

Evaluación del efecto del cambio climático, sobre las praderas nativas del *Parque Nacional Sajama*, a través de sensores remotos

Eddy Diego Gutiérrez Gonzales¹; Rene Jhonny Cusi Ajata²

¹ Universidad Mayor de San Andrés, Carrera de Ingeniería en Producción y Comercialización Agropecuaria

² Universidad Pública de El Alto, Área de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y RRNN

E-mail de contacto: eddyguti12@gmail.com

Resumen. La investigación se realizó en el *Parque Nacional Sajama*, del departamento de Oruro, con el objetivo de evaluar los índices de vegetación NDVI, SAVI, NDWI y LST, derivados de las imágenes de sensores remotos, para estimar el estado de la cobertura vegetal y los índices de vegetación, en relación con los datos meteorológicos y caracterizar la superficie real de los tipos de cobertura vegetal, del área de estudio. Se inventarió 62 especies nativas, distribuidas en 26 familias y sub divididas en 8 unidades vegetales en el área, de las cuales el 34.92% de las especies son *deseables*, el 33.33% de especies son *poco deseables* y el 31.75% son *especies indeseables*. La unidad vegetal *Collpar* reporta un alto porcentaje de suelo desnudo y la unidad vegetal *Semidesierto Rocososo Alto Andino* reporta mayor porcentaje de rocas. Cuatro unidades vegetales registraron condiciones *regulares*, dos registraron condiciones *excelentes* y en las demás unidades vegetales se registraron condiciones *pobres* y *buenas* para la especie Camélida. Los índices de vegetación evaluados NDVI, SAVI, NDWI y LST, permitieron caracterizar diferentes tipos de cobertura, y el comportamiento de la vegetación durante 20 años de observación. El NDVI evalúa la actividad fotosintética; para este índice el estudio determinó un incremento de vegetación en 7.844 ha. Con el SAVI se observó un incremento de 35.459 ha de vegetación. El NDWI evalúa la humedad en el suelo, con este índice el estudio determinó un incremento de 2.969 ha, de áreas con baja retención de agua. Los mapas de LST, muestran que la temperatura del suelo se incrementó de manera paulatina, durante el tiempo de evaluación del Parque Nacional Sajama al año 2021.

Palabras clave: Sistema de Información Geográfica; Cambio Climático; Modelos Climáticos Globales; Índices de Vegetación; CANAPAS

Introducción

El Altiplano Boliviano es una unidad fisiográfica situada en medio de las cordilleras Occidental y Oriental, los campos naturales de pastoreo (CANAPAS) están constituidos por una diversidad de comunidades vegetales, constituyen la fuente más importante de forraje para la alimentación de camélidos (Mamani 2016). Se estima que más del 98% de

estas praderas del altiplano están constituidas por especies nativas y 2% por especies introducidas (Ancasi 2012).

Por otra parte, las proyecciones del cambio climático indican que aumentará la temperatura en 1,5°C y se producirá un mayor número de olas de calor, se alargarán las estaciones cálidas y se acortarán las estaciones frías; mientras que con un calentamiento global de 2°C los episo-

dios de calor extremo alcanzarían con mayor frecuencia umbrales críticos para la agricultura y la salud. Como consecuencia del cambio climático, las diferentes regiones experimentan distintos cambios, que se intensificarán si aumenta el calentamiento; en particular, cambios en la humedad y la sequedad, los vientos, la nieve y el hielo, las zonas costeras y los océanos (IPCC 2021).

Considerando los avances tecnológicos en las últimas décadas, y la necesidad de utilizar mapas para representar informaciones geográficas, durante el siglo XX la ciencia y tecnología avanzaron de tal manera que han generado la demanda de gran cantidad de datos geográficos, para ser representados en forma de mapas de manera más rápida y precisa, esto representa la imagen satelital llamada también *Imagen Ráster* (Mamani 2016).

La teledetección ha sido utilizada como valiosa herramienta a la hora de establecer indicadores de degradación y conservación de los recursos naturales, al momento de evaluar las dinámicas en los cambios de usos de suelo y coberturas vegetales. Las imágenes son captadas por un sensor que observa la tierra desde una órbita estable y repetitiva. La aplicación de la teledetección es posible gracias a la interacción de la energía electromagnética con las cubiertas terrestres que tienen

un comportamiento reflectivo variable. Debido a las características multi espectrales y multitemporales de los datos satelitales, resulta posible la diferenciación de tipos de cobertura vegetal (Gonzaga 2014).

El objetivo del presente estudio consistió en la evaluación de índices de vegetación derivados de imágenes adquiridas por sensores remotos, con el fin de realizar una descripción de la calidad, estado, comportamiento y diferenciación de los tipos de vegetación y su relación con factores climáticos, en el área del *Parque Nacional Sajama*.

Materiales y métodos

Ubicación de la zona de estudio

El presente estudio se realizó en el *Parque Nacional Sajama*, ubicado en el extremo Nor Oeste del departamento de Oruro, en la provincia Sajama y conformado por los municipios de Curahuara de Carangas y Turco. Limita al Norte con el departamento de La Paz y al Oeste con la República de Chile (SERNAP 2020).

Metodología

La metodología aplicada siguió el esquema metodológico detallado en las figuras 1, 2 y 3.

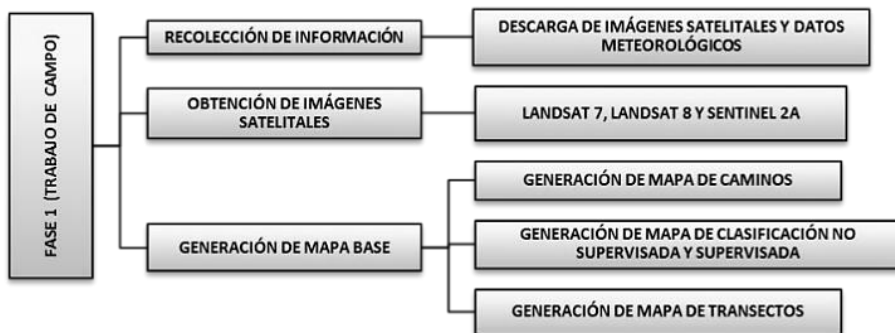


Figura 1. Fase de pre campo

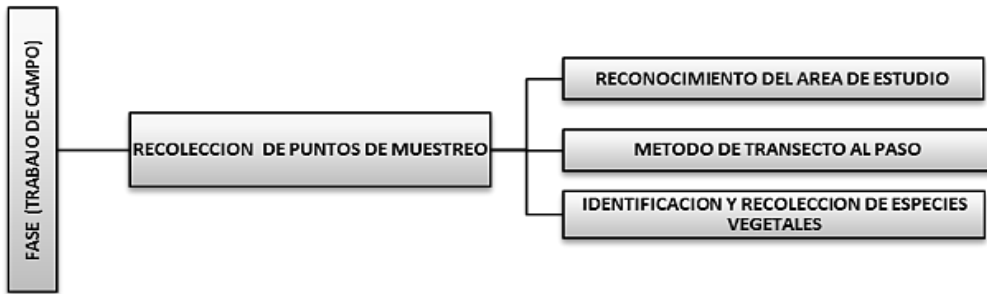


Figura 2. Fase de campo

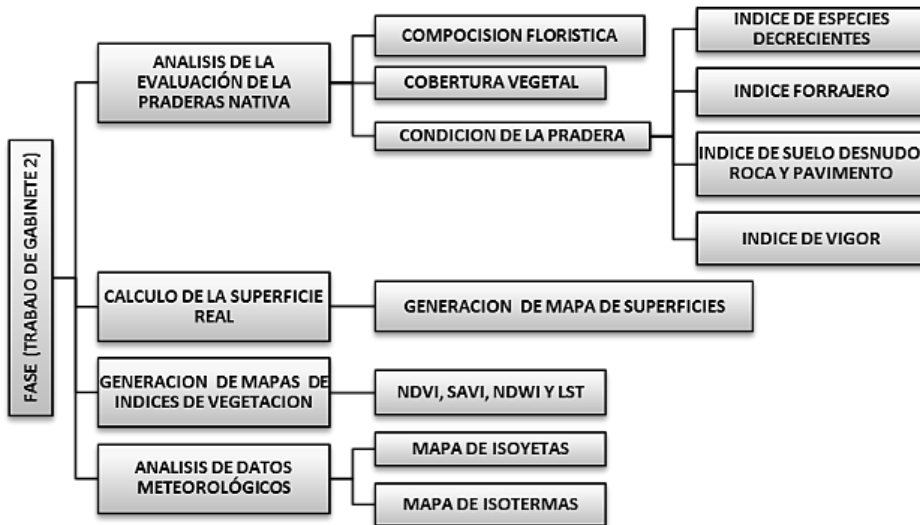


Figura 3. Fase de trabajo de gabinete

Las variables evaluadas fueron: índices de vegetación NDVI, SAVI e índices complementarios NDWI y LST, derivados de las imágenes satelitales de sensores remotos.

Resultados y discusión

Clasificación no supervisada del área de estudio

Con el mapa de clasificación no supervisada, se identificaron doce clases por medio del análisis estadístico multivariado, para valores de cada pixel, y se reclasificó de acuerdo a probabilidades para cada clase.

Clasificación supervisada del área de estudio

Como se muestra en la Figura 4, el mapa de clasificación supervisada detalla las sub categorías halladas, que están representadas en ocho unidades vegetales: *Queñual*, *Tholar*, *Vegetación Rocosa*, *Pajonal*, *Bofedales Permanentes*, *Bofedales Temporales*, *Collpares* y *Cuerpos de Agua*; tres subclases con unidades temáticas: *Nieve*, *Bloques de Roca* y *Área sin Vegetación*.

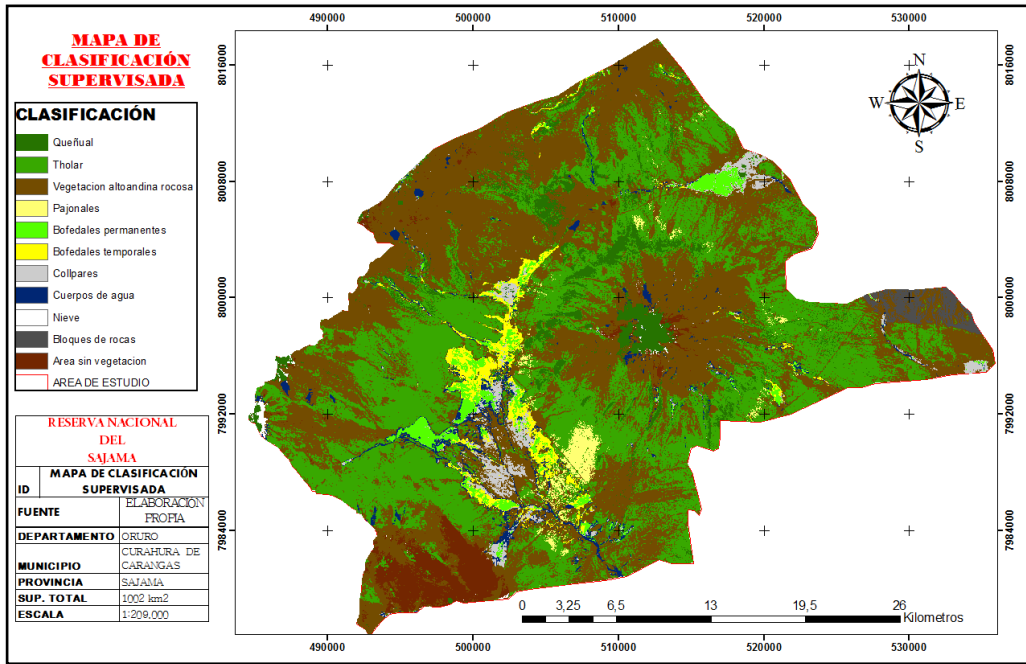


Figura 4. Mapa de clasificación supervisada

Superficie real de las coberturas vegetales del Parque Nacional Sajama

El mapa procesado e identificado por colores, muestra una clasificación de 8 unidades vegetales y 3 sub categorías (cuadros 1 y 2), observando que la mayor superficie con 17,43 ha es ocupada por la unidad vegetal *Tholar*, y la de menor superficie fue la unidad vegetal *Collpar* con 2 ha. En las sub unidades, el *Área sin*

Vegetación, alcanza una superficie de 17,25 ha y la sub unidad *Nieve* presenta una menor superficie con 1,67 ha. Arc-Geek (2018), señala que al transformar el ráster a polígonos, se hace el cálculo de cada categoría. Mediante la herramienta *suma* se puede agrupar las categorías y realizar la sumatoria de las áreas comunes.

Cuadro 1. Cálculo de superficies reales de las *Unidades Vegetales* en el Parque Sajama

ID	Color	Unidad vegetal	Superficie (ha)
1	Verde oscuro	<i>Queñual</i>	5.15
2	Verde claro	<i>Tholar</i>	17.43
3	Café	<i>Alto Andina Rocosa</i>	16.12
4	Amarrillo	<i>Pajonal</i>	10.13
5	Verde limón	<i>Bofedales</i>	11.23
6	Amarrillo oscuro	<i>Bofedales Temporales</i>	9.17
7	Plomo	<i>Collpares</i>	2
8	Azul oscuro	<i>Cuerpos de Agua Permanentes</i>	2.28

Cuadro 2. Cálculo de superficies reales calculadas de las sub unidades

ID	Color	Sub-unidades	Superficie (ha)
1	Blanco	Nieve	1.67
2	Plomo	Roca	7.78
3	Marrón	Área Sin Vegetación	17.25

Análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Los mapas de NDVI están clasificados mediante colores, que representan distintos estados de vegetación.

Las figura 5, 6, 7 y 8, muestran el comportamiento de las superficies sin vegetación, del año 1999 al 2009, observándose que la superficie se incrementó en 41 ha.

A partir del año 2009 al 2019 la superficie sin vegetación disminuyó en 7885 ha.

El comportamiento de la superficie con poca vegetación muestra que entre los años 1999 al 2009 hubo una reducción de

224 ha y en los años 2009 a 2019 un crecimiento de 4454 ha.

El comportamiento de las superficies con *vegetación regular* muestra que en el periodo 1999 a 2009, se tuvo un leve incremento de 216 ha y en el periodo 2009 a 2019 este incremento continuó con la adición de 1198 ha.

Por otra parte, la superficie *con vegetación buena* en el periodo 1999 a 2009 disminuyó; en contraste, a partir de la gestión 2009 a 2019, se incrementó en 2234 ha; tal como se muestra en las correspondientes figuras.

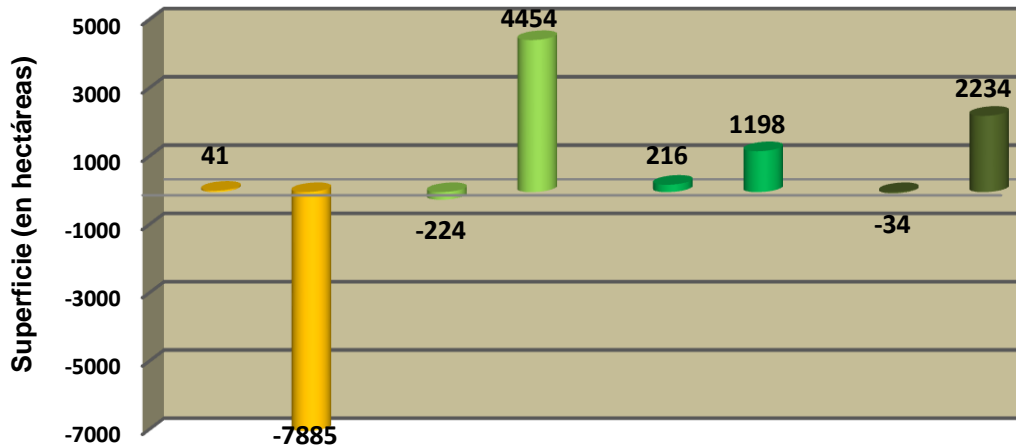


Figura 5. Tabla comparativa de resultados del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

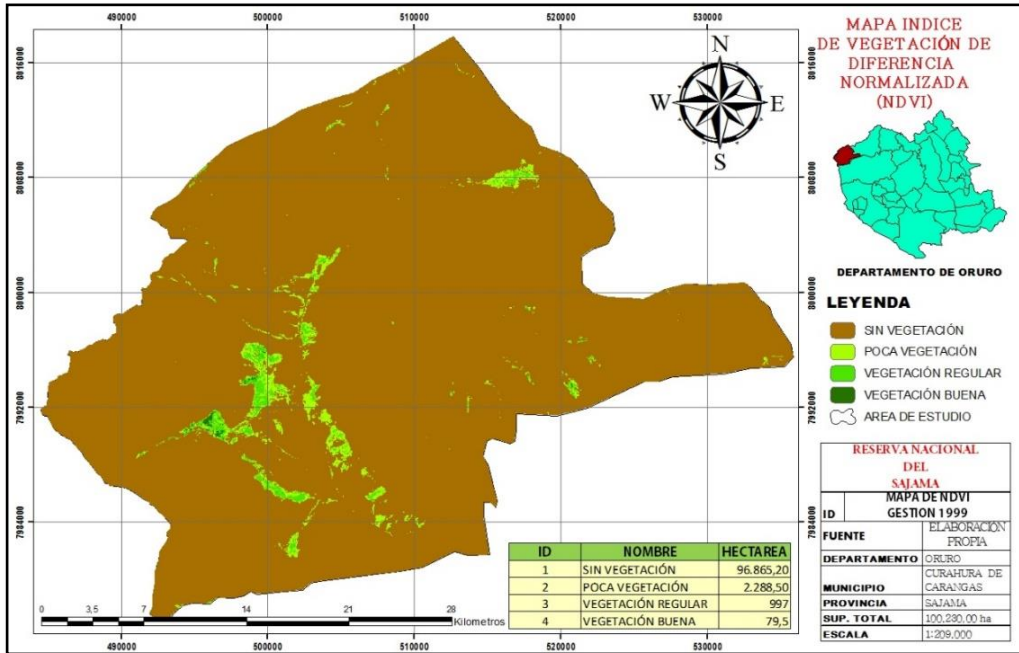


Figura 6. Mapa de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, gestión 1999

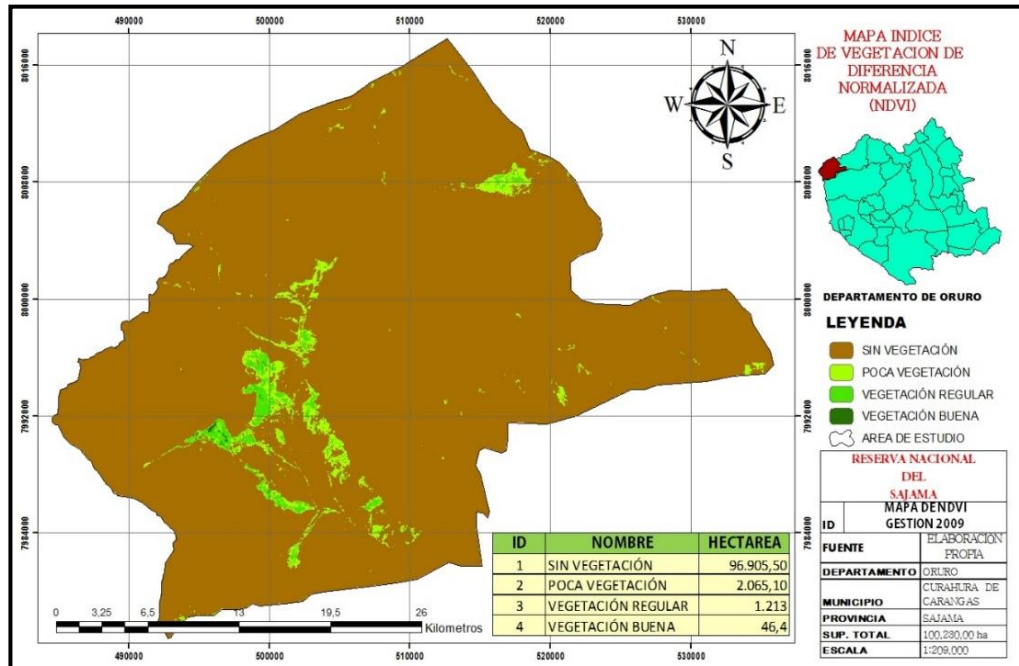


Figura 7. Mapa de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, gestión 2009

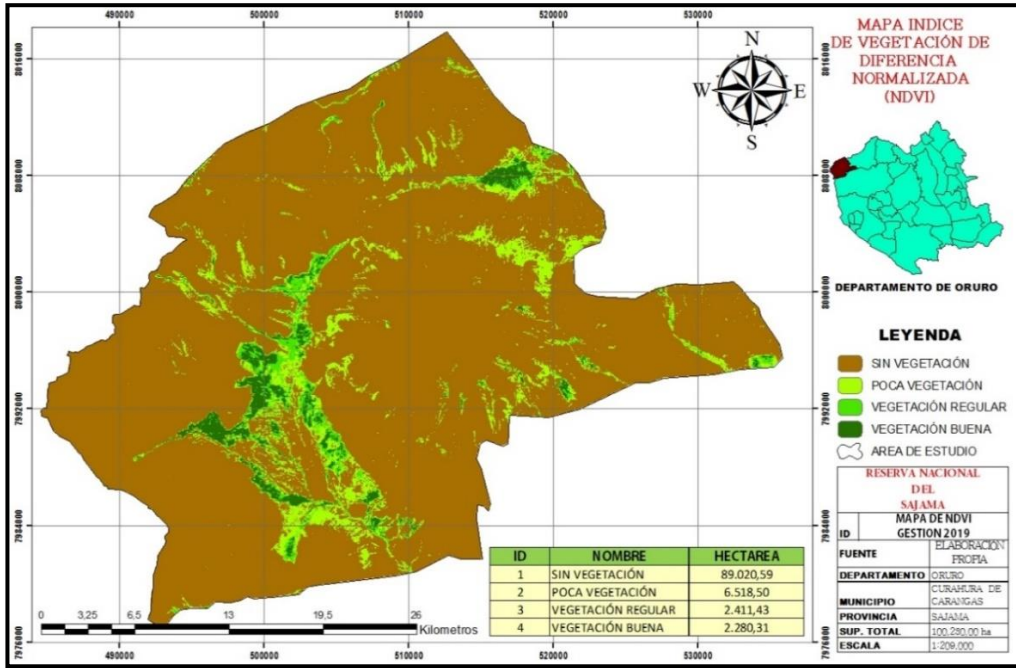


Figura 8. Mapa de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, gestión 2019

Análisis del Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)

ra vegetal, minimizando la influencia del brillo del suelo.

Los mapas de SAVI muestran colores que indican los distintos tipos de cobertu-

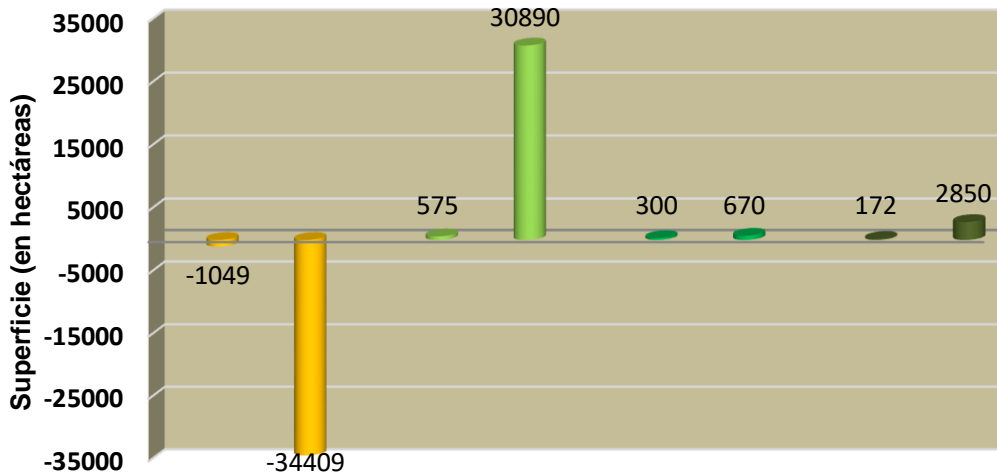


Figura 9. Tabla comparativa de resultados del Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)

En las figuras 9, 10, 11 y 12, se detalla las *superficies sin vegetación*, donde en el periodo 1999 a 2009 se tiene 1049 ha. A partir del periodo 2009 a 2019, continúa decreciendo en 34.409 ha.

La superficie con *poca vegetación* en el periodo 1999 a 2009, creció en 575 ha y en los años 2009 a 2019 persiste el incremento de 30.890 ha.

El comportamiento de las superficies con *vegetación regular*, en los años 1999 a 2009, tuvo un leve incremento de 300 ha y en el periodo 2009 a 2019 el incremento fue de 670 ha.

La superficie con *vegetación buena* detalla que para los años 1999 a 2009, la superficie se incrementó en 172 ha; para los años 2009 a 2019 esta superficie creció en 2850 ha, tal como se muestra en los mapas correspondientes.

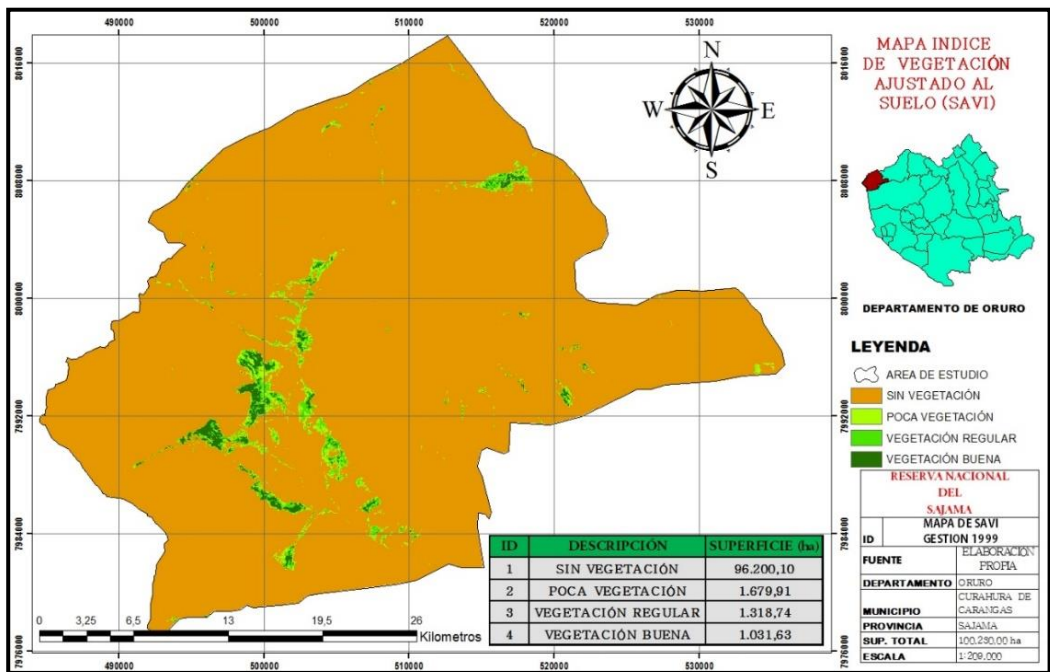


Figura 10. Mapa de Índice de Vegetación Ajustado al Suelo, gestión 1999

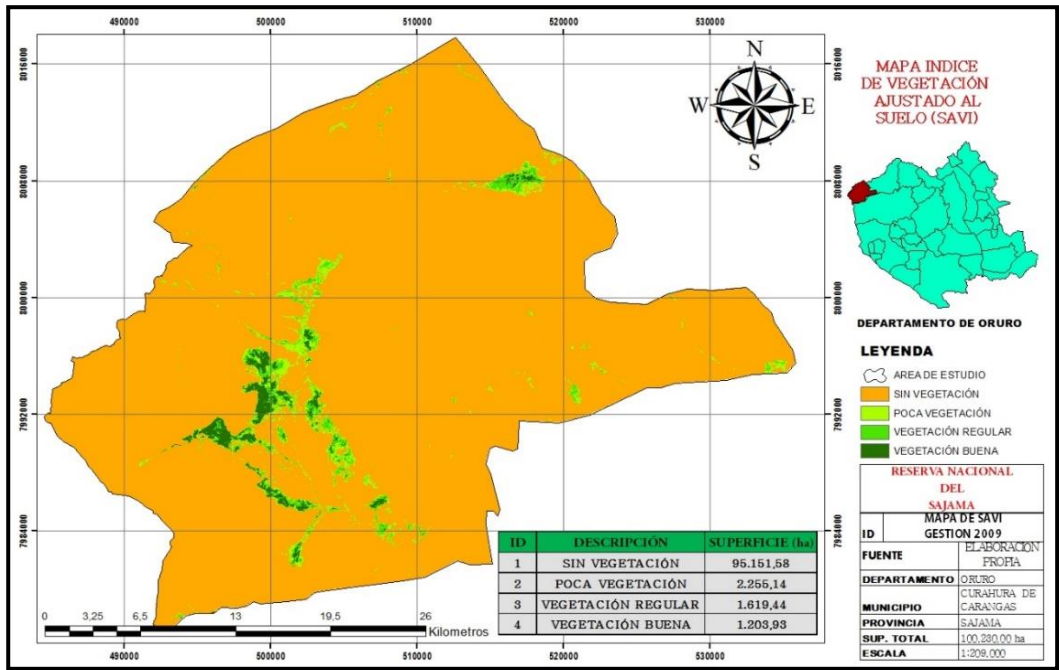


Figura 11. Mapa de Índice de Vegetación Ajustado al Suelo, gestión 2009

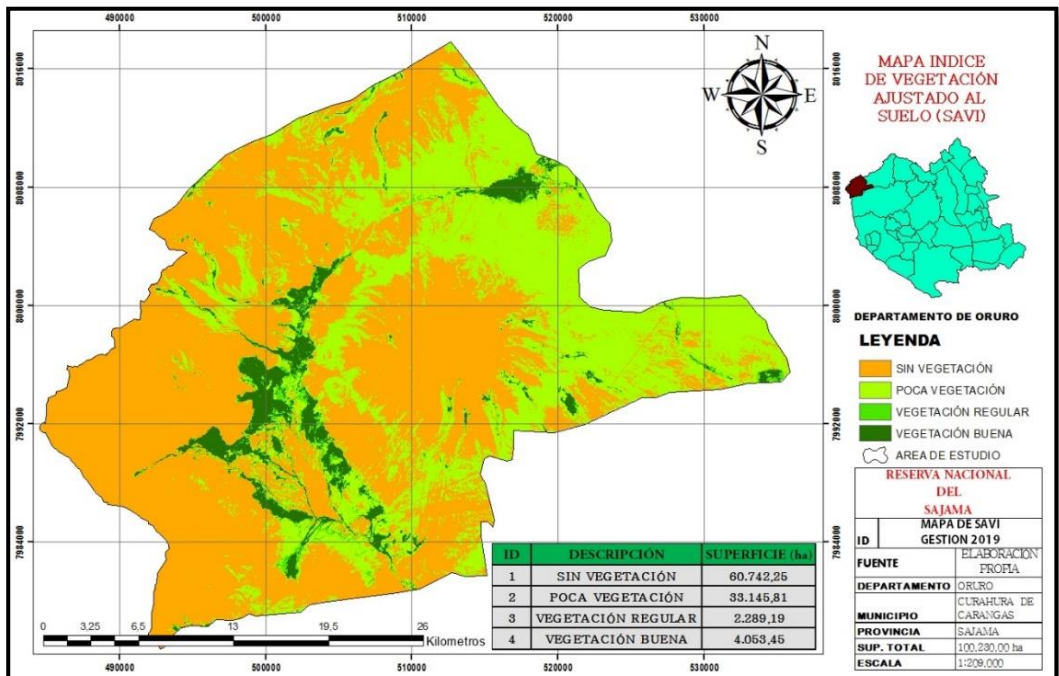


Figura 12. Mapa de Índice de Vegetación Ajustado al Suelo, gestión 2019

Análisis del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI)

Mediante los mapas de NDWI, se estableció la clasificación por colores de los distintos estados del nivel de agua en el Parque Nacional Sajama.

Las figuras 13, 14, 15 y 16, establecen el comportamiento de las superficies con *baja retención de agua*, para los años 1999 a 2009, la superficie aumentó en 753 ha. En el periodo 2009 a 2019, el área de estudio continuó creciendo en 2216 ha.

El comportamiento de las superficies con *regular retención de agua*, para el periodo 1999 a 2009, muestra que la superficie aumentó en 490 ha y a partir de los años 2009 a 2019 aumentó en 143 ha.

El comportamiento de las superficies con *moderada retención de agua*, en el periodo 1999 a 2009 registra un incremento en superficie de 42.571 ha, por otra parte, entre los años 2009 a 2019 esta superficie disminuyó en 3208 ha.

El comportamiento de las superficies con *buena retención de agua*, para el año 1999 a 2009, disminuyó drásticamente en superficie con 42.890 ha, pero a partir del año 2009 a 2019 la superficie aumentó en 752 ha.

Finalmente, el comportamiento de las superficies con *alta retención de agua*, en relación a los años 1999 a 2009, disminuyó en 924 ha, y en el periodo 2009 a 2019, inversamente a las gestiones anteriores, la superficie acrecentó en 97 ha, tal como se muestra en los mapas respectivos.

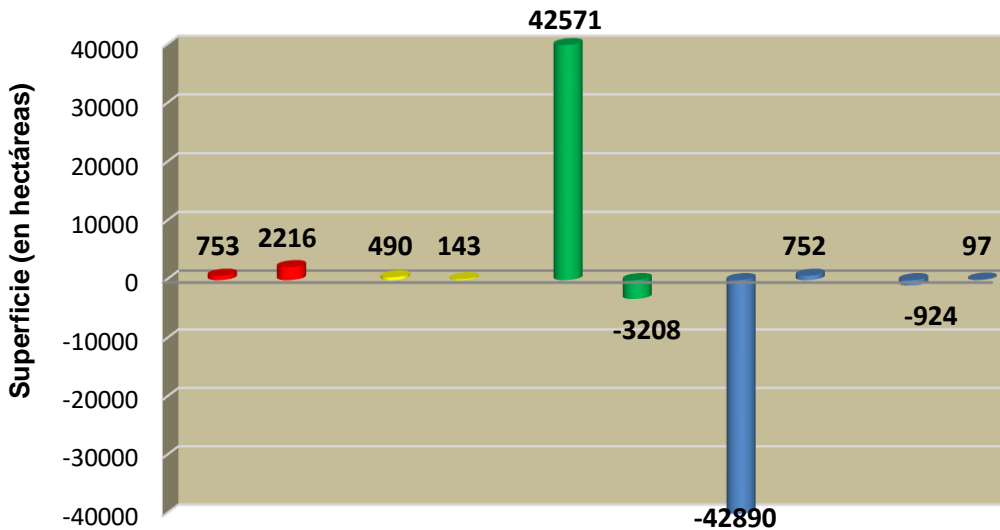


Figura 13. Tabla comparativa de resultados del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI)

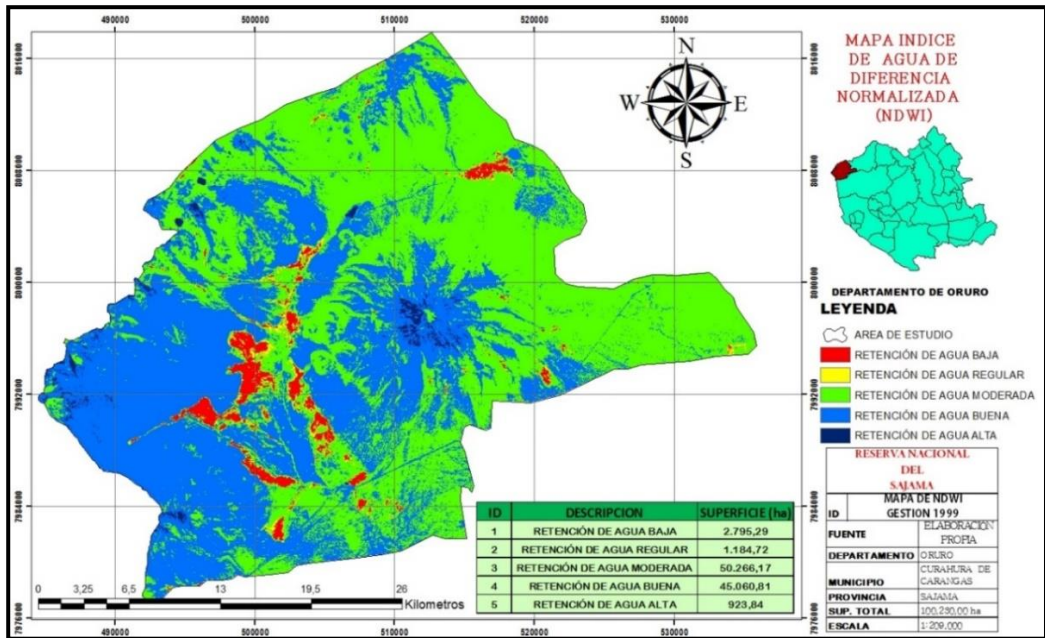


Figura 14. Mapa del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (gestión 1999)

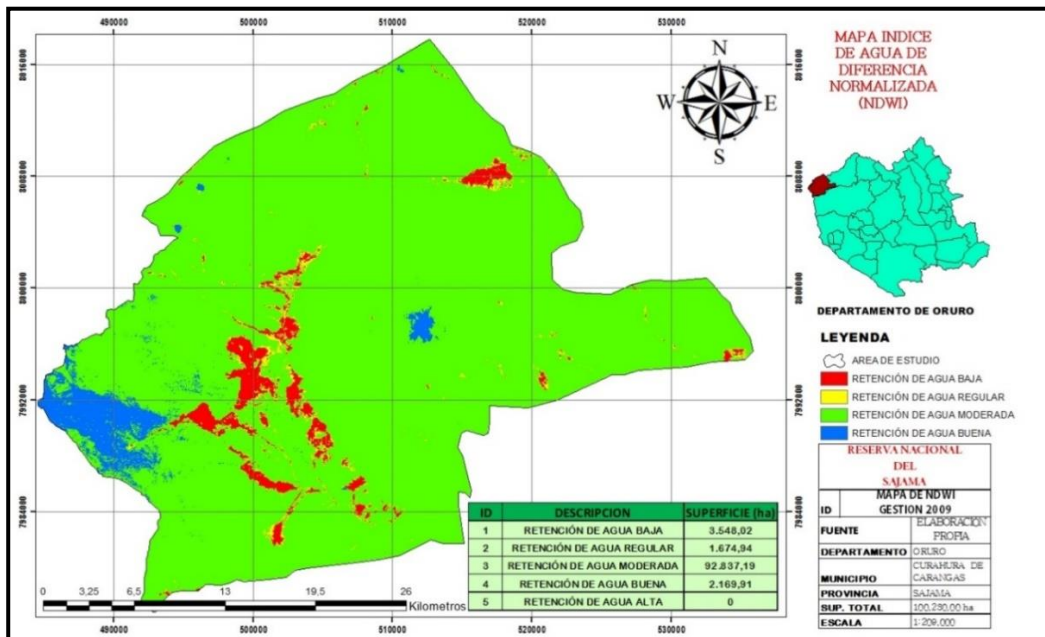


Figura 15. Mapa del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (gestión 2009)

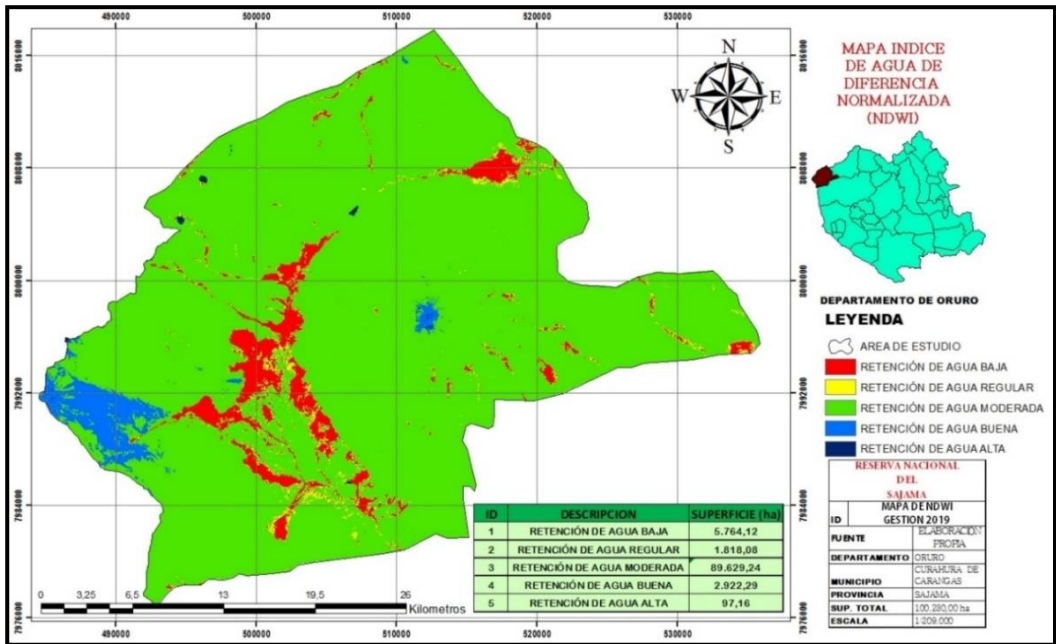


Figura 16. Mapa del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (gestión 2019)

Análisis de los mapas de temperatura de superficie de la tierra LST

ArcGeek (2018) menciona que este índice se puede calcular usando las bandas térmicas de Landsat 8. Simplemente se requiere aplicar un conjunto de ecuaciones a través de una calculadora de imágenes Ráster, que calcula la temperatura de la superficie del suelo y la clasifica mediante colores.

Según los mapas de temperatura de superficie de la tierra LST (figuras 17, 18 y 19), estos registran colores que representan las distintas temperaturas en la superficie del suelo del *Parque Nacional Sajama*.

El año 1999 la mayor parte de la superficie de la tierra presenta temperaturas de $-3,34^{\circ}\text{C}$ a $36,06^{\circ}\text{C}$. El resto de la superficie presenta temperaturas con mayor incremento. El año 2009 reporta una creciente de temperaturas en superficies

de $29,68^{\circ}\text{C}$ a $52,79^{\circ}\text{C}$. En la gestión 2019 se anota el mayor valor de temperaturas, con $41,56^{\circ}\text{C}$ a $52,79^{\circ}\text{C}$. Según estos resultados se puede afirmar que el efecto del cambio climático está haciendo que exista mayor superficie con temperaturas altas donde la humedad no se mantiene.

Relaciones de índices de vegetación y temperatura media ($^{\circ}\text{C}$)

Los resultados que se muestran en la Figura 20, reflejan la interacción de los índices de vegetación y de temperatura media.

Estos indican que cuando la temperatura es menor, la vegetación disminuye y la superficie con suelo desnudo se incrementa. Por el contrario, cuando la temperatura aumenta, existe mejores condiciones para el crecimiento de la vegetación buena y regular, por tanto la superficie con suelo desnudo disminuye.

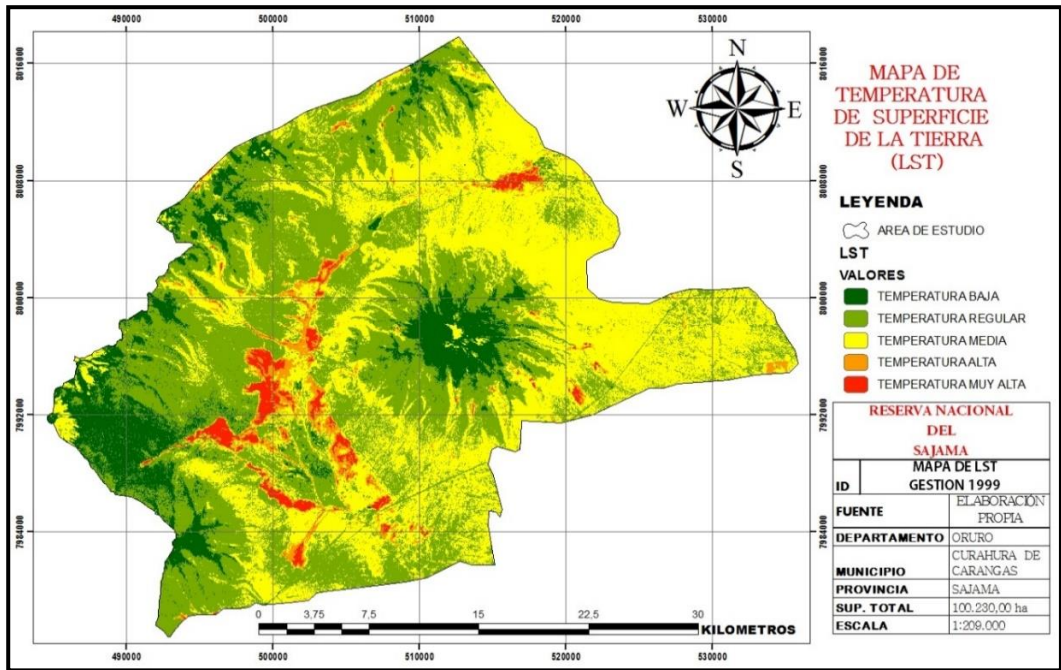


Figura 17. Mapa de temperatura de superficie de la tierra (gestión 1999)

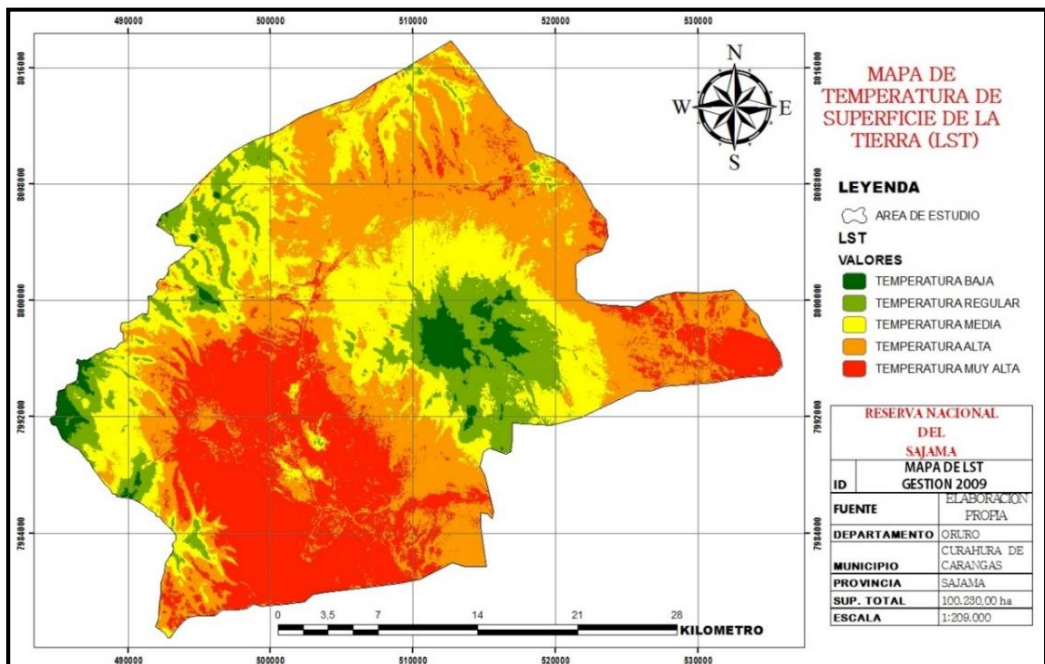


Figura 18. Mapa de temperatura de superficie de la tierra (gestión 2009)

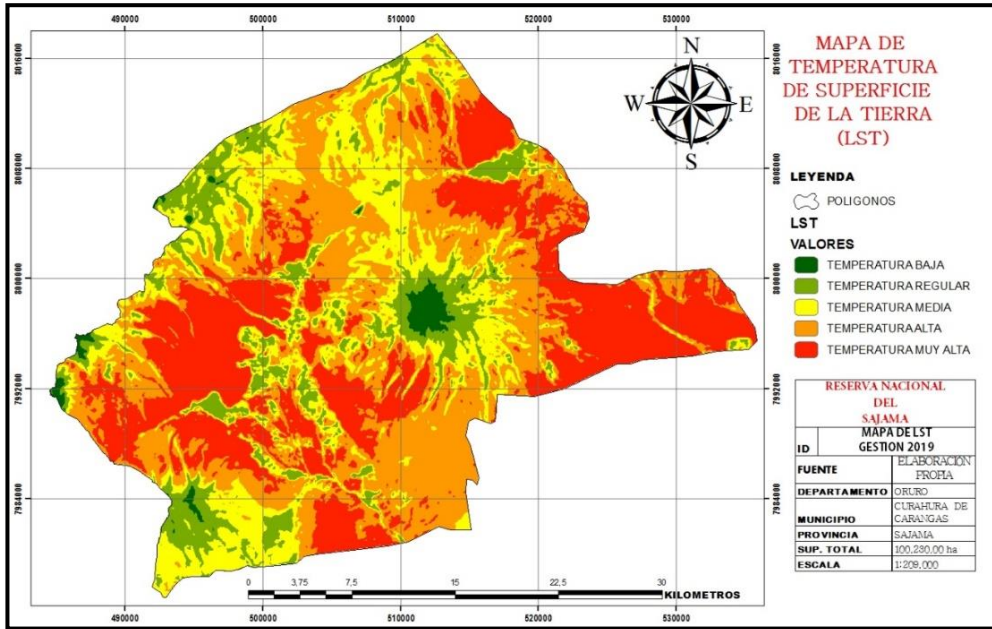


Figura 19. Mapa de temperatura de superficie de la tierra (gestión 2019)

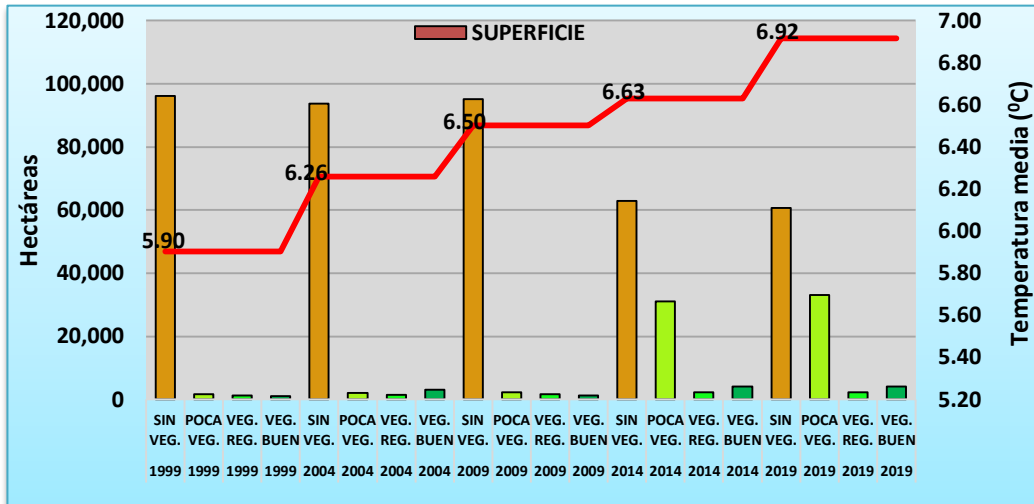


Figura 20. Interacción de índices de vegetación y temperaturas medias

Relaciones de índices de vegetación y precipitación (mm)

La Figura 21 establece la interacción de los índices de vegetación y precipitación. A mayor precipitación menor crecimiento vegetativo e incremento de la superficie sin vegetación, por tanto mayor esco-

rrería, esto acentúa la mayor pérdida de nutrientes y semillas por la pendiente del lugar que supera el 10%. Cuando la precipitación se acerca al promedio establecido por Meteoblue (2018) de 300 mm, la vegetación puede desarrollarse satisfactoriamente.

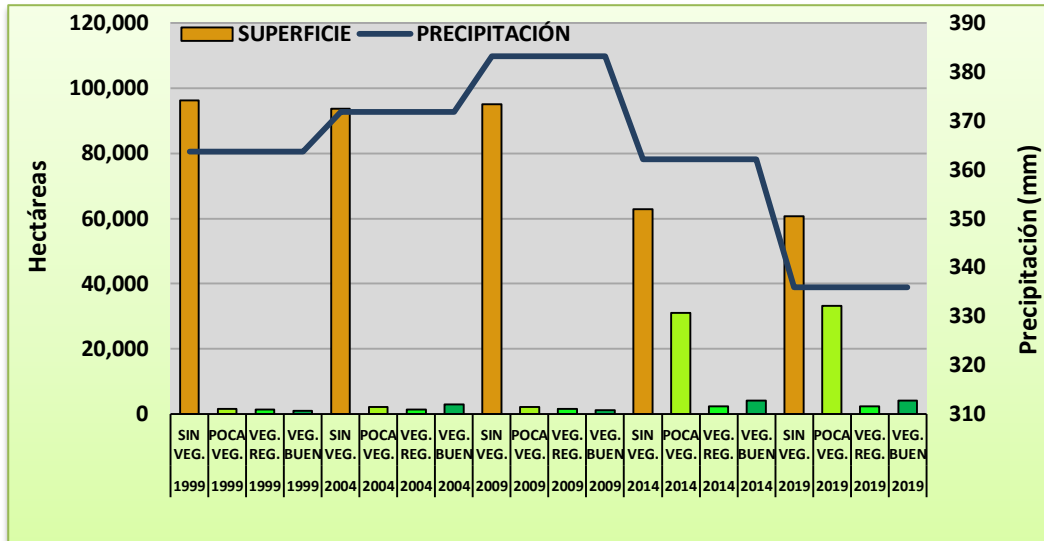


Figura 21. Interacción de índices de vegetación y precipitación

Conclusiones

- Se identificó 61 especies que están distribuidos en 26 familias, la mayoría de las unidades vegetales reconocidas cuentan con condiciones buenas para la especie Camélida. Cuentan con coberturas vegetales mayores al 60%.
- Los índices de vegetación evaluados NDVI, SAVI, NDWI y LST, permitieron caracterizar diferentes tipos de cobertura y el comportamiento de la vegetación durante 22 años de observación. El NDVI evaluó la dinámica de la cobertura vegetal donde hubo un incremento de 7.844 ha de vegetación. Con el SAVI se observa que hubo un incremento de 35.459 ha de vegetación.
- El NDWI evalúa la humedad en el suelo donde presenta un incremento de 2.969 ha. de áreas con baja retención de agua.
- Los mapas de LST muestran que la temperatura del suelo se incrementa de manera paulatina, durante el tiempo, en el *Parque Nacional Sajama*.
- La interacción de los índices de vegetación y los índices complementarios, muestran que el cambio climático presenta impactos en las praderas dentro del *Parque Nacional Sajama*. Para minimizar el impacto se ejecutaron proyectos agropecuarios para reducir ese impacto de deterioro de la pradera.
- La interacción entre los datos climáticos y los índices de vegetación, muestran que los factores climáticos interfirieron en el desarrollo de la vegetación, es así que a mayor temperatura y menor precipitación, la vegetación disminuye y aumenta la superficie sin cobertura vegetal.

Referencias citadas

- Ancasi D. 2012. Evaluación de la composición florística, química y carga animal de CANAPAS de la comunidad Jilauta Manasaya, provincia Sajama, Oruro. Tesis de grado. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia. 96 p.
- ArcGeek, 2018. Calcular la temperatura de la superficie terrestre con imágenes Landsat 8. *En línea*. Disponible en: <https://acolita.com/calcular-temperatura-superficie-tierra-imagenes-landsat-8/> Consultado el 19 de junio de 2021.
- Gonzaga 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. Tesis de maestría. Universidad Nacional de la Plata. Ecuador. 120 p.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos de Cambio Climático). 2021. Comunicado de prensa del IPCC, el cambio climático es generalizado, rápido y se está intensificando. *En línea*. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC_WGI-AR6-Press-Release-Final_es.pdf Consultado el 20 de septiembre de 2023.
- Mamani E. 2016. Evaluación de los recursos forrajeros nativos con imágenes satelitales en la comunidad Alto Peñas del municipio de Batallas provincia los Andes. Tesis de grado. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia. 141 p.
- Meteoblue. 2018. Archivo meteorológico de Bolivia. *En línea*. Disponible en: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/weatherarchive/bolivia_estados-unidos_4456615 Consultado el 22 de diciembre de 2022.
- SERNAP. 2020. Parque Nacional Sajama. *En línea*. Disponible en: <http://sernap.gob.bo/sajama/> Consultado el 13 de julio de 2021.