variables del ambiente que ejercen una mayor influencia sobre la calidad de vida presente y futura de la población (Cabrera, Maldonado, & Arévalo, 2004).

La calidad ambiental genera una imagen de ciudad y es percibida y valorada socialmente en función de la salud y el beneficio social. Por ellos, surge la necesidad de medir esta realidad a través de datos objetivos. La calidad ambiental urbana es el resultado de la interacción del conjunto de factores humanos y ambientales que inciden favorable o desfavorablemente de espacio público, la calidad y cantidad de las áreas verdes, la contaminación ambiental, la calidad de la vivienda, entre otros (Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2013).

2.2.2. Indicadores de calidad ambiental

Para la medición y monitoreo de la calidad ambiental urbana se han propuesto diversos indicadores, entre los que se encuentran relacionados con la biodiversidad, la vegetación y las áreas verdes, el suelo, el clima y los contaminantes del agua y del aire, además de indicadores económicos, sociales y demográficos, entre otros. A continuación, se mencionan algunos de estos indicadores.

Áreas verdes: La vegetación cumple un rol importante en la conformación y calidad ambiental de los espacios abiertos, pues humifica y purifica el aire. Las calles y avenidas sin árboles plantados en sus extremos presentan cuatro veces más polvo que aquellas calles arboladas, que además contienen una mayor riqueza y abundancia de aves en una ciudad (Díaz, 2005).

Las áreas verdes mitigan también los impactos térmicos al interior de las ciudades, estudios realizados en la ciudad de Vancouver encontraron que las áreas boscosas son hasta 5,5 °C más frías que las urbanas, mientras que los parques urbanos verdes son 1,1 °C más fríos que las áreas edificadas (Wong, 2005).

Existen varias formas de medir la vegetación urbana a partir de imágenes satélite, todas ellas basadas en la medición comparativa de la reflectividad de la superficie en las regiones del espectro electromagnético correspondiente al infrarrojo y al visible, entre los índices más utilizados para medir esta variable se encuentran:

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) y el índice de vegetación ajustado al suelo transformado (TSAVI). Por otro lado, el índice de humedad en las hojas (LWCI) aporta también valiosa información respecto al área verde en la superficie urbana. Algunos de estos índices han sido utilizados para medir la calidad ambiental urbana (Santana et al., 2010).

Suelo edificado: Los indicadores de suelo urbano nos brindan información sobre las superficies construidas y permiten comprender los procesos de alteración del suelo debido a la expansión de las áreas industriales y residenciales. De la misma manera que con la vegetación, es posible obtener índices de suelo urbano a partir de imágenes de satélite. Entre los más conocidos, se encuentra el índice de suelo normalizado (NSI) y el índice áreas construidas de diferencia normalizada (NDBI). Este tipo de índices permiten estudiar los procesos de cambio de uso de suelo en el espacio y tiempo, ayudando a comprender los patrones de crecimiento y expansión urbana y mejorar la planificación de las áreas urbanas (Wiseman, 2007).

Temperatura de la superficie: La temperatura de la superficie terrestre está relacionada con la temperatura del aire, y en las zonas urbanas densamente construidas la temperatura del aire es mayor que la de los alrededores de la ciudad, dicho fenómeno se conoce como "isla de calor urbana" y entre los factores de mayor influencia se encuentran la geometría urbana, el calor antropogénico y las propiedades térmicas de materiales de construcción (Ramírez y Domínguez, 2010).

El término que se puede vincular directamente con la temperatura de la superficie es el confort térmico, este es un factor que indica la conformidad de una persona con su ambiente térmico, es decir un estado en el que no se sienta ni demasiado calor, ni demasiado frío (Guzmán y Ochoa, 2014).

Contaminantes atmosféricos: La calidad de aire en la mayoría de ciudades se ha visto deteriorada debido al creciente ritmo de las actividades contaminantes, principalmente las emisiones procedentes del tráfico vehicular y la actividad industrial, como el dióxido de carbono o monóxido de carbono (World Health Organization, 2014)

Contaminación acústica: La contaminación acústica se refiere a la presencia de ruidos o vibraciones que impliquen molestia, riesgo o daño a las personas y el ambiente, repercutiendo en el grado de confort y calidad de vida, los vehículos motorizados son la causa de alrededor del 70 % (Platzer et al., 2007).

2.2.3. Índice de kappa

El coeficiente kappa refleja la concordancia inter-observador y puede ser calculado en tablas de cualquier dimensión, siempre y cuando se contrasten dos observadores. El coeficiente kappa puede tomar valores entre -1 y +1. Mientras más cercano a +1, mayor es el grado de concordancia inter-observador, por el contrario, mientras más cercano a -1, mayor es el grado de discordancia inter-observador. Un valor de $k = 0$, refleja que la concordancia observada es precisamente la que espera a causa exclusivamente del azar (Jiménez, 2018).

El cálculo del coeficiente Kappa para medir los porcentajes de error en la variabilidad y el porcentaje de concordancia entre las coberturas reales y las coberturas que se muestran en las imágenes clasificadas, se calcula mediante la siguiente fórmula (1):

Cálculo del Coeficiente de Kappa

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^n m_{i,i} - \sum_{i=1}^n (G_i C_i)}{N^2 - \sum_{i=1}^n (G_i C_i)} \quad (1)$$

Dónde:

- i es el número de clase
- n es el número total de valores clasificados en comparación con los valores de verdad
- $m_{i,i}$ es el número de valores pertenecientes a la clase de verdad i que también se han clasificado como clase i (es decir, valores que se encuentran a lo largo de la diagonal de la matriz de confusión)
- C_i es el número total de valores predichos que pertenecen a la clase i
- G_i es el número total de valores de verdad que pertenecen a la clase i

En la tabla 1, El coeficiente Kappa mide la concordancia entre la clasificación y los datos reales. Este estadístico es una medida de la diferencia entre la exactitud lograda en la clasificación con un clasificador automático y la probabilidad de lograr una clasificación con un clasificador aleatorio.

Tabla 1*Valoración Índice de Kappa*

Valor de K	Fuerza de la concordancia
<0,20	Pobre
0,21 - 0,40	Débil
0,41 - 0,60	Moderada
0,61 - 0,80	Buena
0,81 - 1,00	Muy buena

Nota. En la presente tabla se muestran los niveles de fuerza de concordancia (entre los datos clasificados y los datos reales) según los valores que puedan resultar del cálculo desde el valor más pobre hasta el más aceptable (Jiménez, 2018).

2.2.4. Matriz de confusión

La matriz de confusión, consta de una tabla de doble entrada que controla los valores reales o verdad - terreno con los resultados de la clasificación. La diagonal de la matriz nos muestra la cantidad de píxeles reales y de la clasificación que coinciden por categoría, mientras que los restantes, nos vienen a decir aquellos que se confunden con otras categorías. Es decir, en sentido vertical representa el porcentaje de píxeles reales que se confundieron en la verdad – terreno, y en sentido horizontal el porcentaje de píxeles después de la clasificación que se han confundido (Jiménez, 2018).

Los errores de comisión representan la fracción que se predijo que estaban en una clase pero que no pertenecen a esa clase. Son una medida de falsos positivos. Los errores de comisión se muestran en las filas de la matriz de confusión, excepto por los valores a lo largo de la diagonal.

- a. Errores de omisión:** Los errores de omisión representan la fracción de valores que pertenecen a una clase pero que se predijo que estaban en una clase diferente. Son una medida de falsos negativos. Los errores de omisión se muestran en las columnas de la matriz de confusión, excepto por los valores a lo largo de la diagonal principal.
- b. Exactitud del productor:** La precisión del productor es la probabilidad de que un valor en una clase se clasifique correctamente.
- c. Exactitud del usuario:** La precisión del usuario es la probabilidad de que un valor que se predice que esté en una determinada clase realmente sea esa clase. La probabilidad se basa en la fracción de los valores predichos correctamente al número total de valores predichos en una clase.

2.2.5. Clasificación de imágenes satelitales

La clasificación en el contexto de la teledetección es un proceso que asigna a cada píxel de la imagen original una etiqueta correspondiente a una de las clases. La imagen resultante es un mapa en el que las variables continuas contenidas en la imagen original son agrupadas en variables discontinuas según clases.

En función del tipo de clase elegido para realizar la clasificación podemos distinguir dos tipos de clasificación:

- Clasificación supervisada, la cual se basa en las clases informacionales.
- Clasificación no supervisada, la cual se basa analizando valores espectrales similares, se establece grupos de píxeles con características espectrales similares. (Quiros, 2009)

En la tabla 2, Dentro de los métodos supervisados, se distinguen dos sub grupos en función de si se presupone o no la distribución de probabilidad de las clases de manera que se puedan resumir los distintos tipos de clasificación.

Tabla 2

Métodos de Clasificación en Teledetección

No Supervisada	Supervisada
Se basa en clases espectrales, los píxeles de una misma clase deben tener valores espectrales similares	<p>Los clasificadores se construyen basándose en las clases informacionales, se especifican ejemplos de las distintas clases de interés (área de entrenamiento o regiones de interés), de forma que los patrones que caracterizan las diferentes clases se obtienen de estas</p> <p>Paramétrica: Suponen una distribución de probabilidad de las clases conocida (distribución normal), si la dimensionalidad de los datos es alta se necesitan muchas muestras de aprendizaje.</p> <p>No Paramétrica: No presuponen la forma de la distribución de las probabilidades, estiman la densidad de cada observación usando muestras de entrenamiento.</p>

Nota. En la presente tabla se muestra la taxonomía de los métodos de clasificación en teledetección (Turpo, 2018).

2.2.6. Imágenes satelitales

Las imágenes satelitales están confeccionadas por matrices, en las que cada celda representa un píxel, las dimensiones de este píxel dependerá de la resolución espacial del sensor. Los sensores registran la radiación electromagnética que

proviene de las distintas coberturas y son almacenadas en cada píxel, de acuerdo a los intervalos de longitudes de onda, en las que este programado el sensor para captar.

Esta energía electromagnética es representada en cada píxel por un valor digital al cual se le agrega una tonalidad, este valor es llamado Nivel Digital (ND), la cantidad de niveles digitales que se podrá representar dependerá de la Resolución Radiométrica del sensor. Por ejemplo, para un sensor con resolución radiométrica de 8 bit los niveles digitales varían entre 0 y 255, siendo en la escala de grises el cero igual al color negro y el 255 igual al color blanco.

La asignación de colores más conocida es la del falso color convencional (RGB); R=red, rojo; G=green, verde; B=blue, azul; la cual asigna el color azul a la banda del verde, el color verde a la banda del rojo y el color rojo a la banda del infrarrojo cercano (Bravo, 2017).

Tipos de imágenes de teledetección: El tipo de producto más común que suministran los satélites de teledetección es una imagen digital de tipo ráster, donde cada píxel tiene asignado uno o varios valores numéricos (niveles digitales) que hacen referencia a la energía media recibida dentro de una determinada banda espectral. Se distinguen los siguientes tipos de imágenes:

- Imagen multiespectral (MS): Imagen que lleva asociados varios valores numéricos a cada píxel, tantos como bandas espectrales sea capaz de detectar el sensor. Es el tipo de producto más útil ya nos proporciona la firma espectral de los distintos elementos presentes en la imagen. Cuando mayor sea el número de bandas que nos proporciona el sensor, mayor será la capacidad de análisis de los elementos presentes en la imagen.
- Imagen pancromática (PAN): Dispone de una sola banda espectral que abarca gran parte del visible y comienzo del infrarrojo, obteniendo como resultado una imagen que habitualmente se representa en una escala de grises (imagen en blanco y negro), tiene la ventaja de poseer mayor resolución espacial que las imágenes multiespectrales que proporciona el mismo satélite. Debido a ellos son muy interesantes para la detección de pequeños elementos de la superficie terrestre que no son distinguibles en la imagen multiespectral (Labrador et al., 2012).

2.2.7. Imágenes Satelitales Landsat

El programa Landsat cuenta con una serie de misiones de observación de la tierra por satélite administrado conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de los EE.UU.

En la tabla 3, El último satélite de la serie Landsat, la misión continuidad de datos de landsat (LDCM), se puso en marcha el 11 de febrero de 2013, ahora renombrado Landsat 8, los datos adquiridos por el satélite continúan para expandir archivos para los usuarios en todo el mundo (Bravo Morales, 2017).

Tabla 3

Periodo de Actividad de Satélite Landsat

Satélite	Fecha de lanzamiento	Fin de operación
Landsat 1	23-07-1992	05-01-1978
Landsat 2	22-01-1975	27-07-1983
Landsat 3	05-03-1978	07-09-1993
Landsat 4	16-06-1982	14-12-1993
Landsat 5	01-03-1984	30-11-2011
Landsat 6	03-10-1993	LANZAMIENTO FALLIDO
Landsat 7	15-04-1999	ACTIVO
Landsat 8	11-02-2013	ACTIVO

Nota. En la presente tabla se muestra el periodo de actividad de los satélites Landsat (NASA, 2007).

2.3. Definición de términos

2.3.1. Calidad ambiental

La calidad ambiental está referida a juicios de valor cualificados y cuantificados que se otorgan a un estado o condición del ambiente, donde el estado se refiere a los valores componentes (no necesariamente numéricos), adoptados en una situación y momento dados, por las variables del ambiente que ejercen una mayor influencia sobre la calidad de vida presente y futura de la población (Lema, 2017).

2.3.2. Crecimiento poblacional

El aumento (relativo o absoluto) en el número de personas que viven en los pueblos y las ciudades. El ritmo de crecimiento de la población urbana depende del aumento natural de dicha población y de los nuevos habitantes que adquieren estas zonas debido, por una parte, a la migración neta del campo a las ciudades y, por otra parte, a la reclasificación de los asentamientos rurales en ciudades y pueblos (Unicef, 2012).

2.3.3. Teledetección

Radica en la observación y obtención de información de objetos de la superficie terrestre desde sensores a bordo de satélites, los cuales miden la energía electromagnética proveniente de dichos objetos, esta herramienta se ha desarrollado notablemente en las últimas décadas debido a que no es necesario estar en contacto físico con la superficie a estudiar (Holzman, 2013).

2.3.4. Modelamiento Geoespacial

Abstracción del mundo real, mediante la cual se utilizan un conjunto de datos específicos que permite la visualización a través de mapas y permite la modificación, consulta y análisis de estos a través de productos de información (Rojas, 2018).

2.3.5. Índice de Calidad Ambiental (ICA)

Los índices de calidad ambiental sirven para informar al público general y especialmente a los agentes con capacidad de decisión acerca de las estrategias necesarias para mejorar el bienestar de la población. La importancia actual de los índices ambientales yace en la creciente demanda de mayor y mejor información ambiental, en particular por algunos sectores sociales con creciente interés por los aspectos ambientales del desarrollo y el bienestar social (Celemín, 2010).

2.3.6. Índice de Áreas Construidas de Diferencia Normalizada (NDBI)

El Índice de Áreas Construidas de Diferencia Normalizada (NDBI) utiliza las bandas NIR y SWIR para resaltar las áreas construidas por el hombre. Se basa en

una relación para mitigar los efectos de las diferencias de iluminación del terreno, así como los efectos atmosféricos (Jiménez, 2018).

2.3.7. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Existen diversas metodologías para estudiar mediante imágenes satelitales los cambios estacionales que ocurren en la vegetación; uno de ellos es la aplicación de índices vegetativos relacionados con el verdor. El NDVI mide la relación entre la energía absorbida y emitida por los objetos terrestres. Aplicado a las comunidades de plantas, el índice arroja valores de intensidad del verdor de la zona, y da cuenta de la cantidad de vegetación presente en una superficie y su estado de salud o vigor vegetativo. El NDVI es un índice no dimensional, y por lo tanto sus valores van de -1 a +1, En la práctica, los valores que están por debajo de 0,1 corresponden a los cuerpos de agua y a la tierra desnuda, mientras que los valores más altos son indicadores de actividad fotosintética de las zonas de matorral, en el bosque templado, la selva y la actividad agrícola. (Chuvieco, 2010).

2.3.8. Índices de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI)

El índice de agua de diferencia normalizado “NDWI” diseñado por McFeeters (1996) es ampliamente utilizado para maximizar la presencia del agua. El NDWI se obtiene en ArcGIS usando la herramienta calculadora ráster, ingresando la fórmula anterior con las bandas correspondientes, este arroja valores de -1 y 1, donde los valores del píxel cercanos a 1 son agua y los valores del píxel cercanos a -1 son otro tipo de coberturas (Cárdenas, 2020).

2.3.9. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)

El Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) es un índice de vegetación que intenta minimizar las influencias del brillo del suelo utilizando un factor de corrección de brillo del suelo. Esto con frecuencia se utiliza en regiones áridas en donde la cubierta de vegetación es baja.

- NIR = valores de píxel de la banda infrarroja cercana
- Rojo = valores de píxel de la banda roja cercana
- L = cantidad de cobertura de vegetación verde

NIR y rojo se refiere a las bandas asociadas con aquellas longitudes de onda. El valor L varía dependiendo de la cantidad de cubierta vegetativa verde.

Generalmente, en áreas sin ninguna cubierta de vegetación verde $L=1$; en áreas de cubierta de vegetación verde moderada, $L=0,5$; y en áreas con cubierta de vegetación muy densa, $L=0$ (lo cual es equivalente al método NDVI). Este índice coloca los valores entre $-1,0$ y $1,0$ (Jiménez, 2018, p. 19).

2.3.10. Imágenes satelitales

Una imagen satelital viene a ser el producto obtenido por un sensor instalado a bordo de un satélite artificial, mediante la captación de la radiación electromagnética emitida por un cuerpo celeste, el producto que consecutivamente se transmite a 30 estaciones terrestres para su visualización, procesamiento y análisis. Existen diferentes tipos de imágenes satelitales, esto depende del tipo de sensor. Existe una amplia gama de tipos de imágenes satelitales que hoy se utilizan en las más diversas áreas, depende de su resolución espacial, así como la información espectral que poseen, desde el monitoreo de cambio climático, monitoreo de inundaciones e incendios, seguimiento de tifones y huracanes, evaluación multiespectrales de vegetación (Gonzaga, 2014).

Las imágenes satelitales simbolizan las formas de captura indirecta de la información espacial. Se almacenan como matrices (cada matriz viene a ser una banda del sensor), donde el elemento de la imagen es llamado píxel y tiene un valor proporcional a la energía reflejada de la superficie terrestre para el área de la imagen. El píxel es la unidad visual más pequeña que se puede representar en una imagen digital. El sensor detecta la radiación media de un objeto o elemento sobre la superficie correspondiente al tamaño del píxel. Este valor es traducido por el sensor a un valor numérico entero nombrado Nivel Digital (ND), también conocido como valor de brillo o escala de grises, a partir de este se efectúa el procesamiento digital de las imágenes (Lema, 2017).

2.3.11. Indicadores de calidad ambiental

Los indicadores ambientales son una herramienta para efectuar el monitoreo de la biodiversidad, mediante la recolección sistemática de datos obtenidos mediante mediciones u observaciones en series de tiempo y espacio. Un indicador ambiental resulta ser una variable o suma de variables que proporciona una información sintética sobre un fenómeno ambiental complejo que permite conocer, evaluar el estado y variación de la calidad ambiental. Para la caracterización de indicadores ambientales se identifican y jerarquizan los conflictos o problemáticas del ambiente,

a partir de los cuales se seleccionan las principales variables que componen el sistema de indicadores (Lema, 2017).

2.3.12. Sistemas de información geográfica (SIG)

Un sistema de información elaborado para trabajar con datos referenciados por coordenadas espaciales o geográficas y sus correspondientes datos no espaciales. Es un sistema computarizado que permite la entrada, almacenamiento, representación y salida eficiente de datos espaciales (mapas) y atributos (descriptivos) de acuerdo con especificaciones y requerimientos concretos.

El SIG se define como una tecnología de manejo de información geográfica formada por equipos electrónicos computarizados (hardware), programados adecuadamente, que permiten manejar una serie de datos espaciales (información geográfica) y realizar análisis complejos con éstos, siguiendo los criterios impuestos por el equipo científico (Lema, 2017).

Un SIG es una integración organizada de hardware, software y datos geográficos, diseñado para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas, la información geográficamente referenciada con el fin de solucionar dificultades complejas relacionadas con los procesos de planificación y gestión. Los SIG son herramientas que permiten a los usuarios crear consultas interactivas, analizar la información espacial, editar datos, mapas y presentar los resultados de todas estas operaciones, estos permiten la captura, almacenamiento, edición y análisis de datos geográficos, con objeto de generar información válida para la toma de decisiones. Esta tecnología en los últimos años ha ido cobrando auge en cuestiones urbano-regionales, de desarrollo rural, de gestión costera, de redes de transporte, por citar las más relevantes (Jiménez, 2018).

2.3.13. Temperatura de superficie

La temperatura de superficie es el principal indicador de la distribución de energía disponible en la superficie de la Tierra, mediante su efecto en el flujo de calor latente y sensible a la atmósfera, flujo de calor sensible hacia el suelo y radiación hacia la atmósfera, por ello es un parámetro clave en los procesos físicos a las diferentes escalas espaciales, locales, regionales y globales (Lema, 2017).

La temperatura de la superficie está relacionada con la temperatura del aire, en las zonas urbanas densamente construidas la temperatura del aire es mayor que la de los alrededores de la ciudad. El fenómeno se conoce como “isla de calor urbana”

y entre los factores de mayor influencia se encuentran la geometría urbana, el calor antropogénico y las propiedades térmicas de materiales de construcción. Un término puede ser vinculado directamente con la temperatura de la superficie es el confort térmico. Es un factor que indica la conformidad de una persona con su ambiente térmico, es decir un estado en el que no se sienta ni demasiado calor, ni demasiado frío. Por lo tanto, se convierte en uno de los principales elementos a tomar en cuenta al momento de realizar actividades al aire libre, por lo cual se lo puede relacionar con el índice de calidad ambiental (Vega, 2017).

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de la investigación

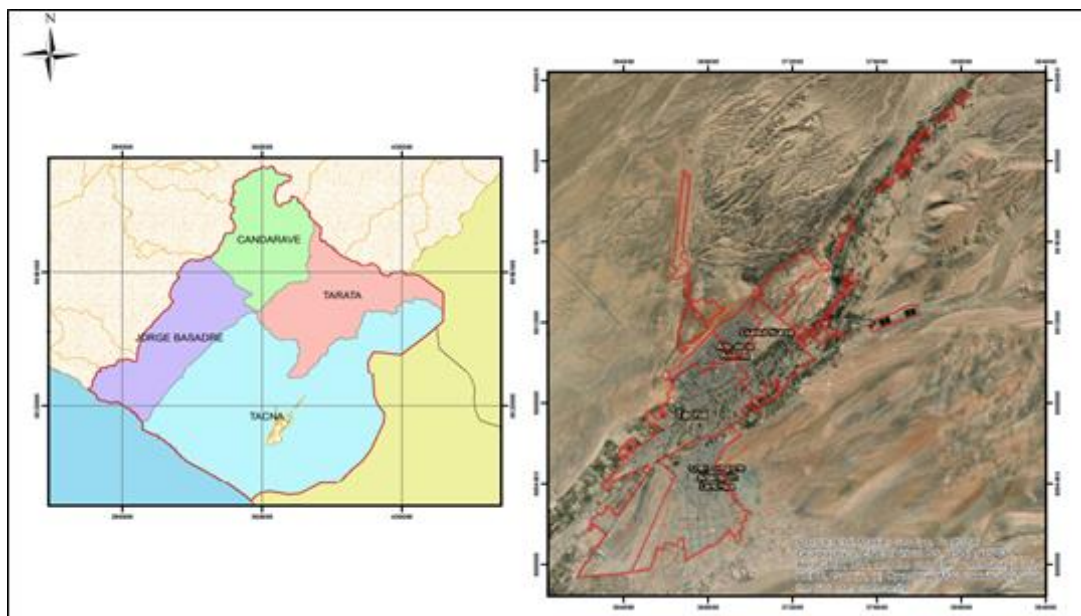
La presente investigación es de tipo diagnóstica debido a que permite a través del análisis multitemporal conocer las tendencias de urbanización en el área de estudio en el período analizado, también se podría considerar de tipo exploratorio ya que no existen muchos antecedentes de este tipo de estudios en la ciudad de Tacna, y no se han realizado investigaciones acerca del crecimiento urbano a través del tiempo y su análisis a través de imágenes Landsat. Por ende, el presente trabajo podría ser usado como guía para futuras investigaciones de este ámbito.

3.2. Población y muestra de estudio

En cuanto a la población y muestra se considera la zona urbana de la ciudad de Tacna, es por ello se consideró importante mencionar los siguientes aspectos. En cuanto a la delimitación espacial la zona de estudios se ubica en el departamento de Tacna, la investigación se basa en la zona urbana ver figura 1.

Figura 1

Mapa de Ubicación de la zona de estudio



Nota. Al lado izquierdo podemos apreciar el límite departamental de Tacna. La imagen derecha en borde rojo podemos apreciar la delimitación de la zona urbana de la ciudad de Tacna, el cual se tomó como referencia la base de datos de la unidad de Ordenamiento Territorial del Gobierno Regional de Tacna (2016).

3.3. Operacionalización de variables

En la siguiente tabla 4, se muestra la operación de variables

Tabla 4

Operacionalización de Variables

Variables	Sub variables	Definición conceptual	Clasificación	Indicadores
Crecimiento poblacional	Población distrital	El aumento (relativo o absoluto) en el número de personas que viven en los pueblos y las ciudades.	Cuantitativa continua	Habitantes
	Áreas Construidas de Diferencia Normalizada (NDBI)	Se basa en una relación para mitigar los efectos de las diferencias de iluminación del terreno, así como los efectos atmosféricos (Jiménez, 2018).	Cuantitativa continua	Área (Km ²)
Índice de calidad ambiental	Índice de Vegetación Normalizada (NDVI)	Mide la relación entre la energía absorbida y emitida por los objetos terrestres. Aplicado a las comunidades de plantas, el índice arroja valores de intensidad del verdor de la zona, y da cuenta de la cantidad de vegetación presente en una superficie y su estado de salud o vigor. (Chuvienco, 2010).	Cuantitativa continua	Área (Km ²)
	Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)	Es un índice de vegetación que intenta minimizar las influencias del brillo del suelo utilizando un factor de corrección de brillo del suelo. (Jiménez, 2018)	Cuantitativa continua	Área (Km ²)
	Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI)	Diseñado por McFeeters (1996) es ampliamente utilizado para maximizar la presencia del agua. (Cárdenas, 2020).	Cuantitativa continua	Área (Km ²)

Nota. Relacionamos las variables de la investigación con la definición conceptual y los indicadores que serán expresados en los resultados.

3.4. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

3.4.1. Técnicas de recolección de datos

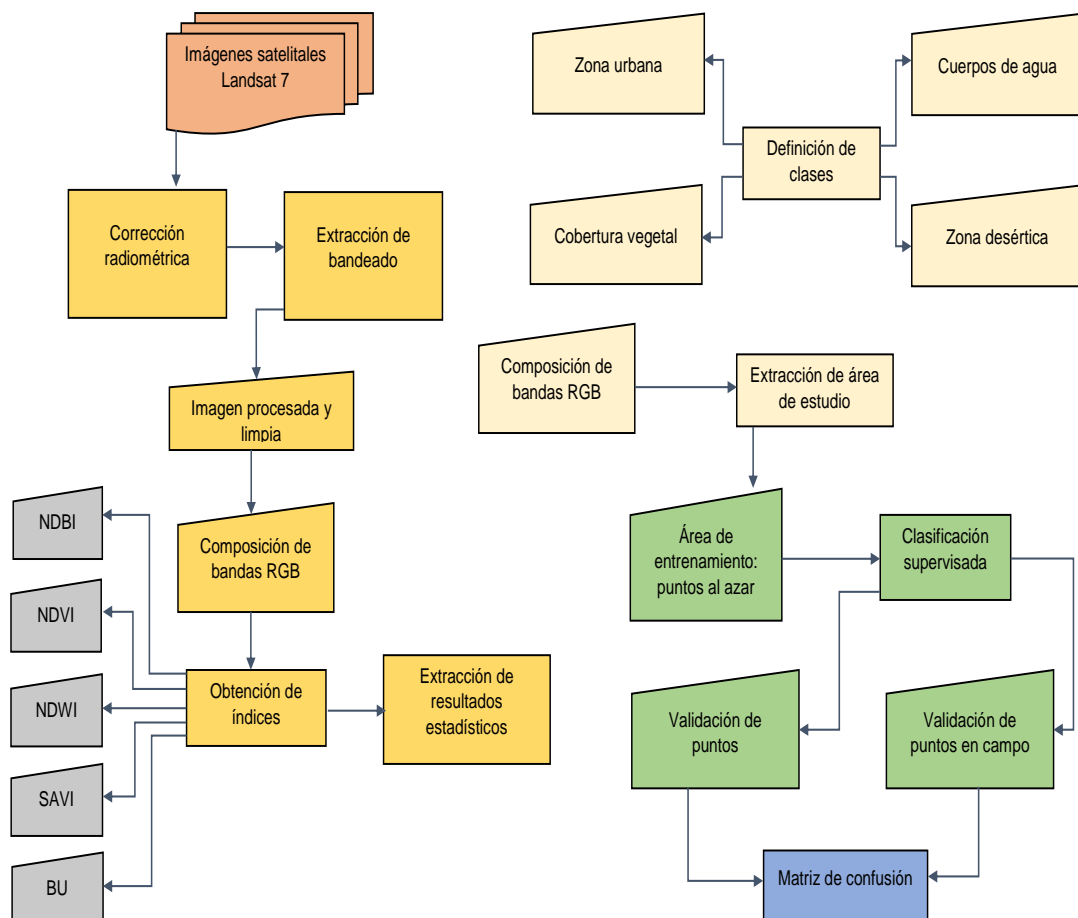
Se utilizó la **técnica de análisis documental**, en el cual se recolecto documentos y fuentes confiables, esto nos permitirá tener conceptos más claros y precisos para poder realizar el modelo.

También utilizamos **técnica de observación no experimental**, para ello se realizó trabajos de campo, lo cual nos permitió obtener información importante para validar la investigación.

En la siguiente figura 2, se muestra la secuencia de pasos para la metodología. Los cuales describiremos en los siguientes ítems de la investigación y se evidenciaran en los resultados.

Figura 2

Fases de la metodología de trabajo



Nota. Esquema de la metodología de la investigación considerando el análisis de las imágenes satelitales hasta la validación de las categorías de clasificación.

3.4.2. Instrumentos para la recolección de datos

Se utilizó libros especializados sobre procesos de Sistemas de Información Geográfica (SIG), procesamiento digital de imágenes satelitales; bibliotecas virtuales de artículos especializados referidos a la investigación; direcciones URL para acceder al fundamento teórico, antecedentes del estudio, y para acceder a imágenes satelitales LANDSAT.

Uso de software de ubicación geo-referenciada GOOGLE EARTH para la ubicación cartográfica de la zona de estudio, uso herramientas de ArcMap para el manejo del sistema GIS; empleo del software Global Mapper, para la descarga de curvas de nivel; uso del software ENVI para el recorte de las imágenes satelitales LANDSAT adquiridas.

3.5. Procesamiento y análisis de datos

3.5.1. Imágenes Satelitales

Se trabajaron con imágenes satelitales Landsat 7, las cuales fueron descargadas de la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), del servidor Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Estas corresponden al periodo de 2000 – 2019, realizando el análisis multitemporal de los Índices de Calidad Ambiental.

Se trabajaron imágenes del periodo seco (meses de mayo-diciembre) y periodos húmedos (meses de enero-mayo), se consideró un porcentaje de nubosidad menor de 1 % para evitar realizar corrección atmosférica. Las imágenes procesadas se muestran en la siguiente tabla 5.

Tabla 5

Descarga de Imágenes Satelitales

Año	Fecha	Sun Elevation	ID
Periodo Seco			
2000	24/11/2000	62,7797716	"LE07_L1TP_002072_20001124_20170209_01_T1"
2004	16/09/2004	53,5864509	"LE07_L1TP_002072_20040916_20170119_01_T1"
2005	02/08/2005	41,7469322	"LE07_L1TP_002072_20050802_20170113_01_T1"
2008	14/11/2008	63,0176628	"LE07_L1TP_002072_20081114_20161224_01_T1"
2009	17/11/2009	63,2841897	"LE07_L1TP_002072_20091117_20161219_01_T1"

2010	17/09/2010	54,5304803	"LE07_L1TP_002072_20100917_20161212_01_T1"
2012	09/11/2012	64,7276604	"LE07_L1TP_002072_20121109_20161129_01_T1"
2015	15/09/2015	55,4395329	"LE07_L1TP_002072_20150915_20161020_01_T1"
2017	06/10/2017	62,0084617	"LE07_L1TP_002072_20171006_20171101_01_T1"
2019	12/10/2019	59,2164416	"LE07_L1TP_002072_20191012_20191107_01_T1"
2000	24/11/2000	62,822472	"LE07_L1TP_002073_20001124_20170209_01_T1"
2004	16/09/2004	52,6673772	"LE07_L1TP_002073_20040916_20170119_01_T1"
2005	02/08/2005	40,571722	"LE07_L1TP_002073_20050802_20170114_01_T1"
2008	14/11/2008	62,8144928	"LE07_L1TP_002073_20081114_20161224_01_T1"
2009	17/11/2009	63,2374754	"LE07_L1TP_002073_20091117_20161217_01_T1"
2010	17/09/2010	53,593446	"LE07_L1TP_002073_20100917_20161212_01_T1"
2012	09/11/2012	64,5570691	"LE07_L1TP_002073_20121109_20161127_01_T1"
2015	15/09/2015	54,4518006	"LE07_L1TP_002073_20150915_20161020_01_T1"
2017	06/10/2017	61,233849	"LE07_L1TP_002073_20171006_20171101_01_T1"
2019	12/10/2019	58,6076902	"LE07_L1TP_002073_20191012_20191107_01_T1"

Periodo Húmedo

2000	14/04/2000	48,8246668	LE07_L1TP_002072_20000414_20170212_01_T1
2004	08/03/2004	52,1923768	LE07_L1TP_002072_20090322_20161222_01_T1
2005	27/03/2005	55,1781726	LE07_L1TP_002072_20190302_20190328_01_T1
2008	19/03/2008	53,5031813	LE07_L1TP_002072_20040308_20170122_01_T1
2009	22/03/2009	51,3816332	LE07_L1TP_002072_20050327_20170115_01_T1
2010	09/03/2010	52,43357	LE07_L1TP_002072_20080319_20161229_01_T1
2012	27/02/2012	54,1273155	LE07_L1TP_002072_20100309_20161216_01_T1
2015	08/04/2015	55,5880989	LE07_L1TP_002072_20120227_20161203_01_T1
2017	13/04/2017	51,3725468	LE07_L1TP_002072_20150408_20161027_01_T1
2019	02/03/2019	50,8891119	LE07_L1TP_002072_20170413_20170509_01_T1
2000	14/04/2000	47,7485441	LE07_L1TP_002073_20000414_20170212_01_T1
2004	08/03/2004	51,364497	LE07_L1TP_002073_20090322_20161221_01_T1
2005	27/03/2005	54,6265048	LE07_L1TP_002073_20190302_20190328_01_T1
2008	19/03/2008	52,8675705	LE07_L1TP_002073_20040308_20170123_01_T1
2009	22/03/2009	50,4941231	LE07_L1TP_002073_20050327_20170115_01_T1
2010	09/03/2010	51,6422106	LE07_L1TP_002073_20080319_20161230_01_T1
2012	27/02/2012	53,4745735	LE07_L1TP_002073_20100309_20161216_01_T
2015	08/04/2015	55,0855618	LE07_L1TP_002073_20120227_20161202_01_T1
2017	12/03/2017	50,3174307	LE07_L1TP_002073_20150408_20161029_01_T1
2019	02/03/2019	55,3559949	LE07_L1TP_002073_20170312_20170407_01_T1

Nota. Datos de la metadata de las Imágenes Satelitales importantes para el procesamiento multitemporal.

3.5.2. Datos meteorológicos y climatológicos

Para el procesamiento de los datos de la información climatológica se solicitó la información al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Los datos corresponden a la estación Jorge Basadre Grohmann como se observa en la tabla 6 y figura 3.

Tabla 6

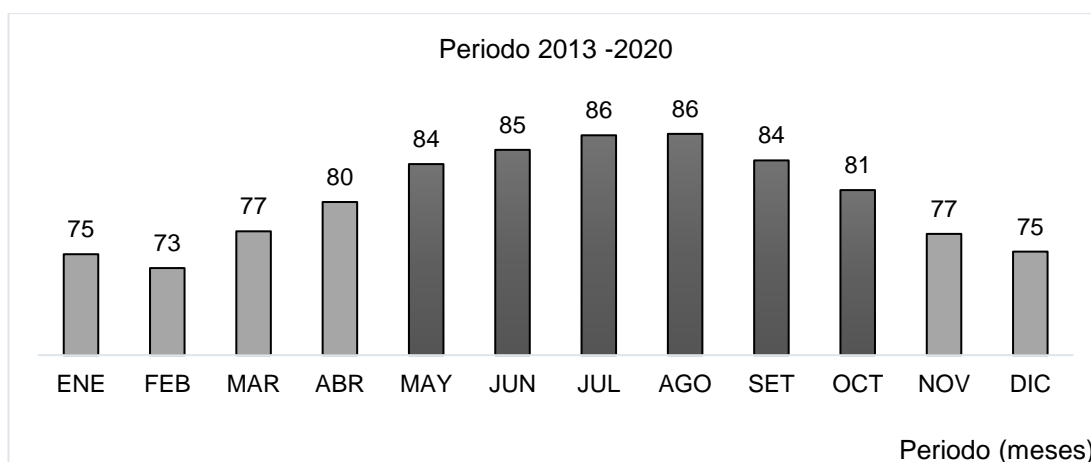
Datos de Humedad Relativa (%)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2013	74	68	74	73	78	80	83	82	80	77	72	71
2014	73	75	74	80	84	84	80	79	84	77	74	73
2015	72	70	71	76	82	83	84	85	82	85	84	82
2016	72	71	75	78	82	81	81	79	78	73	69	67
2017	69	64	73	74	80	90	95	98	85	80	78	81
2018	89	88	88	86	89	85	90	84	79	78	75	70
2019	73	74	76	78	83	87	88	89	88	80	75	71
2020	71	70	74	0	0	0	83	89	86	86	81	80
Promedio	74	72	76	78	82	84	86	86	83	80	76	74
Máximo	89	88	88	86	89	90	95	98	88	86	84	82
Mínimo	69	64	71	73	78	80	80	79	78	73	69	67
Desv. Stándar	6	7	5	28	29	30	5	6	4	4	5	6

Nota. Registro de datos de la Humedad Relativa (%). Se presenta también datos estadísticos como máximo, mínimo, desviación estándar.

Figura 3

Promedio de Humedad Relativa (%)



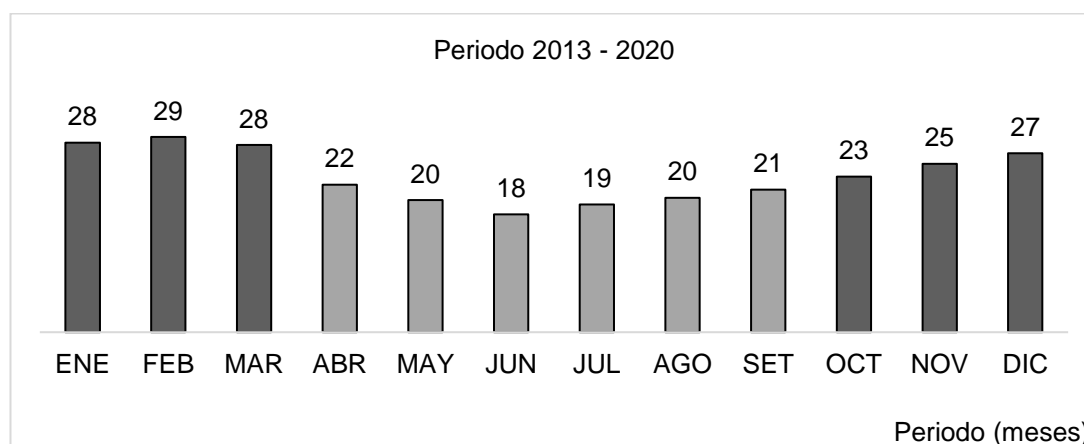
Nota. Se muestra el promedio mensual del registro de los años 2013 al 2020 de la Humedad Relativa es menor en los cuatros primeros meses y se incrementa desde mayo hasta octubre hasta en un 86 % y dos últimos meses vuelve a descender.

En los datos de temperatura máxima mensual los valores oscilan entre los 18 y 30 °C, para la temperatura máxima mensual, se tiene que los valores más altos (30 °C) se dan en los meses de verano y en los meses de invierno se tiene datos de hasta 18 °C, en los meses de que corresponden a otoño y primavera se tienen temperaturas entre 22 y 26 °C, como se visualiza en la tabla 7 y figura 4.

Tabla 7*Datos Temperatura Máxima Mensual (°C)*

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2013	28	0	27	24	22	20	18	19	21	23	25	27
2014	29	28	27	24	22	19	19	20	20	23	25	26
2015	27	29	29	26	23	21	20	21	23	23	25	27
2016	28	30	29	26	23	21	20	21	23	24	26	27
2017	29	30	28	26	23	20	19	20	20	23	25	26
2018	28	29	27	25	23	19	19	20	22	23	26	27
2019	28	29	27	25	22	20	18	20	21	22	25	27
2020	28	29	28	0	0	0	19	20	21	23	24	26
Promedio	28	29	28	22	20	18	19	20	21	23	25	27
Máximo	29	30	29	26	23	21	20	21	23	24	26	27
Mínimo	27	28	27	0	0	0	18	19	20	22	24	26
Desv. Stándar	1	1	1	9	8	7	1	1	1	1	0	0

Nota. Registro de datos Temperatura Máxima Mensual (°C). Se presenta también datos estadísticos como máximo, mínimo, desviación estándar.

Figura 4*Temperatura Máxima (°C)*

Nota. Se muestra el promedio mensual del registro de los años 2013 al 2020 de la Temperatura Máxima (°C) los tres primeros meses se tiene los mayores porcentajes y desde los meses de abril hasta setiembre se tienen los valores promedios.

En los datos de temperatura mínima mensual que se observa en la tabla 8, los valores oscilan entre los 10 y 18 °C, para la temperatura mínima mensual, se tiene que los valores más altos (18 °C) se dan en los meses de verano y en los meses de invierno se tiene datos de hasta 13 °C, en los meses de que corresponden a otoño y primavera se tienen temperaturas entre 10 y 13 °C, ver figura 5.

Tabla 8

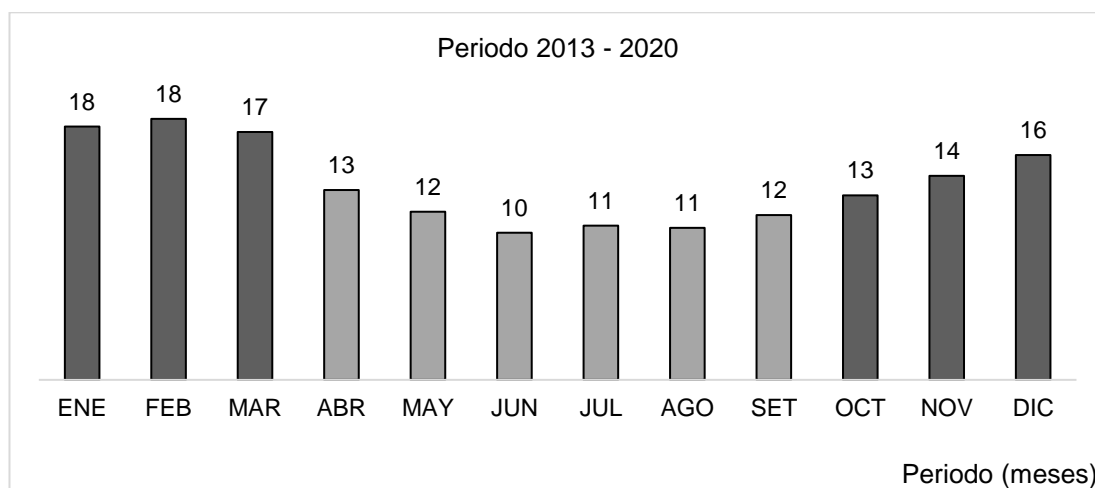
Datos Temperatura Mínima Mensual (°C)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2013	16	18	16	13	13	11	10	10	12	12	14	16
2014	17	16	16	15	14	11	10	11	12	13	15	16
2015	17	19	18	17	15	13	11	11	13	14	15	16
2016	18	19	18	16	13	12	11	11	12	13	14	16
2017	20	19	18	15	14	13	11	11	11	12	14	15
2018	17	18	17	16	14	12	11	11	12	13	15	16
2019	18	19	17	15	13	12	11	10	11	12	15	16
2020	19	19	19	0	0	0	10	10	11	13	13	16
Promedio	18	18	17	13	12	10	11	11	12	13	14	16
Máximo	20	19	19	17	15	13	11	11	13	14	15	16
Mínimo	17	16	16	0	0	0	10	10	11	12	13	15
Desv. Stándar	1	1	1	6	5	5	1	1	1	1	1	0

Nota. Registro de datos Temperatura Mínima Mensual (°C). Se presenta también datos estadísticos como máximo, mínimo, desviación estándar.

Figura 5

Temperatura Mínima (°C)



Nota. Se muestra el promedio mensual del registro de los años 2013 al 2020 de la Temperatura Mínima (°C) los tres primeros meses se tiene los mayores porcentajes y desde los meses de abril hasta setiembre se tienen los valores promedios.

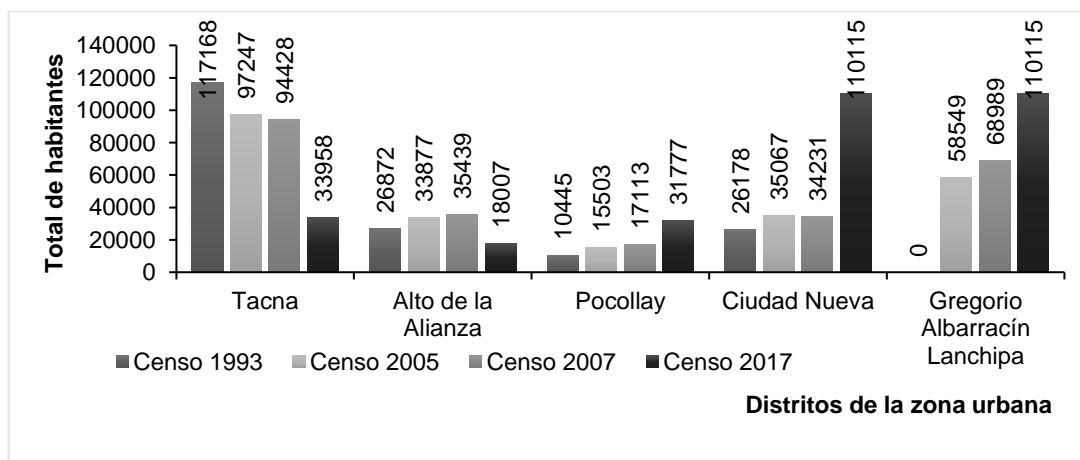
3.5.3. Población

Los distritos seleccionados son: Distrito de Tacna, Distrito de Coronel Gregorio Albarracín Lanchipa, Distrito Alto de la Alianza, Distrito de Ciudad Nueva, Distrito de Pocollay y el Distrito de Calana. De acuerdo con las cifras reportadas en el Censo de Población y Vivienda 2017, el número de habitantes en el departamento de Tacna es de 329 332, lo que representa el 1,1 % de la población nacional. La tasa de crecimiento promedio anual entre 2007- 2017 fue de 1,3 %, habiéndose incrementado en este periodo en 40 551 habitantes.

Dentro del departamento, se observa una forma casi equitativa en la distribución por género, donde el 50,3 % de la población son mujeres y se registra un 49,7 de población masculina. Según la distribución por grupos de edad, y con base a la información del Censo 2017, el mayor número de personas en el departamento se concentra en el rango de edades que oscila entre los 15 y 64 años (69,8 %), luego se encuentra el grupo de 0 a 14 años (23,0 %) y los habitantes de 65 a más años (7,2 %). Además, el mayor porcentaje de la población se ubica en las provincias de Tacna y Jorge Basadre, con el 93 % y el 3,3 %, respectivamente. Para el alcance de los objetivos de la presente investigación se consideró como parte fundamental la recolección de información de la población de la Provincia de Tacna con una población total de 286 240 habitantes, en especial de la zona urbana es por ello se procesó la información obtenida de los censos poblaciones de los años 1993, 2005, 2007 y 2017. El resumen de esta información se muestra en la figura 6 y tabla 9.

Figura 6

Data poblacional de los Distritos de la Zona Urbana de la Región de Tacna



Nota. Data de censos del portal web del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2022).

Tabla 9*Dato poblacional de los Distritos de la Zona Urbana de la Región de Tacna*

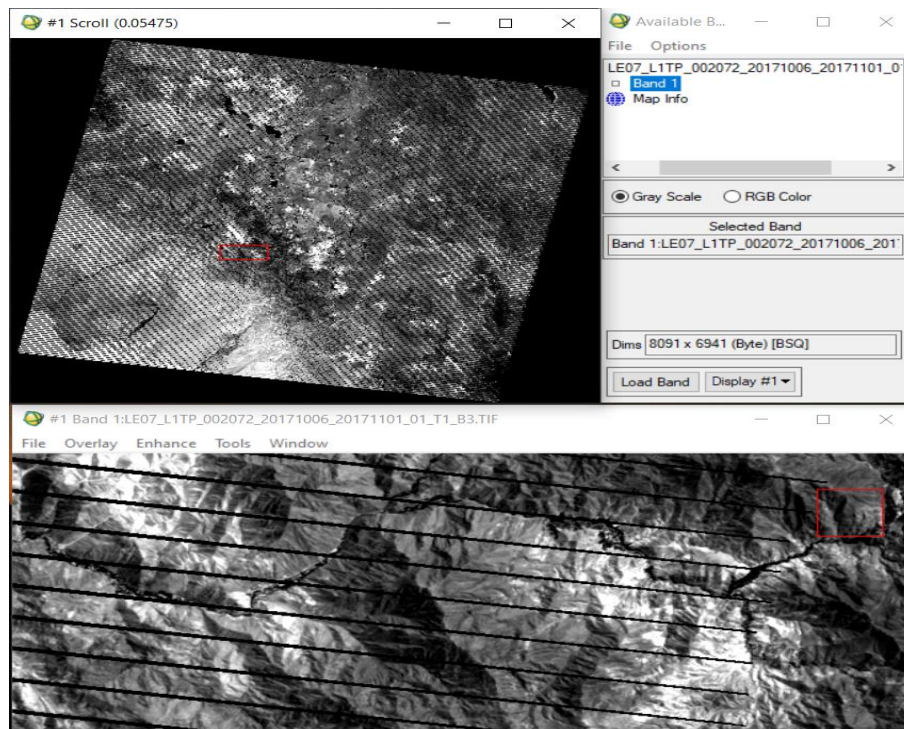
Distritos	Tacna	Alto de la Alianza	Pocollay	Ciudad Nueva	Gregorio Albarracín Lanchipa	Total	% de Hombres y Mujeres
Censo 1993							
Hombres	58 756	13 403	5 415	13 410	0	90 984	50,36
Mujeres	58 412	13 469	5 030	12 768	0	89 679	49,64
Total	117 168	26 872	10 445	26 178	0	180 663	100,00
%	65	15	6	14	0		
Censo 2005							
Hombres	48 231	16 871	7 871	17 824	29 038	119 835	49,88
Mujeres	49 016	17 006	7 632	17 243	29 511	120 408	50,12
Total	97 247	33 877	15 503	35 067	58 549	240 243	100,00
%	40	14	6	15	24		
Censo 2007							
Hombres	46 138	17 492	8 697	16 965	33 973	123 265	49,27
Mujeres	48 290	17 947	8 416	17 266	35 016	126 935	50,73
Total	94 428	35 439	17 113	34 231	68 989	250 200	100,00
%	39	15	7	14	29		
Censo 2017							
Hombres	44 485	16 805	9 272	15 661	53 482	139 705	48,81
Mujeres	47 898	17 153	8 735	16 116	56 633	146 535	51,19
Total	33 958	18 007	31 777	110 115	110 115	286 240	100,00
%	14	7	13	46	46		

Nota. Data de censos del portal web del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2022).

3.5.4. Preprocesamiento de la Imagen Satelital

Para el preprocesamiento de la imagen satelital es importante hacer la corrección radiométrica. En el caso de las imágenes Landsat 7 ETM+, se utilizó una corrección de bandeo (GapFill), tal como se muestra en la figura 7, como resultado del daño que sufrió el dispositivo óptico mecánico del sensor después del 31 de mayo del 2003, (http://landsat.usgs.gov/products_slcoffbackground.php). El procesamiento de las imágenes se realizó en el software ENVI.

Para realizar el procesamiento digital de las imágenes satelitales, se tuvo que realizar el cambio de número digital (ND) a radiancia haciendo uso del software ENVI 5,0. Con ayuda de la herramienta Landsat Calibration, se ingresó el Sun Elevation de cada imagen satelital, ver figura 8.

Figura 7*Corrección del Bandeado de la Imagen Satelital Landsat 7*

Nota. Corrección del bandeo de la imagen Landsat ETM+. Tomada de United States Geological Survey (USGS), 2020.

Se utilizó el Método de escala radiancia espectral, para calcular la radiancia espectral en el sensor ($L\lambda$)

Radiancia Espectral en el sensor ($L\lambda$)

$$ML = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Qcalmax - Qcalmin} \right) \quad (2)$$

El factor multiplicativo de re-escalamiento específico de la banda, proveniente de los metadatos (ML), viene dado por:

Factor Multiplicativo (ML)

$$ML = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Qcalmax - Qcalmin} \right) \quad (3)$$

El factor aditivo de re-escalamiento específico de la banda, proveniente de los metadatos (AL), viene dado por:

Factor Aditivo (AL)

$$AL = LMIN_{\lambda} - \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Qcalmax - Qcalmin} \right) Qcalmin \quad (4)$$

Donde:

Qcal: Valor de pixel discretizados y calibrados del producto estándar (Valor digital).

LMAX λ : Radiancia espectral máxima correspondiente a la banda Qcalx.

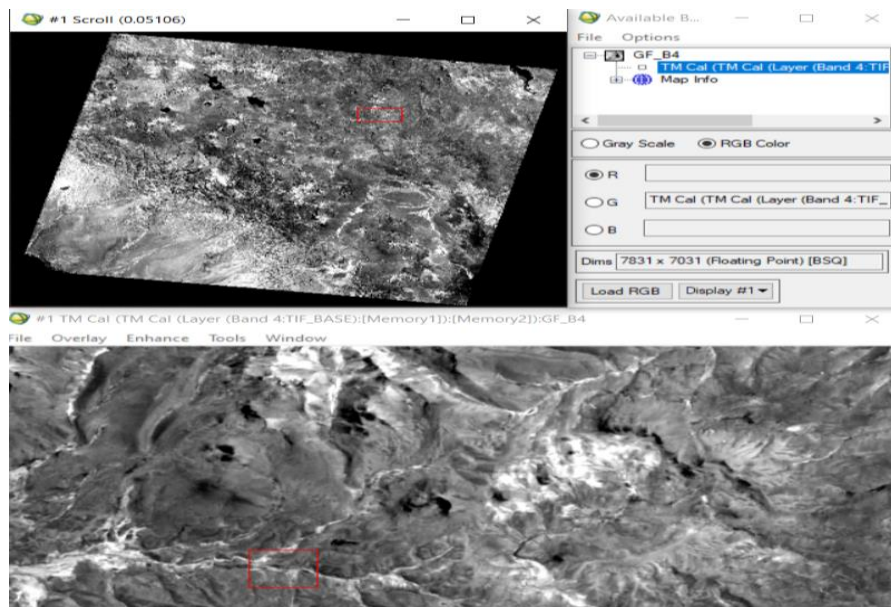
$L_{MIN\lambda}$: Radiancia espectral mínima correspondiente a la banda Qcalx.

Qcalmax: Valor máximo del píxel, va depender de la resolución radiométrica, ejemplo de 8 bits es 256.

Qcalmin: Valor mínimo del píxel, en nuestro caso es 1.

Figura 8

Imagen Satelital Landsat 7 con Radiancia y Reflectancia



Nota. Corrección de la imagen satelital de radiancia a reflectancia haciendo uso del programa ENVI.

Finalmente se realizó el tratamiento de la imagen fue transformar de radiancia a reflectancia, utilizando el algoritmo procesado por Grant y Carter propuesto en el 2011, donde se obtienen los datos estadísticos de las imágenes procesadas, convertidas de radiancia a reflectancia. Del procesamiento se obtienen valores de 0 hasta 1.

Reflectancia en el sensor R_{sensor}

$$R_{sensor} = \left(\frac{\pi * L_{\lambda} * d^2}{E_{sun} * \cos(z)} \right) \quad (5)$$

Donde:

L_{λ} = radiancia espectral en el sensor;

E_{sun} = irradiancia solar en la banda de interés

z = ángulo cenital solar (ángulo cenital = 90 – ángulo de elevación solar).

3.5.5. Índice de Áreas Construidas de Diferencia Normalizada (NDBI).

El Índice de Áreas Construidas de Diferencia Normalizada (NDBI), utiliza las bandas NIR y SWIR para resaltar las áreas construidas por el hombre.

El NDBI es un índice de área construida, según la proporción de construcción en cada pixel, sus valores van de -1 a 1, e indican, en forma creciente, el área construida. El BU representa distintas proporciones de vegetación y edificación, complementándose con el NDBI.

El índice se calculó a partir de las bandas SWIR (banda 5 en Landsat 7) y NIR (Banda 4 en Landsat 7), aplicando la ecuación:

Índice de Áreas Construidas de Diferencia Normalizada

$$NDBI = \left(\frac{B5 - B4}{B5 + B4} \right) \quad (6)$$

Dónde:

NDBI = El índice de áreas construidas de diferencia normalizada

B4 = NIR Infrarrojo Cercano

B5 = SWIR

3.5.6. Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI)

El Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI), nos permite generar una imagen que muestra la biomasa relativa.

El NDVI es un índice que nos ayuda a identificar la presencia de vegetación verde en la superficie, caracterizando su evolución a lo largo del tiempo.

En el mundo se prefiere para la vigilancia de la vegetación, debido a que ayuda a compensar los cambios en las condiciones de iluminación, pendiente de superficie, de aspecto y otros factores extraños.

El índice se calculó a partir de las bandas RED (R) (rojo – banda 3 en Landsat 7) y NIR (infrarrojo cercano – banda 4 en Landsat 7), aplicando la siguiente ecuación.

Índice de vegetación diferencial normalizado

$$NDVI = \left(\frac{B4 - B3}{B4 + B3} \right) \quad (7)$$

Dónde:

NDVI = Índice de Vegetación Diferencial Normalizado

B4 = NIR Infrarrojo Cercano

B3 = Red (R) Rojo

3.5.7. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)

El Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), destaca las áreas construidas y en suelo desnudo, dado a que estas superficies son más reflectivas en el SWIR (banda) que, en el NIR, También tiene en cuenta la reflectividad del suelo y permite aislar la información que aporta la vegetación, de la que precede del suelo que está bajo ella.

El índice se calculó a partir de las bandas RED (R) (banda 3 en Landsat 7) y NIR (Banda 4 en Landsat 7), aplicando la siguiente ecuación.

Índice de Vegetación Ajustado al Suelo

$$SAVI = \left(\frac{B4 - B3}{(B4 + B3)(1 + L)} \right) \quad (8)$$

Dónde:

SAVI = El índice de vegetación ajustado al suelo

B4 = NIR Infrarrojo Cercano

B3 = Red (R) Rojo

Siendo L un coeficiente de ajuste de vegetación, equivalente a 1, recomendado para densidades bajas de vegetación.

L= 1 (para bajas densidades de vegetación)

L= 0,5 (para medias densidades de vegetación)

L= 0,25 (para altas densidades de vegetación)

3.5.8. Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI)

El índice diferencial de agua normalizado (NDWI) es el índice que se basa en la interrelación entre las reflectividades en el infrarrojo de onda corta (SWIR) y en el NIR.

El índice se calculó a partir de las bandas SWIR (banda 5 en Landsat 7) y NIR (Banda 4 en Landsat 7).

Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI)

$$NDWI = \left(\frac{B4 - B5}{B4 + B5} \right) \quad (9)$$

Dónde:

NDWI = El índice diferencial de agua normalizado

B4 = NIR Infrarrojo Cercano

B5 = SWIR

3.5.9. Índice de Área construida (BU)

El índice de área construida surge de la diferencia del índice de vegetación normalizado (NDVI) y el índice de área construida. El presente índice muestra que a mayor índice de construcción menor índice de área verde.

El índice se calculó a partir de los índices NDBI y NDVI.

Índice de Vegetación Normalizado

$$BU = (NDBI - NDVI) \quad (10)$$

Dónde:

BU = El índice de área construida

NDBI = El índice de áreas construidas de diferencia normalizada

NDVI = El índice de vegetación diferencial normalizado

3.5.10. Validación de puntos

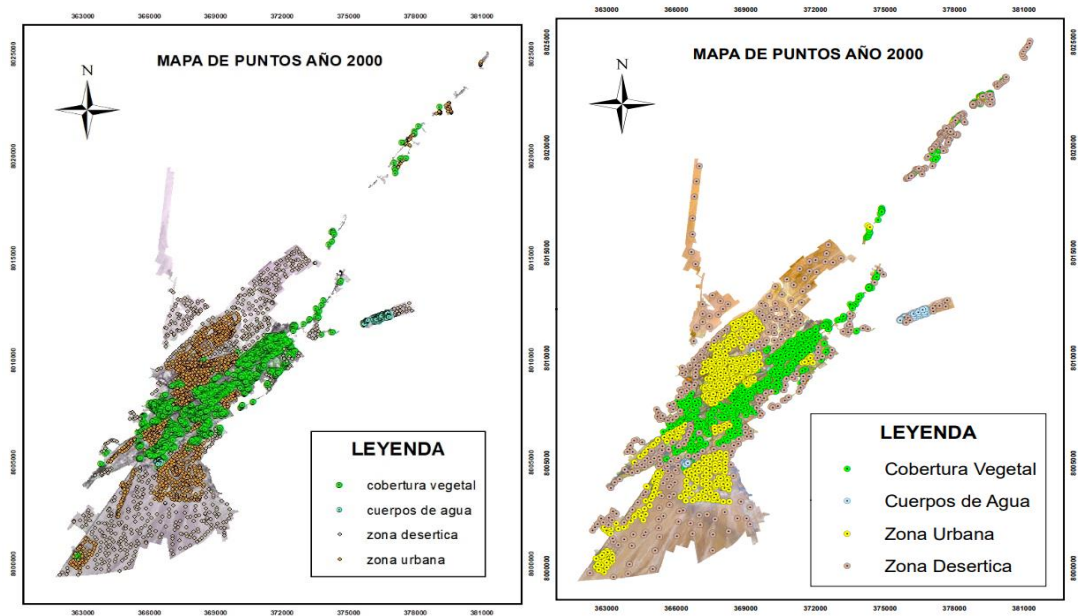
Primero se realizó la verificación de los puntos de entrenamiento, se tomaron puntos al azar en el modelo realizado, como muestras representativas de las distintas coberturas de interés (Cobertura Vegetal, Cuerpos de agua, Zonas desérticas y Zona Urbana). Se seleccionaron las imágenes satelitales procesadas para los periodos húmedos y secos. Como se muestra en las figuras 9 y 10.

Luego se realizó la clasificación supervisada haciendo una reclasificación de las coberturas de interés en la zona de estudio. Este procesamiento corresponde a la vectorización, utilizando las herramientas de ArcMap, asignando a cada pixel la clasificación ya antes mencionada. Este procesamiento se muestra en las figuras 11 y 12.

Finalmente se procedió con la validación de la clasificación supervisada, se realizó una comparación de muestras representativas de píxeles clasificados (puntos de validación tomados al azar) con coberturas reales del área de estudio. Para llevar a cabo este procedimiento se asignaron puntos de validación para las diferentes 4 clases de cobertura del presente estudio: cobertura vegetal (80 puntos), cuerpos de agua (50 puntos), zona urbana (100 puntos) y zona desértica (50 puntos). Esto se evidencia en la figura 13.

Figura 9

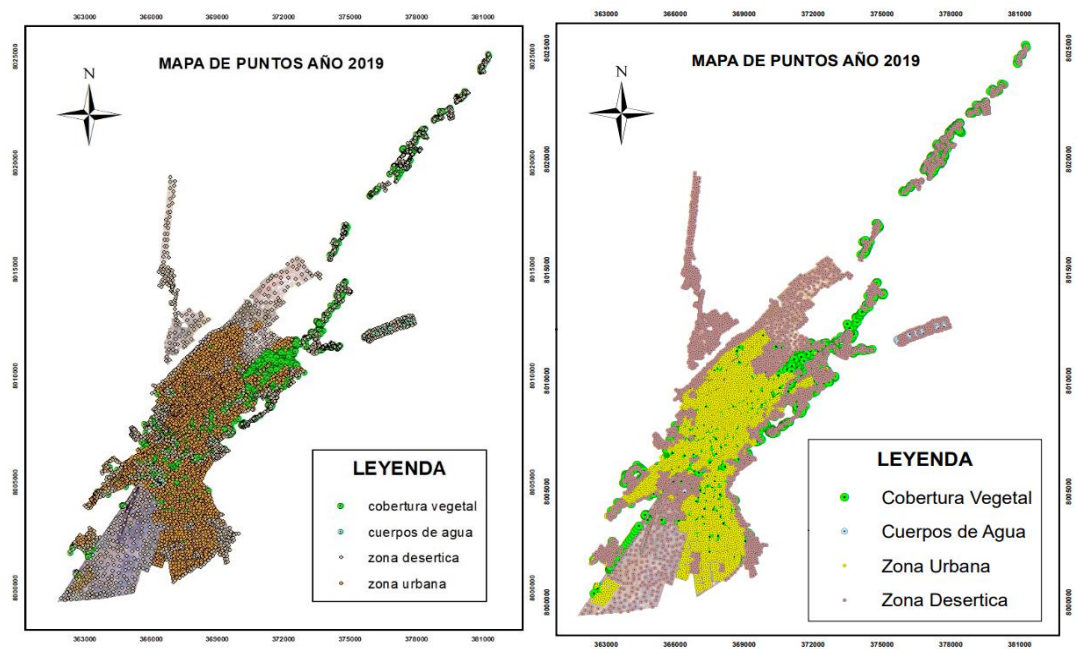
Ubicación de Puntos Aleatorios Año 2000



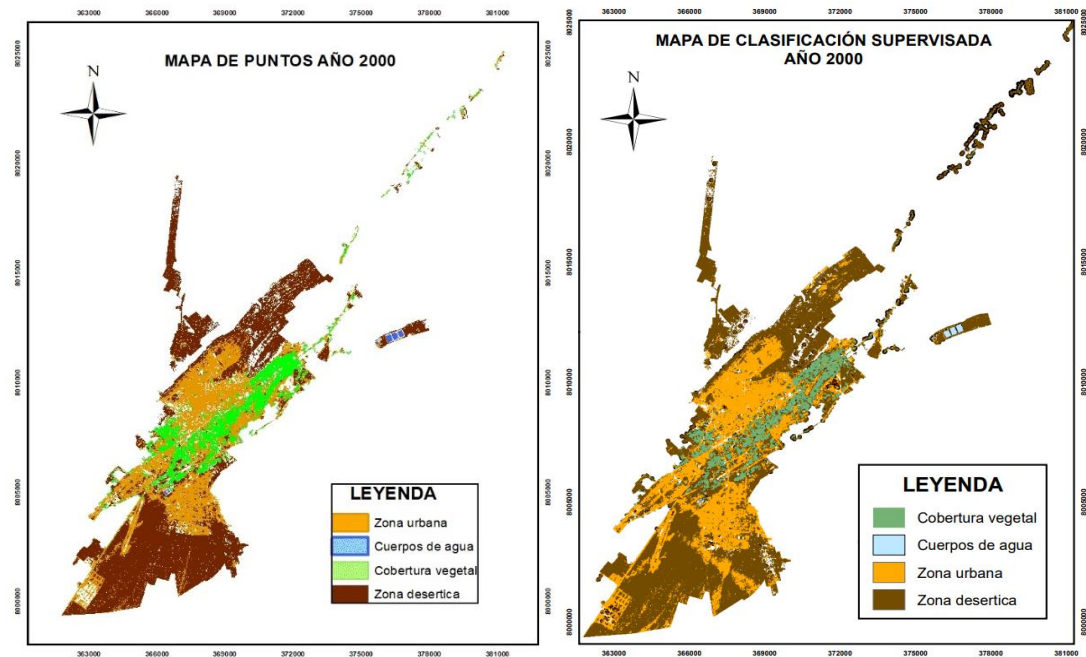
Nota. En la figura podemos observar las cuatro coberturas consideradas en la investigación a la izquierda se muestra el Periodo Húmedo y a la derecha el Periodo Seco.

Figura 10

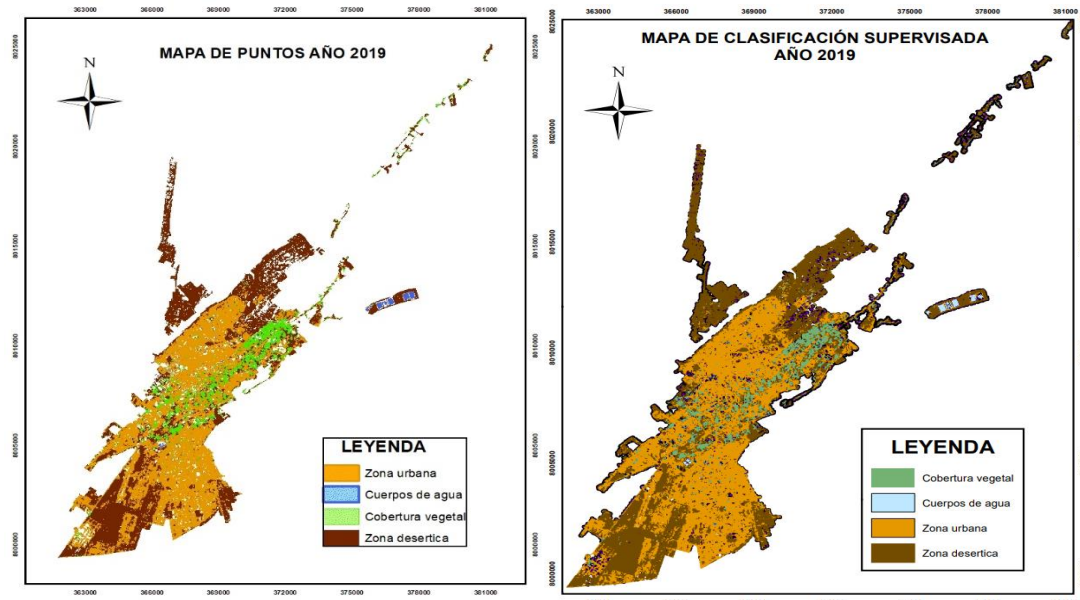
Ubicación de Puntos Aleatorios Año 2019



Nota. En la figura podemos observar las cuatro coberturas consideradas en la investigación a la izquierda se muestra el Periodo Húmedo y a la derecha el Periodo Seco.

Figura 11*Clasificación supervisada del año 2000*

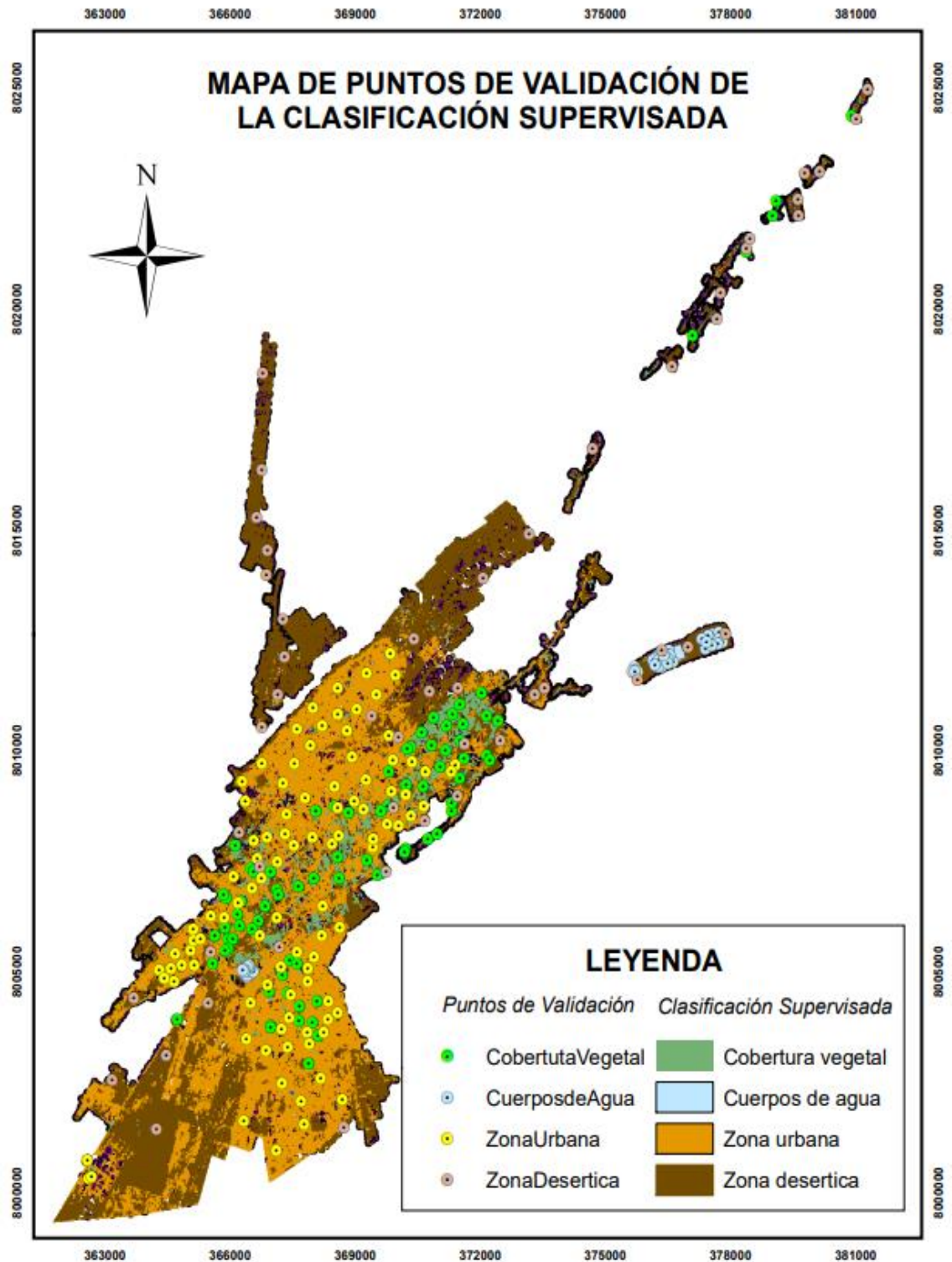
Nota. En la figura podemos observar cuatro coberturas, a la izquierda se muestra el Periodo Húmedo y a la derecha el Periodo Seco.

Figura 12*Clasificación supervisada del año 2019*

Nota. En la figura podemos observar cuatro coberturas, a la izquierda se muestra el Periodo Húmedo y a la derecha el Periodo Seco.

Figura 13

Validación de la Clasificación Supervisada



Nota. En la figura podemos observar los puntos de validación versus la clasificación supervisada, para la validación de los puntos de observación de la investigación.

También se realizó una supervisión en campo, ver figuras 14, 15, 16 y 17 para considerar otra metodología de validación de los resultados obtenidos en el modelo, para las cuatro categorías de clasificación. Para la validación de los puntos se tomaron varias coordenadas en las diferentes categorías.

A continuación, se presenta la tabla 10, de coordenadas tomadas en la fase de campo, y un panel fotográfico para la visualización de los resultados encontrado.

Tabla 10

Coordenadas tomadas en el área de estudio

Tipos de Coberturas	Coordenadas	
	Este	Norte
Cobertura Vegetal	372471	8010702
	371534	8010623
	370812	8009958
	370334	8010259
	366973	8007238
	365788	8005917
	364519	8005038
Cuerpos de Agua	375854	8012026
	375673	8011943
	375613	8011871
	366186	8004636
Zona Urbana	369958	8009939
	369855	8009050
	366199	8006567
	365854	8006301
	366457	8004209
Zona Desértica	375457	8011854
	375152	8011800
	365559	8005250
	364682	8004740

Nota. En la tabla podemos observamos los puntos de validación en la fase de campo.

Figura 14

Validación en Campo de la Clasificación de Cobertura Vegetal



Nota. La imagen superior corresponde a la imagen satelital tomada de Google Earth. En la parte central a la derecha el punto de ubicación 2 coordenada este 371534, norte 8010623 y a la izquierda el punto 5 de coordenadas este 366973 y norte 8007238. En la parte posterior a la izquierda el punto 6 de coordenadas este 365788, norte 8005917, a la derecha el punto de ubicación 7 de coordenadas este 364519, norte 8005038.

Figura 15

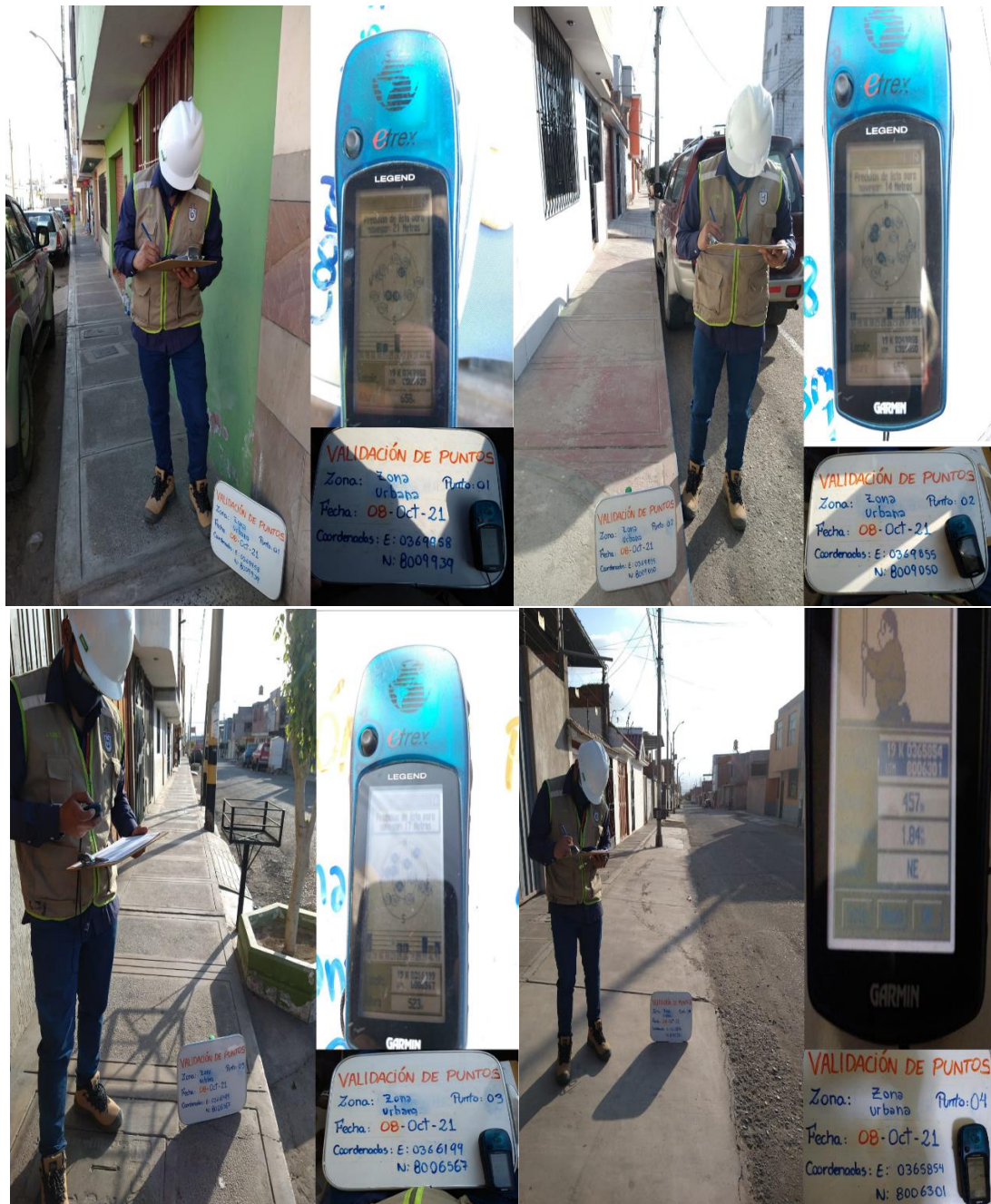
Validación en Campo de la Clasificación de Cuerpos de Agua



Nota. La imagen superior corresponde a la imagen satelital tomada de Google Earth. En la parte posterior a la izquierda el punto de ubicación de coordenadas este 375854, norte 8012026, a la derecha el punto de ubicación de coordenadas este 375673, norte 8011943.

Figura 16

Validación en Campo de la Clasificación de Zona Urbana



Nota. En la parte superior izquierda el punto de ubicación 1 de coordenadas este 369958, norte 8009939, a la derecha el punto de ubicación 2 de coordenadas este 369855, norte 8009050. En la parte posterior izquierda punto de ubicación 3 de coordenadas este 366199, norte 8006567, a la derecha el punto de ubicación 4 de coordenadas este 365854, norte 8006301.

Figura 17

Validación en Campo de la Clasificación de Zona Desértica



Nota. En la parte superior izquierda el punto de ubicación 1 de coordenadas este 375457, norte 8011854, a la derecha el punto de ubicación 2 de coordenadas este 375152, norte 8011800. En la parte posterior izquierda punto de ubicación 3 de coordenadas este 365559, norte 8005250, a la derecha el punto de ubicación 4 de coordenadas este 364682, norte 8004740.

A continuación, en la tabla 11, se presenta los resultados obtenidos para clasificación de kappa, basados en la data de la tabla de atributos del software ArcGis.

Tabla 11*Clasificación de Kappa*

Año 2004							
Clases	Cobertura Vegetal	Cuerpos de agua	Zona Urbana	Zona desértica	Total (User)	User (%)	Producer (%)
Cobertura Vegetal	80	0	0	0	80	100,000	100,000
Cuerpos de agua	0	98	1	1	100	98,000	100,000
Zona Urbana	0	0	50	0	50	100,000	98,039
Zona Desértica	0	0	0	50	50	100,000	98,039
Total (Producer)	80	98	51	51	280	398,000	396,078
Classified Pixel	278	Overall Accuracy				99,286	%
Total, Pixel	280	Índice de Kappa				99,019	%
Año 2005							
Cobertura Vegetal	78	0	2	0	80	97,500	100,000
Cuerpos de agua	0	45	2	3	50	90,000	93,750
Zona Urbana	0	0	100	0	100	100,000	96,154
Zona Desértica	0	3	0	47	50	94,000	94,000
Total (Producer)	78	48	104	50	280	381,500	383,904
Classified Pixel	270	Overall Accuracy				96,429	%
Total, Pixel	280	Índice de Kappa				95,076	%
Año 2008							
Cobertura Vegetal	80	0	0	0	80	100,000	100,000
Cuerpos de agua	0	99	0	1	100	99,000	98,020
Zona Urbana	0	0	50	0	50	100,000	98,039
Zona Desértica	0	2	1	47	50	94,000	97,917
Total (Producer)	80	101	51	48	280	393,000	393,976
Classified Pixel	276	Overall Accuracy				98,571	%
Total, Pixel	280	Índice de Kappa				98,033	%
Año 2009							
Cobertura Vegetal	80	0	0	0	80	100,000	100,000
Cuerpos de agua	0	99	0	1	100	99,000	98,020
Zona Urbana	0	0	50	0	50	100,000	98,039
Zona Desértica	0	2	1	47	50	94,000	97,917
Total (Producer)	80	101	51	48	280	393,000	393,976
Classified Pixel	276	Overall Accuracy				98,571	%
Total, Pixel	280	Índice de Kappa				98,033	%

Nota. Clasificación para la validación de datos de la investigación.

CAPITULO IV: RESULTADOS

4.1. Índice de Áreas Construidas de Diferencia Normalizada (NDBI)

De acuerdo al primer objetivo específico planteado: Determinar la zona urbana en la ciudad de Tacna haciendo uso del Índice de Áreas Construidas de Diferencia Normalizada (NDBI). En la tabla 12, Haciendo el procesamiento considerado en la parte metodológica de la investigación tenemos como resultado que el valor más bajo de crecimiento de áreas construidas en el periodo húmedo fue de 17,3 Km² en el año 2000, y el valor más alto fue de 26,5 Km² en el año 2019. Para el periodo seco el valor más bajo de crecimiento de áreas construidas fue de 18,5 Km² en el año 2000, y el valor más alto fue de 27,8 Km² en el año 2019, ver figuras 18, 19,20 y 21.

Tabla 12

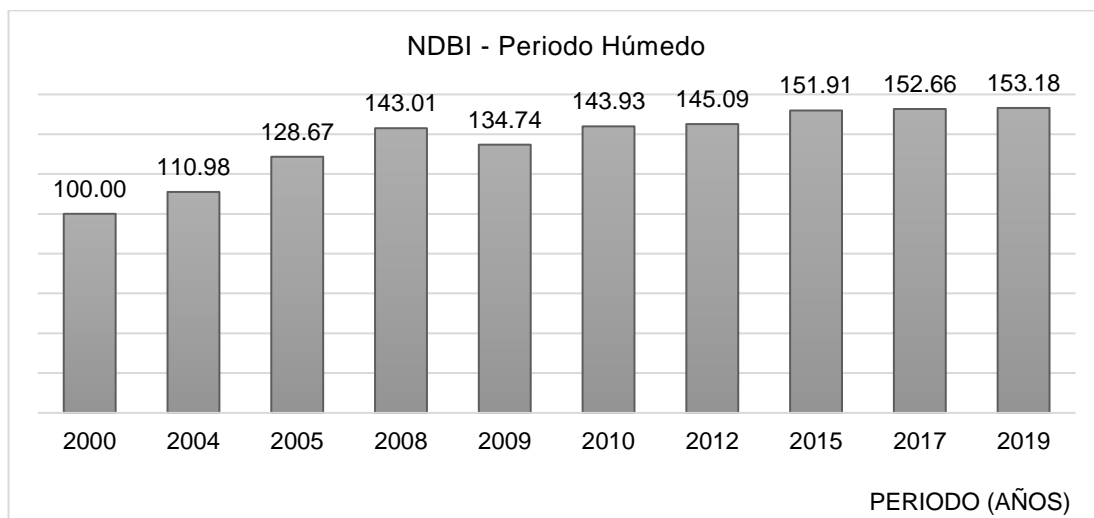
Resultado del Índice de Áreas Construidas de Diferencia Normalizada (NDBI)

Tiempo (años)	Área (Km ²)	%	Crecimiento urbano
Periodo Húmedo			
2000	17,30	100,00	0
2004	19,20	110,98	10,98
2005	22,26	128,67	28,67
2008	24,74	143,01	43,01
2009	23,31	134,74	34,74
2010	24,90	143,93	43,93
2012	25,10	145,09	45,09
2015	26,28	151,91	51,91
2017	26,41	152,66	52,66
2019	26,50	153,18	53,18
Periodo Seco			
2000	18,50	100,00	0
2004	20,06	108,43	8,43
2005	24,26	131,14	31,14
2008	26,3	142,16	42,16
2009	25,6	138,38	38,38
2010	26,74	144,54	44,54
2012	26,98	145,84	45,84
2015	27,12	146,59	46,59
2017	27,62	149,30	49,30
2019	27,80	150,27	50,27

Nota. Consideramos los datos de área del formato vectorial de los resultados, el porcentaje considerando el como referencia el año menor y el valor de crecimiento urbano en cada periodo.

Figura 18

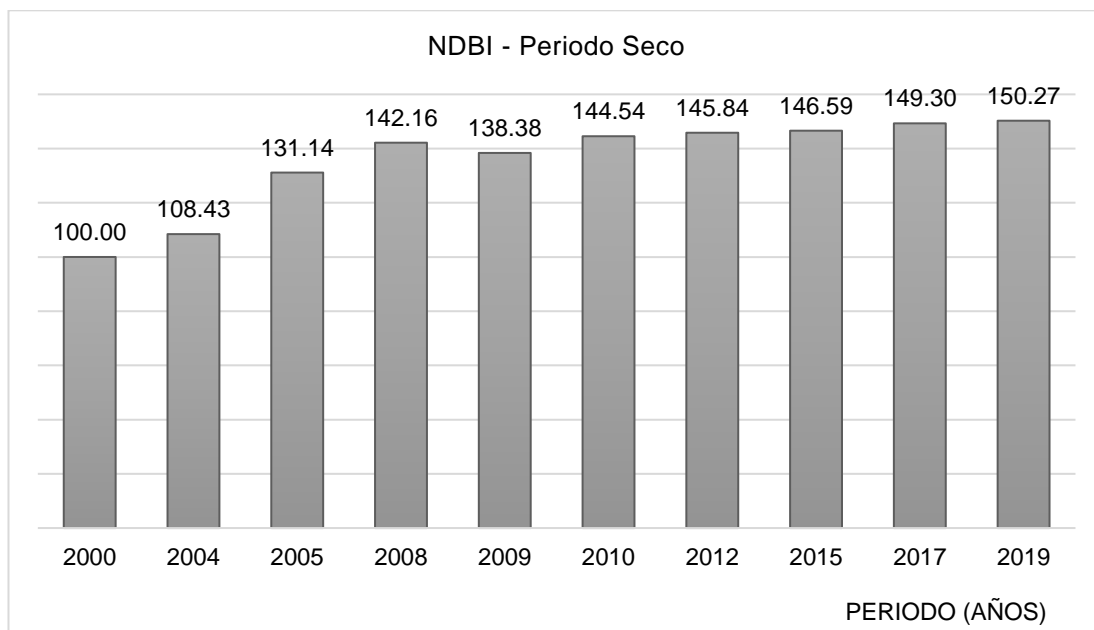
Porcentaje de Crecimiento del Índice NDBI en el Periodo Húmedo



Nota. Observamos que en el año 2019 presenta un incremento del 53 % con respecto al año 2000.

Figura 19

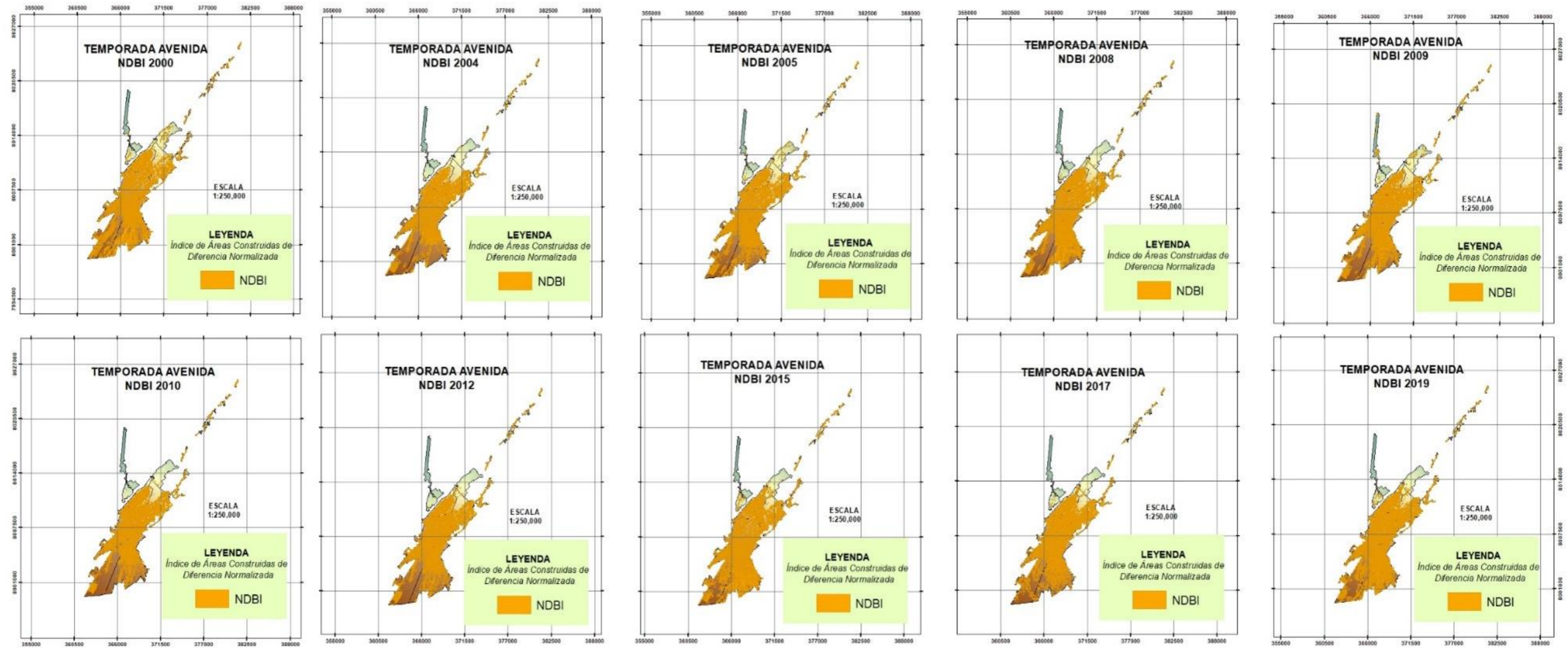
Porcentaje de Crecimiento del Índice NDBI en el Periodo Seco



Nota. Observamos que en el año 2019 presenta un incremento del 50 % con respecto al año 2000.

Figura 20

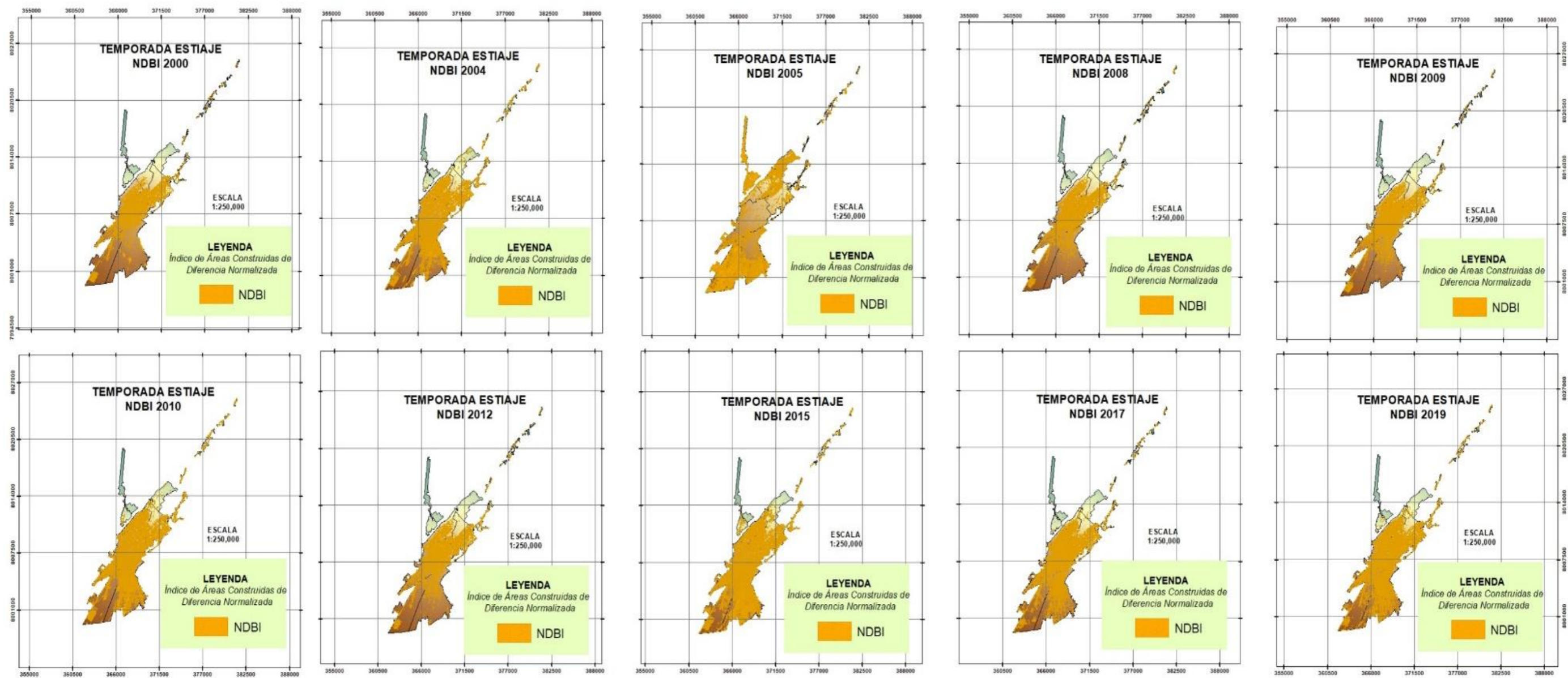
Resultado Multitemporal del índice NDBI en el Periodo Húmedo



Nota. Se muestra el análisis multitemporal desde el año 2000 hasta el año 2019, en el cual se puede apreciar el aumento del área de construcción en la zona de estudio.

Figura 21

Resultado Multitemporal del índice NDBI en el Periodo Seco



Nota. Se muestra el análisis multitemporal desde el año 2000 hasta el año 2019, en el cual se puede apreciar el aumento del área de construcción en la zona de estudio.

4.2. Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI)

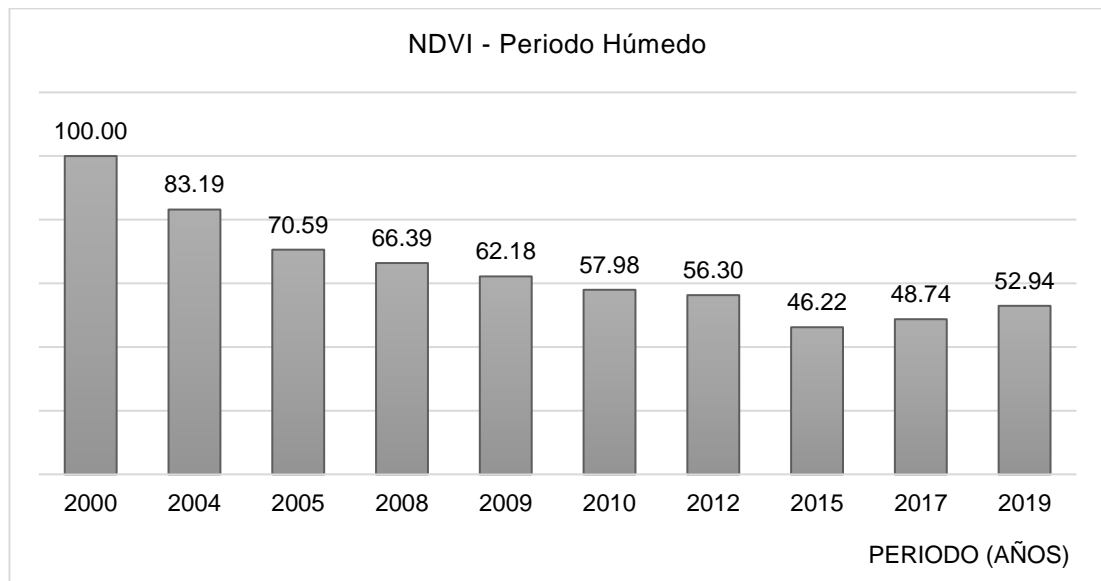
En cuanto al segundo objetivo específico que nos proponemos: Establecer la relación que existe entre el crecimiento poblacional y el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI). En la tabla 13, se identifica que existe significancia estadística entre los años para el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), se identificó que en el periodo húmedo el año 2000 que tiene el valor más alto con 1,19 Km² y la más baja corresponde al año 2015 con 0,55 de extensión en Km². Para el periodo seco el año 2000 presenta el valor más alto con 1,03 Km² y la más baja corresponde al año 2015 con 0,45 de extensión en Km², ver figuras 22, 23, 24 y 25.

Tabla 13

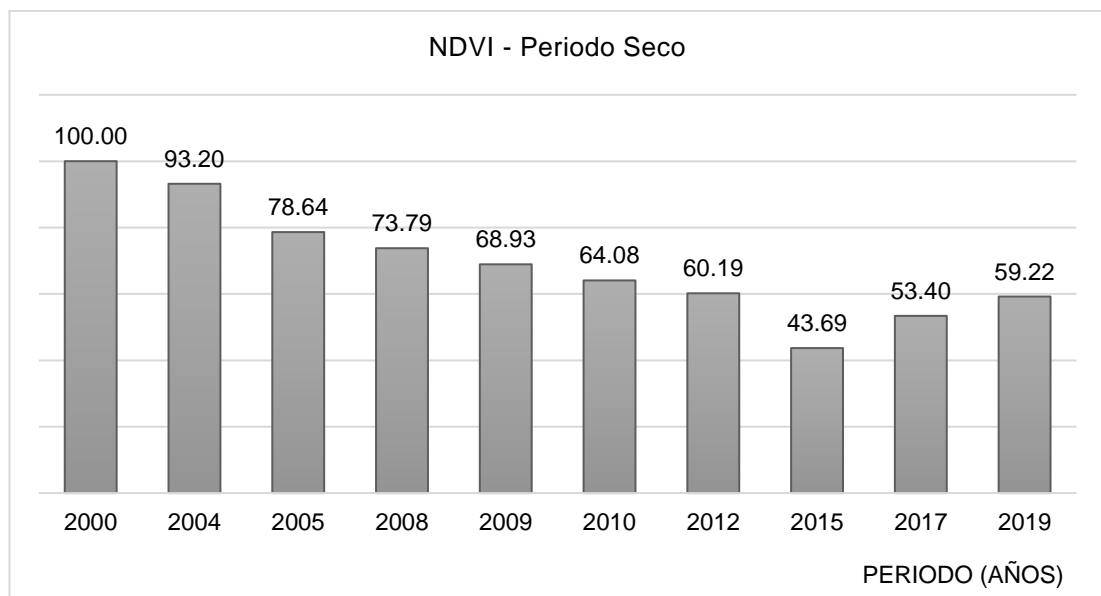
Resultado del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI)

Tiempo (años)	Área (Km ²)	%	Crecimiento urbano
Periodo Húmedo			
2000	1,19	100,00	0
2004	0,99	83,19	16,81
2005	0,84	70,59	29,41
2008	0,79	66,39	33,61
2009	0,74	62,18	37,82
2010	0,69	57,98	42,02
2012	0,67	56,30	43,70
2015	0,55	46,22	53,78
2017	0,58	48,74	51,26
2019	0,63	52,94	47,06
Periodo Seco			
2000	1,03	100,00	0
2004	0,96	93,20	6,80
2005	0,81	78,64	21,36
2008	0,76	73,79	26,21
2009	0,71	68,93	31,07
2010	0,66	64,08	35,92
2012	0,62	60,19	39,81
2015	0,45	43,69	56,31
2017	0,55	53,40	46,60
2019	0,61	59,22	40,78

Nota. Consideramos los datos de área del formato vectorial de los resultados, el porcentaje considerando el como referencia el año menor y el valor de crecimiento urbano en cada periodo.

Figura 22*Porcentaje de Crecimiento del Índice NDVI en el Periodo Húmedo*

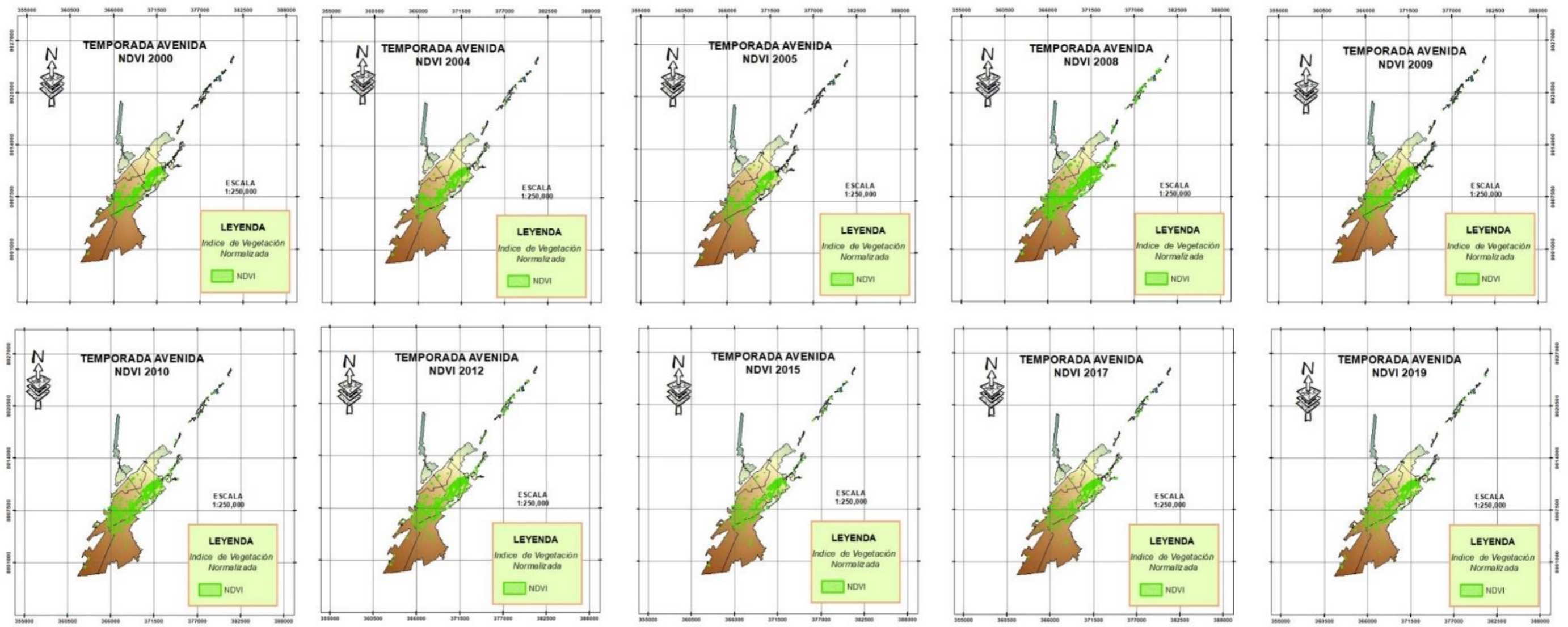
Nota. Observamos que en el año 2019 presenta un descenso del 53 % con respecto al año 2000.

Figura 23*Porcentaje de Crecimiento del Índice NDVI en el Periodo Seco*

Nota. Observamos que en el año 2019 presenta un descenso del 59 % con respecto al año 2000.

Figura 24

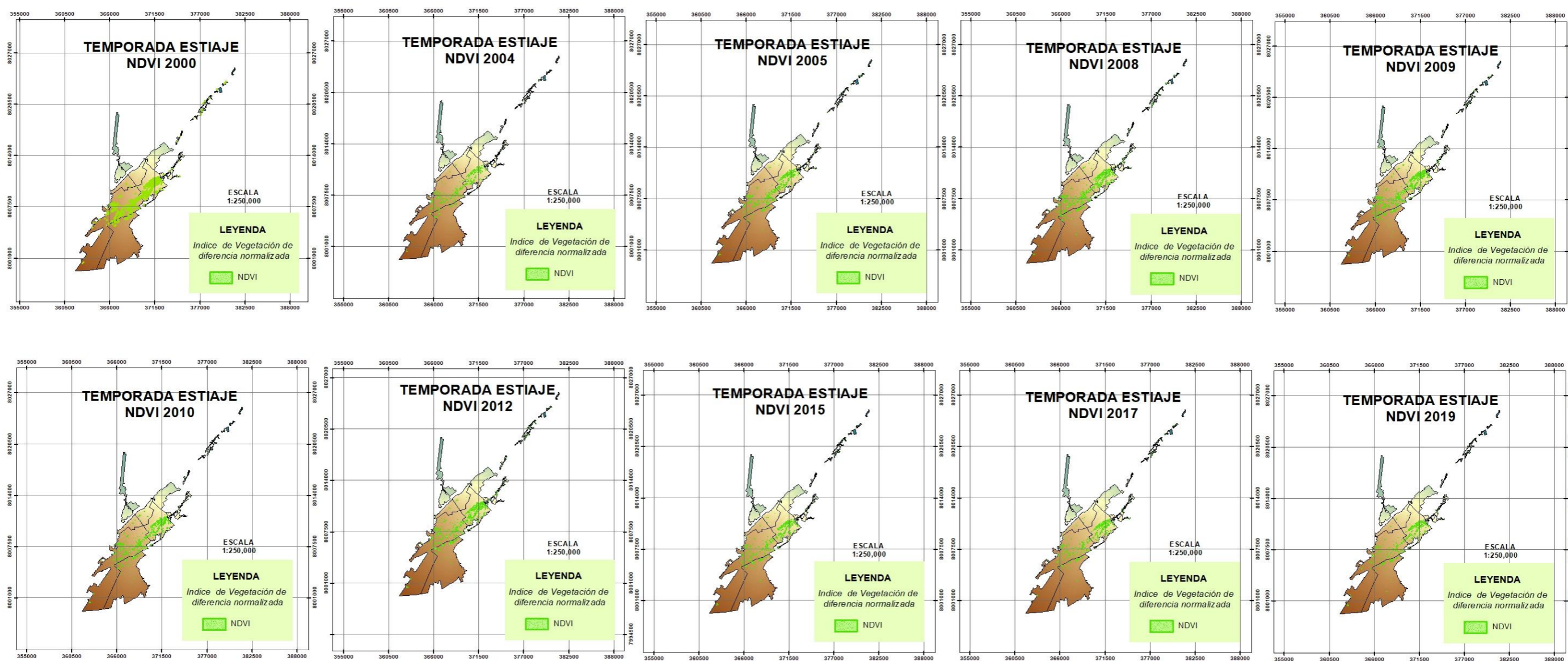
Resultado Multitemporal del índice NDVI en el Periodo Húmedo



Nota. Se muestra el análisis multitemporal desde el año 2000 hasta el año 2019, en el cual se puede apreciar el descenso del área de cobertura vegetal en la zona de estudio.

Figura 25

Resultado Multitemporal del índice NDVI en el Periodo Seco



Nota. Se muestra el análisis multitemporal desde el año 2000 hasta el año 2019, en el cual se puede apreciar el descenso del área de cobertura vegetal en la zona de estudio.

4.3. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)

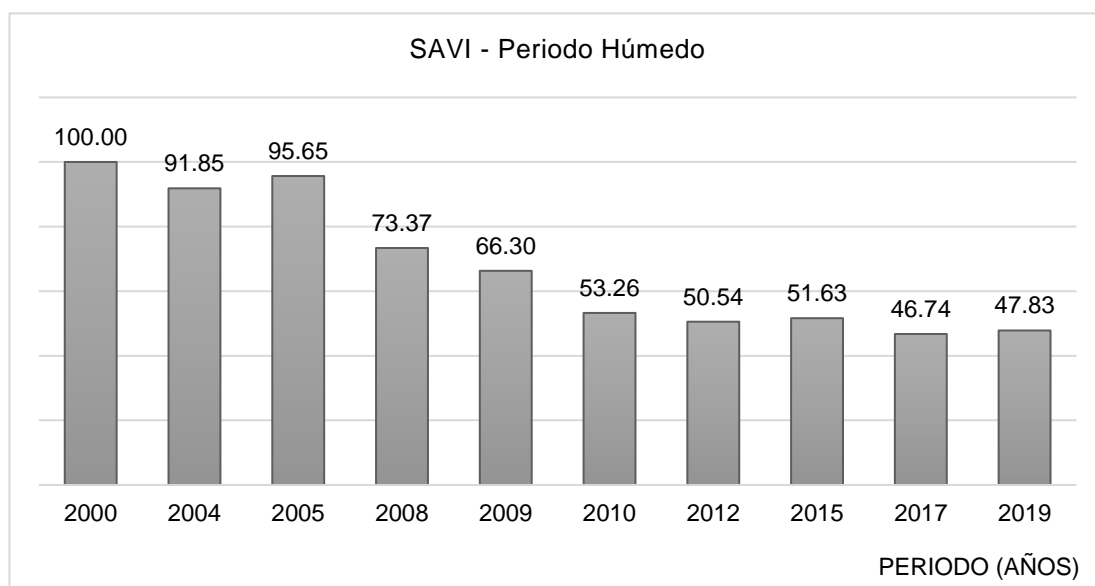
Con respecto al tercer objetivo específico propuesto: Explicar la relación que existe entre el crecimiento poblacional y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI). Se puede observar en la tabla 14, que se experimentaron cambios a través del período de tiempo considerado para este estudio en el periodo húmedo, siendo el año 2017 con un valor de crecimiento mínimo de 0,86 Km², y siendo el año 2000 el más significativo con un valor de crecimiento de 1,84 Km². Para el periodo seco también se experimentaron cambios siendo el año 2019 el menos significativo con un valor de crecimiento de 0,81 Km², y siendo el año 2000 el más significativo con un valor de crecimiento de 1,75 Km², ver figuras 26, 27, 28 y 29.

Tabla 14

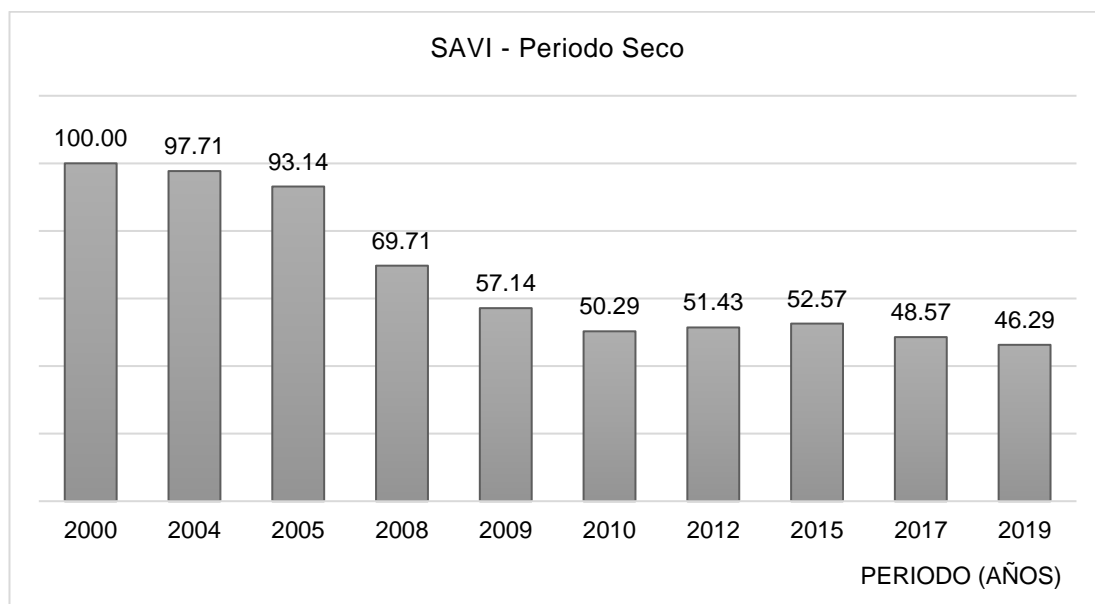
Resultado del Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)

Tiempo (años)	Área (Km ²)	%	Crecimiento urbano
Periodo Húmedo			
2000	1,84	100,00	0
2005	1,69	91,85	8,15
2004	1,76	95,65	4,35
2008	1,35	73,37	26,63
2009	1,22	66,30	33,70
2010	0,98	53,26	46,74
2012	0,93	50,54	49,46
2015	0,95	51,63	48,37
2017	0,86	46,74	53,26
2019	0,88	47,83	52,17
Periodo Seco			
2000	1,75	100,00	0
2004	1,71	97,71	2,29
2005	1,63	93,14	6,86
2008	1,22	69,71	30,29
2009	1,00	57,14	42,86
2010	0,88	50,29	49,71
2012	0,9	51,43	48,57
2015	0,92	52,57	47,43
2017	0,85	48,57	51,43
2019	0,81	46,29	53,71

Nota, Consideramos los datos de área del formato vectorial de los resultados, el porcentaje considerando el como referencia el año menor y el valor de crecimiento urbano en cada periodo.

Figura 26*Porcentaje de Crecimiento del Índice SAVI en el Periodo Húmedo*

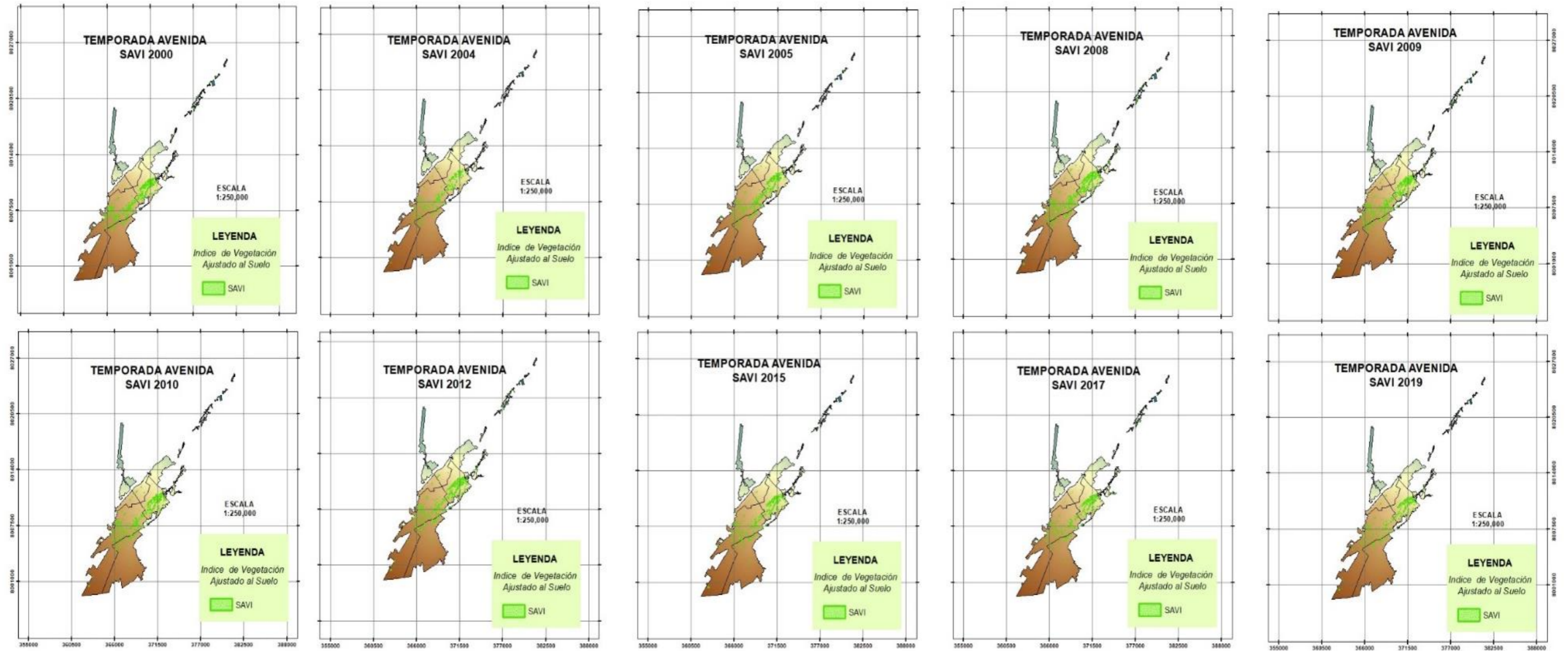
Nota. Observamos que en el año 2019 presenta un descenso del 48 % con respecto al año 2000.

Figura 27*Porcentaje de Crecimiento del Índice SAVI en el Periodo Seco*

Nota. Observamos que en el año 2019 presenta un descenso del 46 % con respecto al año 2000.

Figura 28

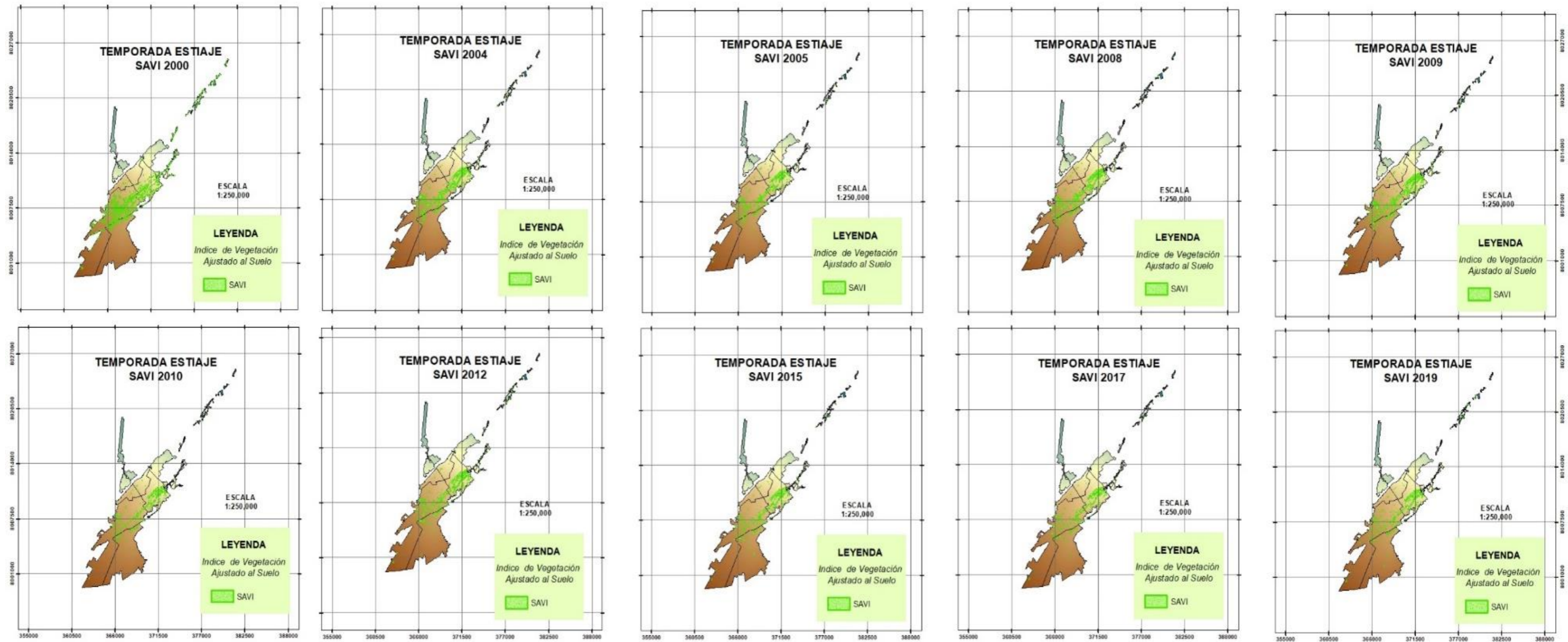
Resultado Multitemporal del índice SAVI en el Periodo Húmedo



Nota. Se muestra el análisis multitemporal desde el año 2000 hasta el año 2019, en el cual se puede apreciar el descenso del área de suelo desnudo en la zona de estudio.

Figura 29

Resultado Multitemporal del índice SAVI en el Periodo Seco



Nota. Se muestra el análisis multitemporal desde el año 2000 hasta el año 2019, en el cual se puede apreciar el descenso del área de suelo desnudo en la zona de estudio.

4.4. Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI)

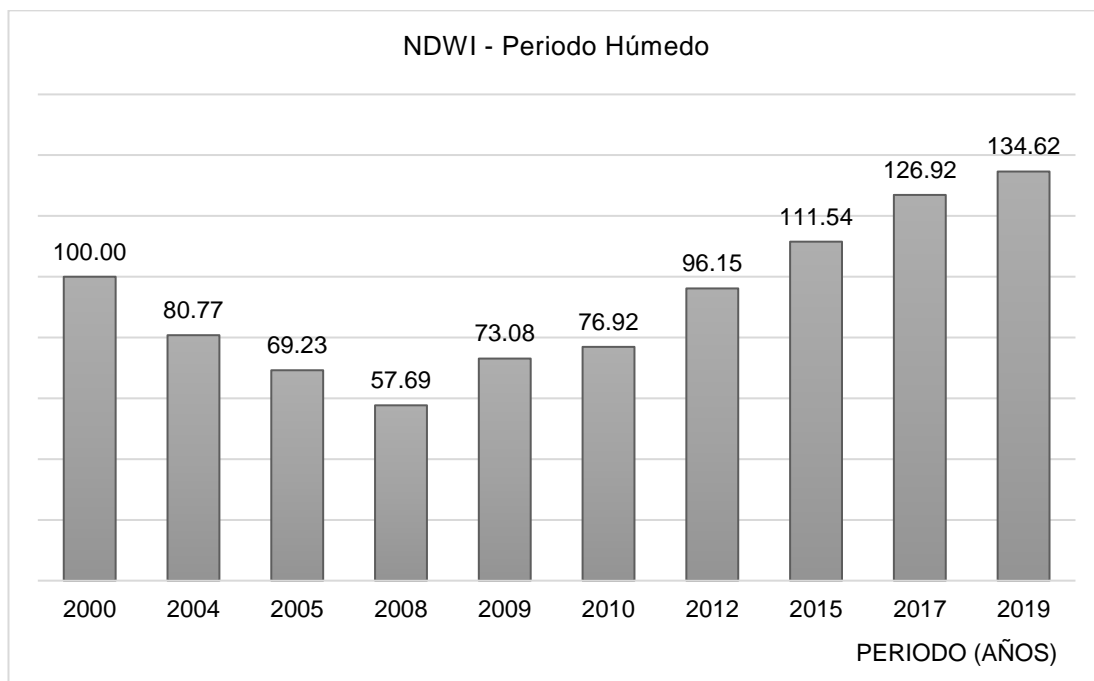
En la investigación como objetivo específico 4 se propuso: Establecer la relación que existe entre el crecimiento poblacional y el Índices de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI). En la tabla 15, se muestran los resultados obtenidos para el índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI). Para el periodo húmedo se apreciaron cambios significativos en los años 2008 y 2019, siendo los valores de 0,15 Km² y 0,35 Km² respectivamente. En el periodo seco se experimentaron cambios significativos en los años 2008 y 2019, siendo los valores de 0,15 Km² y 0,34 Km² respectivamente, ver figuras 30, 31, 32 y 33.

Tabla 15

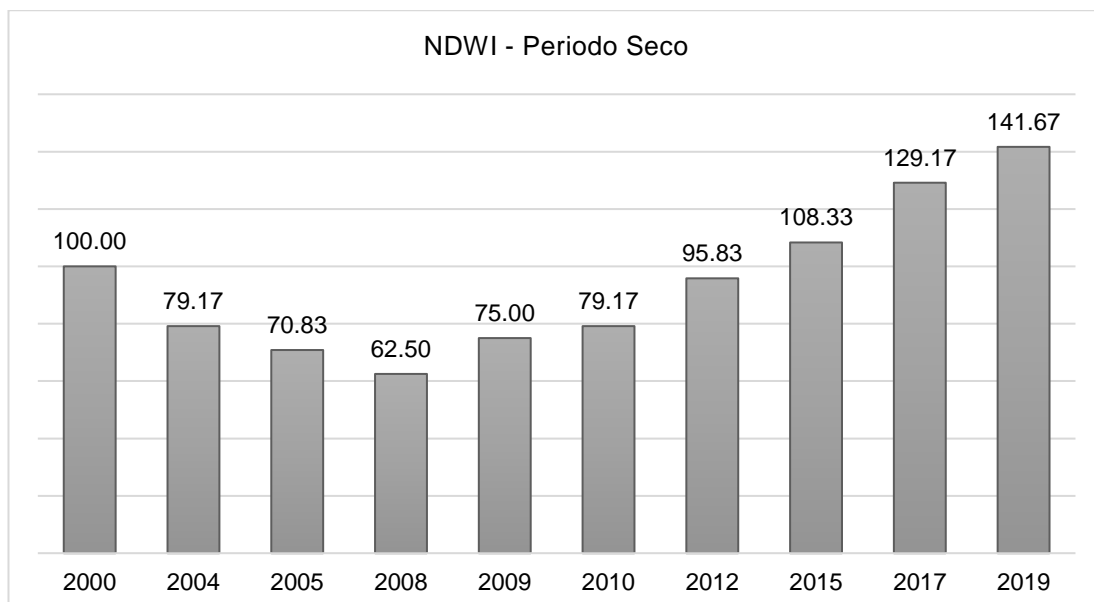
Resultado del Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI)

Tiempo (años)	Área (Km ²)	%	Crecimiento urbano
Periodo Húmedo			
2000	0,26	100,00	0,00
2004	0,21	80,77	19,23
2005	0,18	69,23	30,77
2008	0,15	57,69	42,31
2009	0,19	73,08	26,92
2010	0,2	76,92	23,08
2012	0,25	96,15	3,85
2015	0,29	111,54	11,54
2017	0,33	126,92	26,92
2019	0,35	134,62	34,62
Periodo Seco			
2000	0,24	100,00	0
2004	0,19	79,17	20,83
2005	0,17	70,83	29,17
2008	0,15	62,50	37,50
2009	0,18	75,00	25,00
2010	0,19	79,17	20,83
2012	0,23	95,83	4,17
2015	0,26	108,33	8,33
2017	0,31	129,17	29,17
2019	0,34	141,67	41,67

Nota. Consideramos los datos de área del formato vectorial de los resultados, el porcentaje considerando el como referencia el año menor y el valor de crecimiento urbano en cada periodo.

Figura 30*Porcentaje de Crecimiento del Índice NDWI en el Periodo Húmedo*

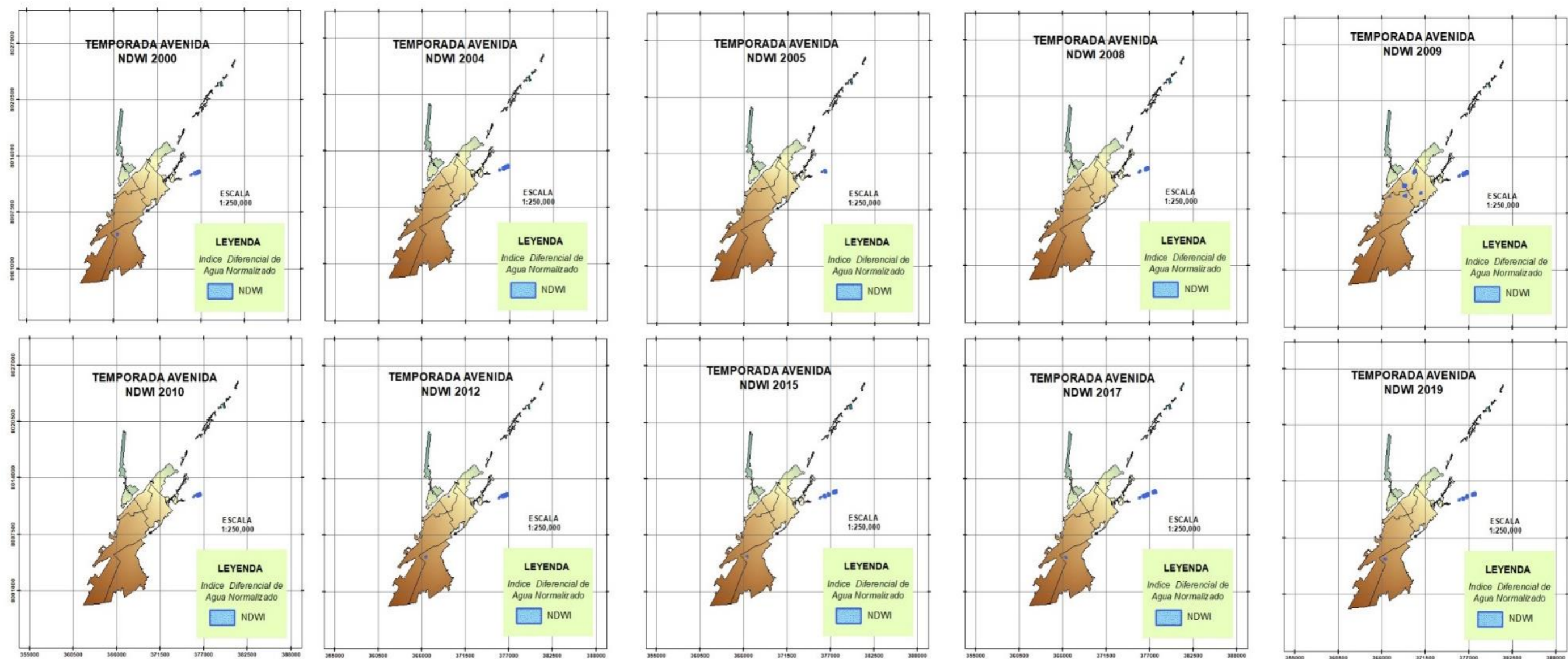
Nota. Observamos que en el año 2019 presenta un aumento del 35 % con respecto al año 2000.

Figura 31*Porcentaje de Crecimiento del Índice NDWI en el Periodo Seco*

Nota. Observamos que en el año 2019 presenta un aumento del 41 % con respecto al año 2000.

Figura 32

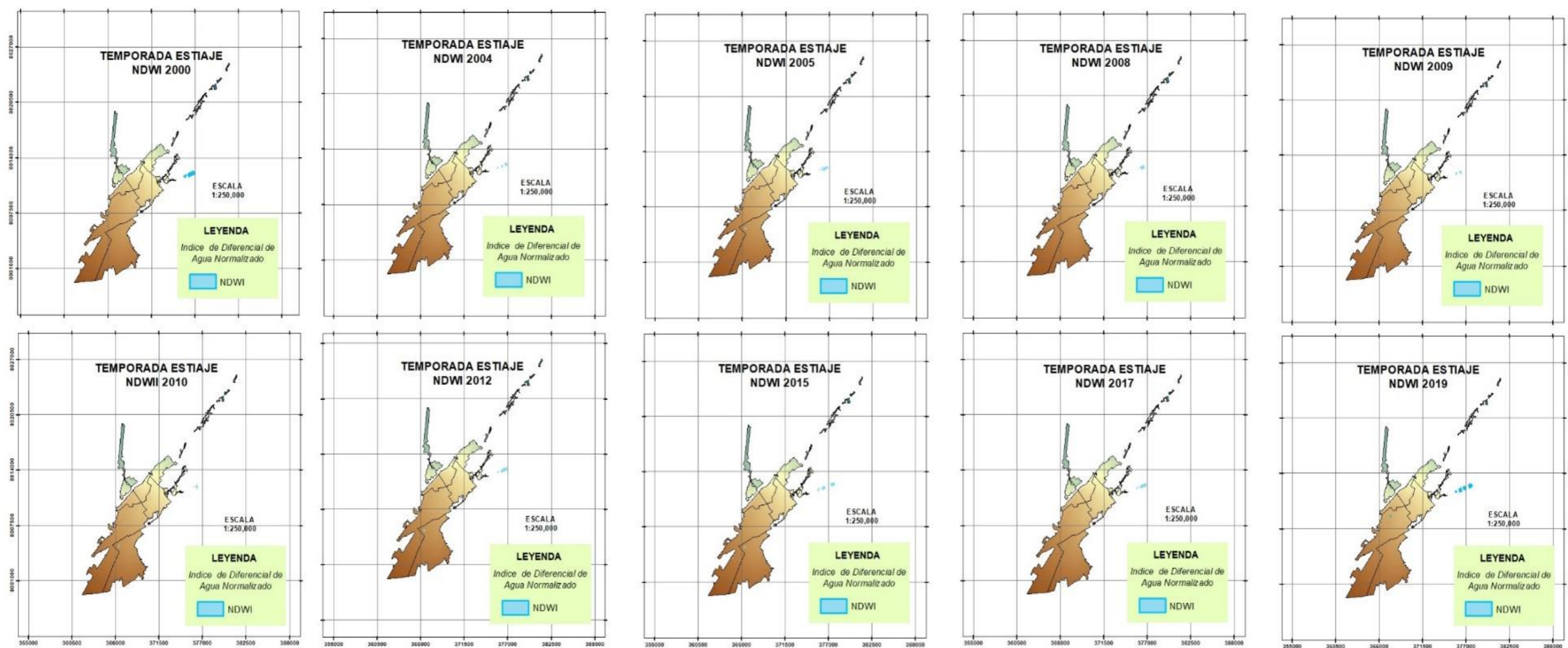
Resultado Multitemporal del índice NDWI en el Periodo Húmedo



Nota. Se muestra el análisis multitemporal desde el año 2000 hasta el año 2019, en el cual se puede apreciar el aumento del área de cuerpos de agua en la zona de estudio.

Figura 33

Resultado Multitemporal del índice NDWI en el Periodo Seco



Nota. Se muestra el análisis multitemporal desde el año 2000 hasta el año 2019, en el cual se puede apreciar el aumento del área de cuerpos de agua en la zona de estudio.

4.5. Crecimiento Poblacional y los Índices de Calidad Ambiental

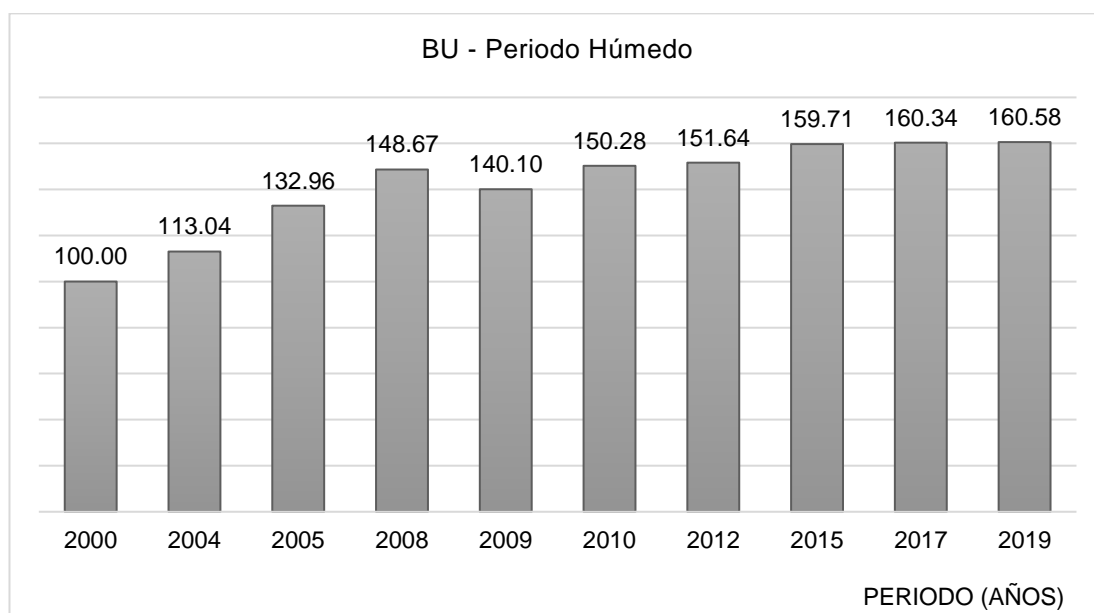
En cuanto al objetivo principal se propuso: Determinar la relación que existe entre el crecimiento poblacional y su influencia en el índice de calidad ambiental en la zona urbana de la ciudad de Tacna. Para este resultado se consideró el Índice de Área Construida (BU), ver tabla 16. En cuanto a los resultados podemos observar que todas las coberturas en general experimentaron cambios a través del período de tiempo considerado periodo húmedo, siendo el año 2019 más significativos con un valor de hasta 25,87 Km² y teniendo para el año 2000 el menos significativo con un total de 16,11 Km² de superficie con áreas construidas. Para la época de estiaje obtuvimos que el año 2019 fue el más significativo con un valor de hasta 27,19 Km² y teniendo para el año 2000 el menos significativo con un total de 17,47 Km² de superficie con áreas construida, ver figura 34, 35, 36 y 37.

Tabla 16

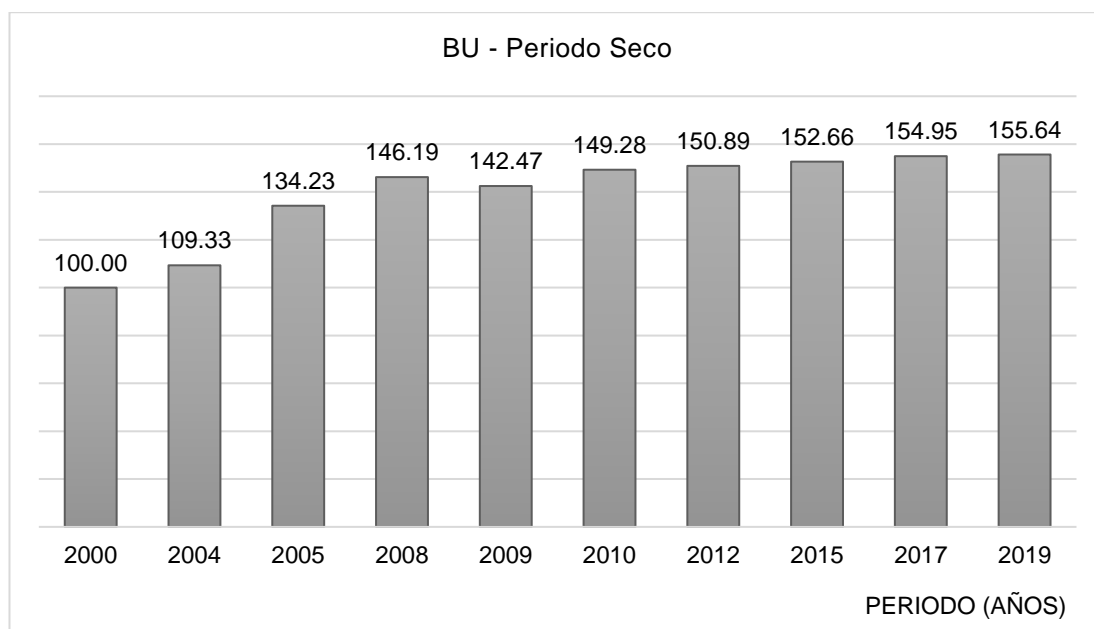
Resultado del Índice de Área Construida (BU)

Tiempo (años)	Área (Km2)	%	Crecimiento urbano
Periodo Húmedo			
2000	16,11	100,00	0
2004	18,21	113,04	13,04
2005	21,42	132,96	32,96
2008	23,95	148,67	48,67
2009	22,57	140,10	40,10
2010	24,21	150,28	50,28
2012	24,43	151,64	51,64
2015	25,73	159,71	59,71
2017	25,83	160,34	60,34
2019	25,87	160,58	60,58
Periodo Seco			
2000	17,47	100,00	0
2004	19,1	109,33	9,33
2005	23,45	134,23	34,23
2008	25,54	146,19	46,19
2009	24,89	142,47	42,47
2010	26,08	149,28	49,28
2012	26,36	150,89	50,89
2015	26,67	152,66	52,66
2017	27,07	154,95	54,95
2019	27,19	155,64	55,64

Nota. Consideramos los datos de área del formato vectorial de los resultados, el porcentaje considerando el como referencia el año menor y el valor de crecimiento urbano en cada periodo.

Figura 34*Porcentaje de Crecimiento del Índice BU en el Periodo Húmedo*

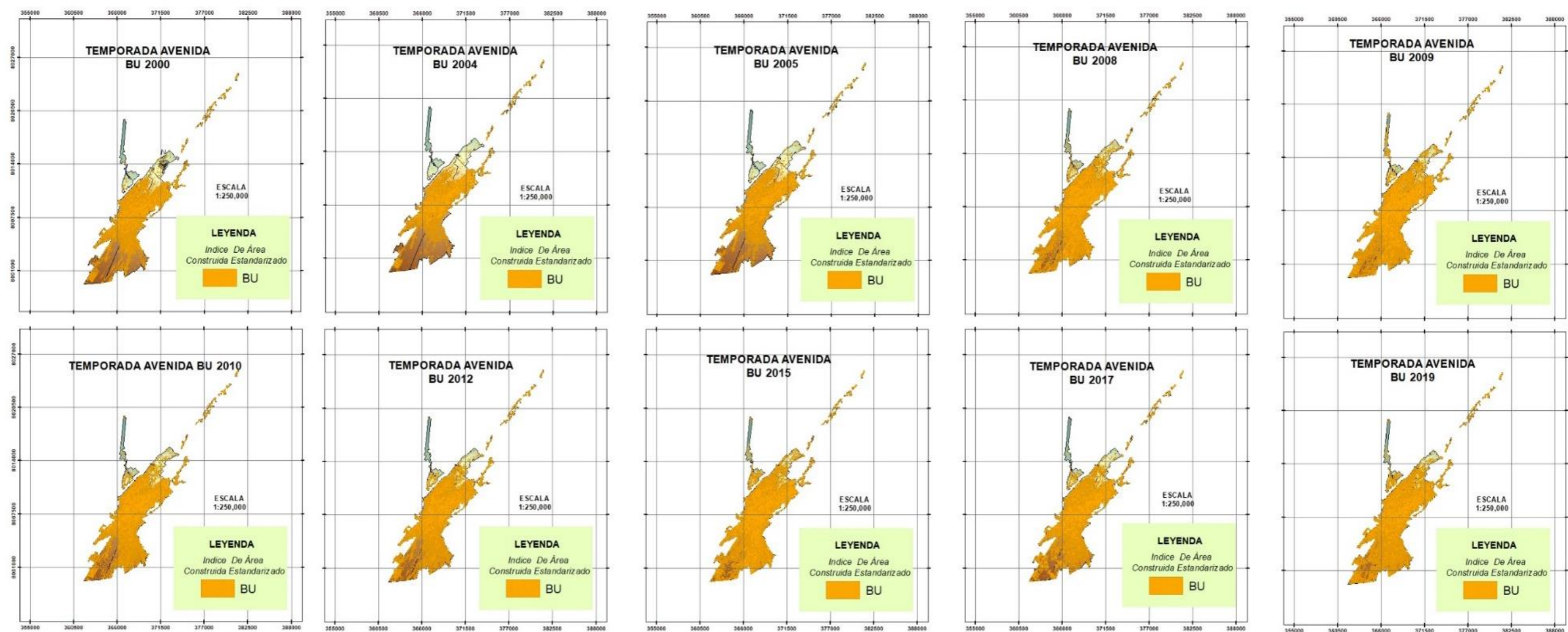
Nota. Observamos que en el año 2019 presenta un aumento del 61 % con respecto al año 2000.

Figura 35*Porcentaje de crecimiento del índice BU en Periodo Seco*

Nota. Observamos que en el año 2019 presenta un aumento del 56 % con respecto al año 2000.

Figura 36

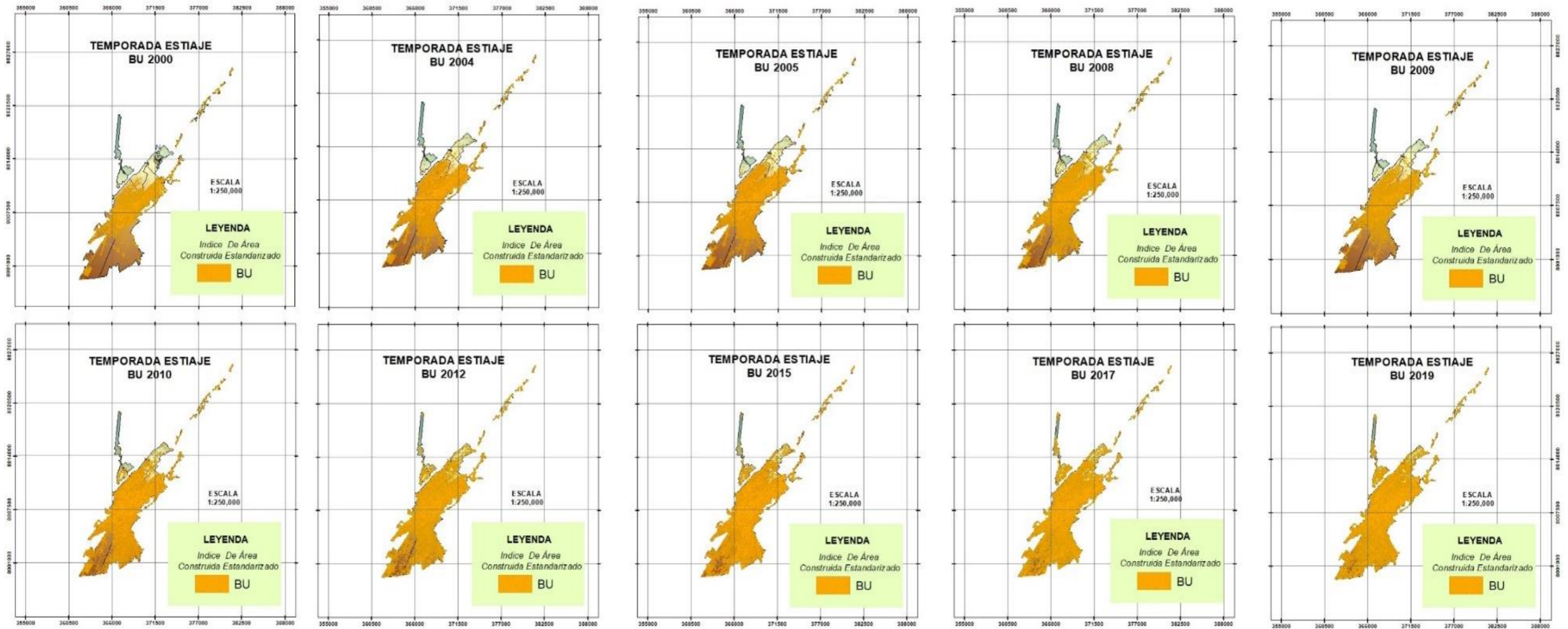
Resultado Multitemporal del índice BU en el Periodo Húmedo



Nota. Se muestra el análisis multitemporal desde el año 2000 hasta el año 2019, en el cual se puede apreciar el aumento del área construida en la zona de estudio.

Figura 37

Resultado Multitemporal del índice BU en el Periodo Seco



Nota. Se muestra el análisis multitemporal desde el año 2000 hasta el año 2019, en el cual se puede apreciar el aumento del área construida en la zona de estudio.

En la tabla 17, se observa el desarrollo de la clasificación supervisada.

Tabla 17

Resultado de la clasificación supervisada entre los años 2000-2019

Zona	Año	Área (Km ²)
Periodo Húmedo		
Cobertura Vegetal	2000	8,622992
Cobertura Vegetal	2004	9,27489
Cobertura Vegetal	2005	9,119982
Cobertura Vegetal	2008	8,932159
Cobertura Vegetal	2009	6,343087
Cobertura Vegetal	2010	6,748002
Cobertura Vegetal	2012	6,470922
Cobertura Vegetal	2015	6,96768
Cobertura Vegetal	2017	8,784565
Cobertura Vegetal	2019	5,940988
Cuerpos de agua	2000	0,283539
Cuerpos de agua	2004	0,272004
Cuerpos de agua	2005	0,278377
Cuerpos de agua	2008	0,24318
Cuerpos de agua	2009	0,42684
Cuerpos de agua	2010	0,193283
Cuerpos de agua	2012	0,254623
Cuerpos de agua	2015	0,37062
Cuerpos de agua	2017	0,469699
Cuerpos de agua	2019	0,580044
Zona Urbana	2000	22,061078
Zona Urbana	2004	23,783282
Zona Urbana	2005	23,846931
Zona Urbana	2008	25,483872
Zona Urbana	2009	27,982059
Zona Urbana	2010	26,454705
Zona Urbana	2012	29,05053
Zona Urbana	2015	28,656431
Zona Urbana	2017	33,634191
Zona Urbana	2019	34,508523
Zona desértica	2000	35,940827
Zona desértica	2004	35,011614

Zona desértica	2005	35,517619
Zona desértica	2008	33,45283
Zona desértica	2009	31,990832
Zona desértica	2010	34,759818
Zona desértica	2012	32,250049
Zona desértica	2015	32,678281
Zona desértica	2017	26,903633
Zona desértica	2019	27,538318
<hr/>		
Periodo Seco		
<hr/>		
Cobertura Vegetal	2000	5,993551
Cobertura Vegetal	2004	6,53571
Cobertura Vegetal	2005	6,60017
Cobertura Vegetal	2008	8,043028
Cobertura Vegetal	2009	6,887415
Cobertura Vegetal	2010	5,200317
Cobertura Vegetal	2012	5,881253
Cobertura Vegetal	2015	4,756977
Cobertura Vegetal	2017	4,815603
Cobertura Vegetal	2019	5,233904
Cuerpos de agua	2000	0,282932
Cuerpos de agua	2004	0,143446
Cuerpos de agua	2005	0,165361
Cuerpos de agua	2008	0,137015
Cuerpos de agua	2009	0,113606
Cuerpos de agua	2010	0,100372
Cuerpos de agua	2012	0,229982
Cuerpos de agua	2015	0,363542
Cuerpos de agua	2017	0,259478
Cuerpos de agua	2019	0,389462
Zona Urbana	2000	23,176326
Zona Urbana	2004	23,519029
Zona Urbana	2005	28,093879
Zona Urbana	2008	23,827073
Zona Urbana	2009	24,333071
Zona Urbana	2010	25,397788
Zona Urbana	2012	27,273258
Zona Urbana	2015	33,571615
Zona Urbana	2017	34,424759
Zona Urbana	2019	34,746351

Zona desértica	2000	39,651209
Zona desértica	2004	39,304739
Zona desértica	2005	33,817409
Zona desértica	2008	36,377483
Zona desértica	2009	37,164761
Zona desértica	2010	37,685132
Zona desértica	2012	35,307567
Zona desértica	2015	29,68696
Zona desértica	2017	28,298469
Zona desértica	2019	28,951793

Nota. Se muestra los resultados de la clasificación supervisada entre los años 2000- 2019 en el software ArcGis.

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

5.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

Se utilizó la correlación de Pearson.

H₁: Existe relación entre el crecimiento poblacional y el Índice de Áreas Construidas de Diferencia Normalizada (NDBI)

H₀: No Existe relación entre el crecimiento poblacional y el Índice de Áreas Construidas de Diferencia Normalizada (NDBI)

Tabla 18

Correlación de Pearson entre NDBI y Crecimiento Urbano Periodo Húmedo

		NDBI	Crecimiento Urbano
NDBI	Correlación de Pearson	1	1,000**
	Sig. (bilateral)		,000
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	90,415	520,301
	Covarianza	10,046	57,811
	N	10	10
Crecimiento Urbano	Correlación de Pearson	1,000**	1
	Sig. (bilateral)	,000	
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	520,301	2996,067
	Covarianza	57,811	332,896
	N	10	10

Nota. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Tabla 19

Correlación de Pearson entre NDBI y Crecimiento Urbano Periodo Seco

		NDBI	Crecimiento Urbano
NDBI	Correlación de Pearson	1	1,000**
	Sig. (bilateral)		,000
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	95,302	515,152
	Covarianza	10,589	57,239
	N	10	10
Crecimiento Urbano	Correlación de Pearson	1,000**	1
	Sig. (bilateral)	,000	

Suma de cuadrados y productos vectoriales	515,152	2784,640
Covarianza	57,239	309,404
N	10	10

Nota. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Haciendo uso de la correlación de Pearson, se determinó un grado de significancia de ($p < 0,01$), encontrándose una correlación alta, rechazándose la hipótesis nula. Esto quiere decir que existe una relación directa entre el Índice de NDBI y el crecimiento Urbano, para los dos periodos trabajados.

H₂: Existe relación entre el crecimiento poblacional y el índice de vegetación normalizada (NDVI)

H₀: No existe relación entre el crecimiento poblacional y el índice de vegetación normalizada (NDVI)

Tabla 20

Correlación de Pearson entre NDVI y Crecimiento Urbano Periodo Húmedo

		NDVI	Crecimiento Urbano
NDVI	Correlación de Pearson	1	-1,000**
	Sig. (bilateral)		,000
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	,351	-29,530
	Covarianza	,039	-3,281
	N	10	10
Crecimiento Urbano	Correlación de Pearson	-1,000**	1
	Sig. (bilateral)	,000	
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	-29,530	2481,507
	Covarianza	-3,281	275,723
	N	10	10

Nota. La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

Tabla 21

Correlación de Pearson entre NDVI y Crecimiento Urbano Periodo Seco

		NDVI	Crecimiento Urbano
NDVI	Correlación de Pearson	1	-1,000**
	Sig. (bilateral)		,000
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	,291	-28,236
	Covarianza	,032	-3,137

	N	10	10
	Correlación de Pearson	-1,000**	1
	Sig. (bilateral)	,000	
Crecimiento Urbano	Suma de cuadrados y productos vectoriales	-28,236	2741,304
	Covarianza	-3,137	304,589
	N	10	10

Nota. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Haciendo uso de la correlación de Pearson, se determinó un grado de significancia de ($p < 0,01$), encontrándose una correlación alta, rechazándose la hipótesis nula. Esto quiere decir que existe una relación directa entre el Índice de NDVI y el crecimiento Urbano, para los dos periodos trabajados.

H₃: Es posible determinar que Existe relación entre el crecimiento poblacional y el Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)

H₀: No es posible determinar que Existe relación entre el crecimiento poblacional y el Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)

Tabla 22

Correlación de Pearson entre SAVI y Crecimiento Urbano Periodo Húmedo

		SAVI	Crecimiento Urbano
	Correlación de Pearson	1	-1,000**
	Sig. (bilateral)		,000
SAVI	Suma de cuadrados y productos vectoriales	1,367	-74,284
	Covarianza	,152	-8,254
	N	10	10
	Correlación de Pearson	-1,000**	1
	Sig. (bilateral)	,000	
Crecimiento Urbano	Suma de cuadrados y productos vectoriales	-74,284	4037,184
	Covarianza	-8,254	448,576
	N	10	10

Nota. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Tabla 23*Correlación de Pearson entre SAVI y Crecimiento Urbano Periodo Seco*

		SAVI	Crecimiento Urbano
SAVI	Correlación de Pearson	1	-1,000**
	Sig. (bilateral)		,000
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	1,322	-75,561
	Covarianza	,147	-8,396
	N	10	10
Crecimiento Urbano	Correlación de Pearson	-1,000**	1
	Sig. (bilateral)	,000	
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	-75,561	4317,418
	Covarianza	-8,396	479,713
	N	10	10

Nota. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Haciendo uso de la correlación de Pearson, se determinó un grado de significancia de ($p < 0,01$), encontrándose una correlación alta, rechazándose la hipótesis nula, Esto quiere decir que existe una relación directa entre el Índice de SAVI y el crecimiento Urbano, para los dos periodos trabajados.

H₄: Existe relación entre el crecimiento poblacional y el Índices de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI)

H₀: No existe relación entre el crecimiento poblacional y el Índices de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI)

Tabla 24*Correlación de Pearson entre NDWI y Crecimiento Urbano Periodo Húmedo*

		NDWI	Crecimiento Urbano
NDWI	Correlación de Pearson	1	-,232
	Sig. (bilateral)		,518
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	,040	-1,873
	Covarianza	,004	-,208
	N	10	10
Crecimiento Urbano	Correlación de Pearson	-,232	1
	Sig. (bilateral)	,518	
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	-1,873	1628,702

Covarianza	-,208	180,967
N	10	10

Tabla 25

Correlación de Pearson entre NDWI y Crecimiento Urbano Periodo Seco

		NDWI	Crecimiento Urbano
NDWI	Correlación de Pearson	1	,068
	Sig. (bilateral)		,852
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	,035	,519
	Covarianza	,004	,058
	N	10	10
Crecimiento Urbano	Correlación de Pearson	,068	1
	Sig. (bilateral)	,852	
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	,519	1669,651
	Covarianza	,058	185,517
	N	10	10

Haciendo uso de la correlación de Pearson, se determinó que no presenta un grado de significancia encontrándose que no existe correlación, rechazándose la hipótesis y aceptando la hipótesis Nula. Esto quiere decir que no existe una relación directa entre el Índice de NDWI y el crecimiento Urbano, para los dos periodos trabajados.

5.2. Contratación de resultados con otros estudios similares

De acuerdo a lo planteado en nuestras hipótesis:

Hi: Existe una relación entre el crecimiento poblacional y su influencia en el índice de calidad ambiental

Lema (2017), en su tesis denominado "Estimación del índice de calidad ambiental urbana, a partir de imágenes satélites", tuvo como finalidad estimar el índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite en la ciudad de Riobamba; se hizo a través de imágenes satelitales de Landsat 8, se realizó en base a cinco índices (vegetación, suelo, agua y temperatura de superficie) cuyos resultados, siendo el NDVI más representativo del 2014 con vegetación media con 247,98 ha, el NDSI el más representativo es del 2015 con respecto a suelo desnudo y construcciones de 2328,64 ha, y el NDWI más representativo es del 2014, que corresponde a humedad de suelo con 697,71 ha. Para la determinación del ICA se

realizó en base al ANOVA la cual permitió determinar que el índice de calidad ambiental de la ciudad de Riobamba es de 2,78 correspondiente a regular.

En nuestra investigación logramos determinar que haciendo uso de las imágenes satelitales Landsat 7, logramos determinar que si existe una relación directa entre los índices de calidad ambiental y el crecimiento poblacional. Los índices de calidad ambiental analizados, utilizando la metodología de Pearson, logramos obtener una correlación alta a excepción del el Índices de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI), el cual no presenta una correlación.

CONCLUSIONES

Con respecto al primer objetivo planteado, que es determinar la relación que existe entre el crecimiento poblacional y su influencia en el índice de calidad ambiental en la zona urbana de la ciudad de Tacna. Podemos concluir que si existe una correlación alta a excepción del Índices de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI), el cual no presenta una correlación significativa. La metodología establecida es factible para poder realizar este análisis ya que se realizó la validación de los resultados con trabajo de campo como se evidencio en la metodología.

Para poder determinar la zona urbana en la ciudad de Tacna haciendo uso del Índice de Áreas Construidas de Diferencia Normalizada (NDBI), haciendo el análisis estadístico con la metodología de Pearson, se determinó una correlación Alta, en los resultados de la investigación se determinó también que para el periodo húmedo presenta un incremento del 53 % con respecto al año 2000 y en el periodo seco se tiene un incremento del 50 %.

En cuanto al objetivo de establecer la relación que existe entre el crecimiento poblacional y el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI), haciendo el análisis estadístico con la metodología de Pearson, se determinó una correlación Alta, en los resultados de la investigación se determinó también que para el periodo húmedo presenta un descenso de 53 % con respecto al año 2000 y en el periodo seco se tiene un descenso del 59 %.

Para el objetivo específico que nos planteamos de Explicar la relación que existe entre el crecimiento poblacional y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), haciendo el análisis estadístico con la metodología de Pearson, se determinó una correlación Alta, en los resultados de la investigación se determinó también que para el periodo húmedo presenta un descenso de 48 % con respecto al año 2000 y en el periodo seco se tiene un descenso del 46 %.

Finalmente, en el objetivo de establecer la relación que existe entre el crecimiento poblacional y el Índices de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI), haciendo el análisis estadístico con la metodología de Pearson, se determinó que no existe una correlación, en los resultados de la investigación se determinó también que para el periodo húmedo presenta un incremento de 35 % con respecto al año 2000 y en el periodo seco se tiene un incremento del 41 %.

RECOMENDACIONES

Trabajar con imágenes satelitales de mejor resolución espacial que permitan obtener a mejor detalle los resultados de los índices de calidad ambiental e identificar de manera más precisa los datos que se obtengan mediante la aplicación de fórmulas matemáticas, debido a que las imágenes Landsat 7 tienen una resolución espacial de 30 metros de altura.

Se recomienda usar la metodología de la clasificación visual y supervisada para la identificación de áreas urbanas, cuerpos de agua y cobertura vegetal, con la finalidad de obtener resultados más precisos.

Realizar un análisis multitemporal con las diferentes imágenes satelitales con la finalidad de detectar cambios en el uso de la tierra y climáticos, aumento de la erosión, variación de la vegetación, entre otros. Es una técnica que no requiere de muchos recursos económicos para su procesamiento.

Se recomienda la difusión de la metodología aplicada a las instituciones públicas, como Municipalidades y Gobiernos Regionales, para un mejor ordenamiento territorial en la región y realicen toma de decisiones oportunas que contribuyan a un desarrollo integral del territorio de manera sustentable.

Trabajar con un computador que posea un buen sistema operativo y memoria RAM debido a que el procesamiento de estas imágenes requiere de mucho tiempo y espacio de memoria en el disco duro, ya que los archivos con los cuales se trabajan pesan más de 5 gigas.

Realizar más investigaciones haciendo uso de un Sistema de Información Geográfico (SIG) y herramientas de teledetección, debido a que los resultados obtenidos mediante el uso de estas pueden prever modificaciones y reflejar los cambios que puedan ocurrir en cualquier ciudad a nivel territorial, pudiendo evitar problemas que afecten social y ambientalmente.

A las autoridades competentes se recomienda monitoreos en áreas de evidente crecimiento urbano las cuales pueden ser peligrosas o zonas de riesgo, para impedir que los habitantes se asienten informalmente en estas áreas y evitar futuros problemas de desorden territorial, y de esta manera establecer zonas aptas para la expansión de áreas urbanas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarez, C. I., & Padilla, O. (2014). *Estimación de Contaminación del Aire por PM10 en Quito Determinado por Índices Ambientales obtenidos con Imágenes Satelitales LANSAT ETM+, 1–11*. Quito.
- Basterra, I. (2010). *Teledetección imágenes satelitales procesamiento digital de imágenes*.
- Bravo Morales, N. (2017). "Teledetección Espacial Landsat, Sentinel 2, Aster L1t y Modis". Huánuco.
- Cabrera, C., Maldonado, M., & Arévalo, W. (2004). *Relaciones entre la calidad ambiental y calidad de vida en Lima metropolitana*. Perú.
- Cárdenas Angulo, C. A. (2020). Análisis de la Dinámica Espacial de la Ciénaga de Betancí durante los años 1985.
- Carrillo Huarahuara, A. E., & Choquhuanca Zapana, V. E. (2019). *Análisis multitemporal del crecimiento urbano de la ciudad de Puno mediante imágenes satelitales, entre los años 1980 - 2017*. Puno.
- Carrillo Huarara, A. E., & Choquehuanca Zapana, V. E. (2019). *Análisis multitemporal del crecimiento urbano de la ciudad de Puno mediante imágenes satelitales, entre los años 1980 - 2017*. Puno.
- Celemín & Velázquez . (2010). Elaboración y aplicación de un índice de calidad ambiental para la región del nordeste argentino, 2010. *Economía, Sociedad y Territorio*, 29.
- Díaz, G. (2005). *Vegetación y Calidad Ambiental de las ciudades*. Cuba.
- Escobar, L. (2006). Indicadores sintéticos de calidad ambiental: un modelo general para grandes zonas urbanas. *Revista eure (Vol. XXXII, Nº 96)*, 73-98.
- Gonzaga Aguilar, C. (2014). *Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la Caracterización de la Cobertura Vegetal en la Zona Centro de la Provincia De Loja, Ecuador*. LA Plata.
- Guzmán Bravo, F., & Ochoa de la Torre, J. (2014). *Confort Térmico en los Espacios Públicos Urbanos, Clima cálido y frío semi-seco*. México.
- Holzman, M. (2013). *Estimación del estrés hídrico en cultivos y su relación con rendimientos en la región pampeana mediante imágenes de temperatura de superficie e índice de vegetación*. Argentina.

- Jiménez Párraga, H. P. (2018). *Análisis de crecimiento urbano a partir de imágenes landsat en el cantón Durán, provincia del Guayas, en el período 1990 – 2015*. Quevedo- Los Rios.
- Labrador Garcia, M., Evora Brondo, J., & Arbelo Perez, M. (2012). *"Satélites de Teledetección para la gestión del territorio"*. Canarias.
- Lema Palaquibay, L. F. (2017). *Estimación Del Índice De Calidad Ambiental Urbana, A Partir De Imágenes De Satélite En La Ciudad De Riobamba, Provincia De Chimborazo*. Riobamba.
- Minam. (2013). *Diagnostico para la gestión del cambio climático en Tacna*.
- Ministerio de Vivienda, Costrucción y Saneamiento. (2013). *Plan De Acondicionamiento Territorial De La Provincia De Tacna 2014 – 2023*. Tacna.
- Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2013). *Indice de Calidad Ambiental Urbana*. Colombia.
- Nichol, J., & Wong, M. (2005). *"Modeling urban environmental quality in a tropical city. Hong Kong"*.
- Platzer, L., Iñiguez, R., Cevo, J., & Ayala, F. (2007). *Medición de los niveles de ruido ambiental en la ciudad de Santiago de Chile*. Chile.
- Quiros Rosado, E. (2009). *"Clasificación de Imagenes Multiespectrales ASTER mediante funciones adaptativas"*. España.
- Ramírez Gonzáles, A., & Domínguez Calle, E. (2010). *Isla de calor y cambios espacio-temporales de la temperatura en la ciudad de Bogotá*. Colombia.
- Rojas Delgado, D. (2018). *Implementación del Sistema de Información Geoespacial del Instituto Mixto de Ayuda Social (SIG IMAS) para la administración de la información Institucional de carácter espacial asociada al Área de Titulación en la provincia de Limón*.
- Sánchez Vega, L. M. (2017). *Elaboración de un índice de calidad ambiental (ICA), enfocado al sector urbano de la ciudad de Cuenca utilizando teledetección y análisis espacial*. Cuenca.
- Santana Rodríguez, I. M., Escobar Jaramillo, L. A., & Capote, P. A. (2010). *Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite. Revista geografica Norte Granda*.
- Turpo Cayo, E. (2018). *"Analisi Cuantitativo Espacial en Percepción Remota"*. Puno.
- Unicef. (2012). *Estado Mundial de la Infancia*.
- Wiseman, E. (2007). *Surviving in an Urban Soli*.
- Wong, N. (2005). *Study of green areas and urban heat island in a tropical city*.
- World Health Organization. (2014). *Air quality deteriorating in many of the world's cities*.

ANEXO

Matriz de Consistencia

Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variables	Sub variables	Dimensión	Indicador
¿Qué relación existe entre el crecimiento poblacional y su influencia en el índice de calidad ambiental en la zona urbana de la ciudad de Tacna en el año 2021?	Determinar la relación que existe entre el crecimiento poblacional y su influencia en el índice de calidad ambiental en la zona urbana de la ciudad de Tacna en el año 2021	H1: Existe una relación entre el crecimiento poblacional y su influencia en el índice de calidad ambiental		Población distrital Áreas		Habitantes
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas				
¿Cómo determinar la zona urbana en la ciudad de Tacna utilizando el índice de áreas construidas de diferencia normalizada (NDBI)?	Determinar la zona urbana en la ciudad de Tacna haciendo uso del índice de áreas construidas de diferencia normalizada (NDBI)	H1: Es posible determinar la zona urbana en la ciudad de Tacna haciendo uso del índice de áreas construidas de diferencia normalizada (NDBI)	Crecimiento poblacional	Construidas de Diferencia Normalizada (NDBI)		Área (Km ²)
¿Cuál es la relación que existe entre el crecimiento poblacional y el índice de vegetación normalizada (NDVI)?	Establecer la relación que existe entre el crecimiento poblacional y el índice de vegetación normalizada (NDVI)	Hi2: Existe relación entre el crecimiento poblacional y el índice de vegetación normalizada (NDVI)		Índice de Vegetación Normalizada (NDVI)	Cuantitativa continua	Área (Km ²)
¿Cuál es la relación que existe entre el crecimiento poblacional y el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)?	Explicar la relación que existe entre el crecimiento poblacional y el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)	Hi3: Existe relación entre el crecimiento poblacional y el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)	Índice de calidad ambiental	Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)		Área (Km ²)
¿Cuál es la relación que existe entre el crecimiento poblacional y el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI)?	Establecer la relación que existe entre el crecimiento poblacional y el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI)	Hi4: Existe relación entre el crecimiento poblacional y el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI)		Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI)		Área (Km ²)