

**“APROXIMACIÓN AL ANÁLISIS TEMPORAL DE LA VARIACIÓN DEL
ALBEDO EN EL SALAR DE UYUNI, BOLIVIA, UTILIZANDO SERIES
TEMPORALES MODIS 2001-2020”**

Miguel Ángel Castellani Alegría

Tesis presentada al Instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile,

Para optar al grado académico de Magíster en Geografía y Geomática.

Profesores guías:

Profesor guía: Dr. Jorge Quense

Co-Profesor guía: Dr. Fernando D. Alfaro

Fecha:

19-03-2022

Santiago, Chile

© 2021, Miguel Ángel Castellani Alegría

© 2021, Miguel Ángel Castellani Alegría.

Se autoriza la reproducción total o parcial con fines académicos por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica que acredita al trabajo y su autor.

AGRADECIMIENTOS

En este gran viaje de la investigación, el profesional es llamado a la aventura, del cual decide tomar parte o retraerse. En esta Gran Odisea en la que se embarca, los mentores son los grandes sabios, que con su experiencia lo guiarán en las grandes batallas. Lo aconsejan y lo invitan a seguir adelante a pesar de las caídas y derrotas. Es así como, en primera instancia agradezco la disponibilidad y tiempo entregado por el Profesor Guía Dr. Jorge Quense y por el entusiasmo, tiempo y dedicación del Profesor Co-Guía Dr. Fernando Alfaro.

Los mentores son la gran espalda que posee el investigador primerizo. Pero no sería lo mismo sin el apoyo emocional, la contención, los consejos y las palabras de aliento recibidas por su grupo de Aliados, Amigos y Familia, que son el motor inicial para no perder el camino y no dejarse sucumbir ante la renuncia, el desgano y la frustración. Ante esto, agradezco al equipo académico de la Universidad Católica, quienes me dieron las herramientas necesarias para poder sortear los diferentes obstáculos en los que me vi envuelto. Al equipo directivo del Magíster en Geografía y Geomática de la Universidad Católica, por su comprensión y amabilidad en estos tiempos pandémicos. Los cuales, a mano abierta, nos abrieron oportunidades únicas para seguir adelante a pesar de vivir tiempos oscuros. Agradezco enormemente a Francisco Terraza, compañero y amigo, por su ayuda, consejos y aliento a seguir adelante. A Mis Padres, por su apoyo en todo sentido, desde el incentivo, los vítores y el apoyo incondicional en todo momento. Finalmente, agradezco de todo corazón a Erika Aguirre, por su entendimiento, por su tiempo, por su interés y su amor entregado en todo momento, desde entender y comprender mis frustraciones, hasta celebrar y festejar mis propios logros personales en este gran periplo.

Sin ellos, este viaje no hubiera iniciado. Y seguramente, no terminará luego.

“Para aquellos que no tienen imaginación,
un lugar en blanco en el mapa es un desperdicio;
para los demás es la parte más valiosa”
– Aldo Leopold, 1949.

TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	4
TABLA DE CONTENIDOS	5
INDICE DE FIGURAS.....	7
ÍNDICE DE TABLAS	8
ABREVIATURAS.....	9
RESUMEN.....	10
1. -PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.1.- El albedo.....	12
1.2.- Dinámica del balance energético en zonas de montaña	12
1.3.- Balance energético en la Puna Central	13
1.4.- Objetivo e hipótesis.....	15
1.4.1.- Objetivos Específicos	15
2.- MARCO TEORICO	15
2.1.- ¿Qué es el albedo?.....	15
2.2.- El albedo en la Puna Andina.....	17
2.3.- Relación entre albedo y temperatura.....	17
2.4.- Clima en la Puna Andina.....	18
2.5.- Teledetección con MODIS	19
2.5.1- MODIS BRDF	19
2.5.1.1.- MODIS BRDF Producto MCD43A1.....	20
2.5.1.2.- Temperatura con Modis	21
2.6.- Precipitación con ERA5	21
2.6.1.- ERA5-Land.....	22
2.7.- Google Earth Engine ¿Qué es y cómo funciona?.....	23
3.- ÁREA DE ESTUDIO.....	24
4.- MATERIALES Y MÉTODOS	26
4.1 MATERIALES	26
4.1.2.- IMÁGENES MODIS Y ERA5	26
ERA5-Land.....	27
4.2.- MÉTODOS.....	27

5.- RESULTADOS	28
5.1.- Tendencia anual del albedo, temperatura y precipitación	28
5.2.- Resultados tendencia estacional del albedo, temperatura y precipitación	32
6.- DISCUSIÓN.....	36
6.1.- Dinámica Temporal del albedo en los 20 Años	36
6.2.- Dinámica Temporal de la precipitación y la temperatura en los 20 años	37
6.3.- Interacción entre Temperatura y albedo	38
6.4.- Efecto del albedo y el Sistema de la Puna Andina.....	40
7.- CONCLUSION	40
8.- Bibliografía	42
ANEXOS.....	50

INDICE DE FIGURAS

Figura N°1: Plataforma Google Earth Engine

Figura N°2: Área de Estudio

Figura N°3: Diagrama ombrotérmico del Salar de Uyuni

Figura N°4: Valores promedios de albedo, temperatura y precipitación para las zonas de control y el salar

Figura N°5: Dinámica mensual de albedo, temperatura y precipitación para las zonas de control y el salar

Figura N°6: Promedio mensual de albedo, temperatura y precipitación para las zonas de control y el salar.

Figura N°7: Regresión Lineal entre los datos de albedo, temperatura y precipitación para las zonas de control y el salar.

Figura N°8: índice de diferencia entre albedo y temperatura

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°1: Albedo típico según tipo de superficie

Tabla N°2: Capas Vectoriales

Tabla N°3: Imágenes Ráster para el cálculo de altitud

Tabla N°4: Productos satelitales de la plataforma GEE

Tabla N°5: Scripts e Input utilizados en GEE

Tabla N°6: Diferencia significativa entre albedo, temperatura y precipitación.

ABREVIATURAS

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)

MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer)

BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Functions)

RTLSR (Función RossThick-LiSparse)

LST (Land-Surface Temperature)

ERA (ECMWF ReAnalysis)

ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast)

GEE (Google Earth Engine)

ENSO (El Niño Southern-Oscilation)

RESUMEN

La radiación reflejada o albedo, es una de las variables más influyentes en el balance energético de la tierra y, por ende, en la variabilidad del clima. Es por esta razón, que en los últimos años ha empezado a tomar relevancia para los modelos climáticos y predictivos, normalmente asociados a estudios de nieve. Sin embargo, el Salar de Uyuni, tanto por su ubicación, su tamaño y sus características geográficas, es un laboratorio natural para el estudio del albedo y cambio climático. Sus propiedades radiativas son ideales para realizar estudios de radiación UV, radiación reflejada y temperatura. Es por esto, que la presente investigación tiene por objetivo entender la variabilidad del albedo en el salar y establecer relaciones con factores como la temperatura y la precipitación, elementos asociados al cambio climático. Así, este estudio ha podido obtener que la tendencia promedio de los valores de albedo en el Salar de Uyuni supera significativamente a los valores obtenidos en las afueras de este ($F: 1349; p < 0,001$), caso contrario con la temperatura, la cual presenta una inversión en el patrón, donde en el salar se registran temperaturas de alrededor de 15°C y en las afueras de 30°C ($F: 579,6 p < 0,001$). Mientras que, con la precipitación, no se encontraron diferencias significativas. Además, se obtuvo que existe una mayor amplitud de los datos anuales en el salar, tanto de albedo y temperatura, en comparación a las zonas aledañas debido, posiblemente, por las propiedades ópticas propias del salar. Esta información recopilada, entrega una aproximación de la dinámica del albedo, la temperatura y la precipitación en el Salar de Uyuni en un periodo de 20 años. De tal modo de demostrar la potencialidad del Salar para eventuales estudios de cambio climático, modelación y predicción.

Palabras clave: *Cambio Climático, variabilidad climática, Albedo, Temperatura, Precipitación, Salar de Uyuni.*

ABSTRACT

The reflected radiation or albedo, is one of the most influential variables in the Earth's energy balance, therefore, in the climate variability. It is for this reason that in recent years it has begun to gain relevance for climate and predictive models, normally associated with snow studies. However, in the Salar de Uyuni, due to its location, size and geographical characteristics, it is a natural laboratory for the study of albedo and climate change. The radiative properties are ideal for studies related with UV radiation, reflected radiation and temperature. It is in that way, that this research has the objective to understand the variability of the albedo's salar and establish relations with climate factors like temperature and precipitation. In that way, it has been possible to obtain that the value trend average's albedo in the Salar de Uyuni, significantly exceeds the values outside of this (F:1349; $p < 0,001$), otherwise with the temperature, which presents an inversion in the pattern, where temperatures around 15°C are recorded in the salar and 30°C on the outskirts (F:579.6; $p < 0,001$). While with precipitation, has not found any significance difference. In addition, it was obtained that there is a greater amplitude of the annual data in the salar, both for albedo and temperature, compared to the surrounding areas, possibly due to the optical properties of the salar. The information that we obtained, deliveries an approximation of the dynamics of the albedo, temperature and precipitation in the Salar de Uyuni in a 20 years period. In this sense, we demonstrated the Salar potenciality for eventuals climate change studies, modeling and prediction.

Palabras clave: *Climate change, Climate variability, Albedo, temperature, precipitation, Salar de Uyuni.*

1. -PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este capítulo exploraremos el contexto ambiental del balance energético y su dinámica actual. Definiremos conceptos claves que serán la base fundamental para entender la motivación de este estudio. Finalmente se enunciará el objetivo principal y los objetivos secundarios.

1.1.- El albedo

La energía proveniente del sol, al momento de llegar a la superficie de la tierra, funciona como promotor de los procesos químicos, físicos y biológicos. Aun así, no toda la energía que llega es utilizada, al menos una parte de esta energía (alrededor del 29%) es disipada por el planeta y devuelta al espacio (Graeme, 2015). Este proceso natural, permite mantener un balance energético entre la energía recibida y la reemitida o bien llamado, albedo (Payne, 1972; Hachikubo, 2000; Coakley, 2003; Dobos, 2005; Winton, 2008; Gaffin, 2012), lo que permite a su vez regular la temperatura del planeta.

El albedo (Radiación reflejada a la atmósfera) es una unidad adimensional, que cuantifica la reflectividad de una superficie, también conocido como la blancura o “Whiteness” de una superficie (Coakley, 2003). Este proceso de intercambio energético es muy sensible a las alteraciones en el color de las superficies, las cuales afectan su capacidad de absorber y reflejar la radiación solar (Coackley, 2003; Dobos, 2005; Pérez, 2010; Cotana, 2014). Es así como, cualquier proceso que altere este balance determinará los cambios en el clima, demostrados en modelos simples de balance de energía del sistema climático (Graeme, 2015). Por ejemplo, el albedo puede afectar la circulación y distribución del calor en la atmósfera, lo que en última instancia podría llegar a afectar al clima (Budyko, 1969; Cahalan, 1979; Magaña, 2004; Graversen, 2014; Graeme, 2015; IPCC, 2021).

1.2.- Dinámica del balance energético en zonas de montaña

La dinámica temporal del albedo en las últimas décadas sugiere una disminución de la radiación reflejada debido principalmente a la disminución acelerada de superficies

reflectantes, como los casquetes polares, lo que determina un aumento de temperatura superficial del suelo (IPCC, 2021). Este aumento de temperatura y cambios en la superficie, (que produciría cambios en el balance energético o albedo), implicaría cambios importantes en las temperaturas globales, en el régimen de vientos, en la formación de nubes, en el régimen de Precipitación y a su vez, en un incremento en la evaporación y la disminución de la humedad del suelo. Este desequilibrio en los balances energéticos de la superficie de la tierra y de la atmósfera, pueden alterar las condiciones climáticas a escala locales y por consiguiente sobre el clima global (Payne, 1972; Curry, 1995; Oropeza, 2004; Pelkowski, 2007; Santiago, 2008; Graeme, 2015; IPCC, 2021).

Los registros recientes de temperatura media global de la superficie indican un incremento de los $0,87^{\circ}\text{C}$, entre 2011-2015 (IPCC, 2021). Actualmente se estima que la temperatura global, ha aumentado en un $1,5^{\circ}\text{C}$, situación que puede notarse en las anomalías estacionales a nivel global (IPCC, 2021). En los ambientes de montaña, por ejemplo, se encuentran elementos reflectivos influyentes y sensibles al cambio climático, como son los mantos de nieve y glaciares (Pérez, 2010). Esto debido a sus propiedades radiativas y térmicas que modulan la transferencia de energía y masa en la interfaz entre la atmósfera y la superficie (Payne, 1971; Hachikubo, 2000; Dobos, 2005; Winton, 2008; Gaffin, 2012; Peña, 2019). Este tipo de propiedad es similar a la que poseen los salares en distintos ambientes limitados por agua a lo largo del planeta, en particular en los ambientes secos de los Andes Centrales (i.e., Altiplano o Puna Central), donde la radiación ultravioleta (UV) sobre la superficie altiplánica es aproximadamente un 20% superior al observado a nivel del mar (Aceituno, 1996).

1.3.- Balance energético en la Puna Central

La Puna central (i.e., centro sur de Bolivia, norte de Chile y Argentina) y el segmento noreste del desierto de Atacama. Se define como un bioma neotropical de tipo herbazal de montaña, que se sitúa principalmente en las partes más altas de los Andes centrales, alcanzando altitudes sobre los 3.000 m.s.n.m. (Morello, 2012). Las condiciones climáticas, propias del sector, inciden fuertemente en la conformación de vegetación, donde la falta de aguas lluvias, los vientos que pueden alcanzar una velocidad de 97 km/hra. y la fuerte incidencia de la

radiación solar, determina una vegetación principalmente conformada por arbustos y hierbas, suelos sin cobertura vegetal y en otras áreas, presentan grandes porciones de sus superficies cubiertas por salares, algunos permanentes y otros que se inundan estacionalmente (Beck, 2002; Morello, 2012; Izquierdo, 2016). Estos salares, se originaron con el levantamiento de los Andes y la actividad volcánica de hace 65 millones de años (De la Hoz, 2013). Entre levantamientos, arrugamientos y acortamientos del terreno, provocaron la formación de una amplia región endorreica, donde destaca el sistema del Lago Titicaca, Lago Poopo y el Salar de Uyuni (De la Hoz, 2013; Izquierdo, 2016).

Las escasas precipitaciones convierten a estas regiones en un sistema de desierto frío de altura. El aporte de agua durante el verano austral ya sea por precipitaciones pluviales o nivales, se infiltran, alimentando napas, manantiales y a veces brotan formando vegas de aguas dulces o saladas, denominados salares (De la Hoz, 2013). A su vez, por ser una zona particularmente volcánica, muchas de las aguas que brotan, están cargadas además de numerosos químicos dando a lugar distintos tipos de sales, como carbonatos, sulfatos u otros (Alonso, 1996; Allmendinger, 1997; De la Hoz, 2013, Nacif, 2014).

La Puna Central de Bolivia, es uno de los grandes plateau en el mundo, asociado a la abundancia de magma (Allmendinger, 1997). Dada su ubicación y características geomorfológicas, es que se originaron dos grandes salares (Salar de Coipasa y el Salar de Uyuni) que en su conjunto, representan cerca del 48% de suelo cubierto por la sal en Sudamérica. Este último con una superficie total de 10.582 km², siendo el mayor salar continuo del mundo (Alonso, 1996; Paoli, 2011; Nacif, 2014; Nunnery, 2018; Mignaqui, 2019; Jerez, 2021). El Salar de Uyuni, reconocido como el espejo de agua más grande del planeta, en conjunto con los demás salares del área, debido a su alta reflectividad, posicionan a la región andina como un sector sensible ante el aumento de temperatura global, principalmente por la continua disminución de agua-lluvia, lo que puede provocar el aumento de depósitos de polvo en la superficie del salar, y la aceleración de la evaporación que van cambiando las propiedades reflectivas de esta zona. (Pérez, 2010; Zaratti, 2010; Izquierdo, 2016; Fornillo, 2019; IPCC, 2021). Es así como creemos que el Salar de Uyuni, por sus propiedades tanto físicas como ópticas, es el área de estudio ideal para comprender el efecto

del cambio del albedo sobre la temperatura. Además de ser el puntapié inicial para el estudio del cambio del clima en la Región Alto Andina.

1.4.- Objetivo e hipótesis

Determinar el efecto de cambio en el balance radiativo asociado al albedo sobre la temperatura superficial del salar de Uyuni en la Puna Andina de Bolivia entre los años 2001 y 2020.

1.4.1.- Objetivos Específicos

- a) Identificar la dinámica anual del albedo, la temperatura y la Precipitación en la superficie a lo largo de la serie de tiempo 2001-2020
- b) Determinar los cambios estacionales en la relación al albedo, a la temperatura superficial y la Precipitación del salar de Uyuni
- c) Identificar los efectos de los eventos Niño y Niña (ENSO) sobre el albedo y la temperatura superficial del Salar de Uyuni.

2.- MARCO TEORICO

2.1.- ¿Qué es el albedo?

La energía proveniente del sol es la base para los procesos dinámicos, químicos y biológicos del sistema terrestre (Sagan, 1979; Pelkowski, 2007; Graeme, 2015). No sólo es la energía que llega, sino que también la energía que se disipa (Laval, 1986; Curry, 1995). Es así como este constante equilibrio energético puede afectar y ser afectado por variaciones en el clima, razón por la cual es un tema de elevado interés en la investigación asociada al cambio global (Strhaler, 1999; Hall, 2004; Andrade, 2007; Rauder, 2007; Graeme, 2015). Por ejemplo, los estudios sobre la luz reflejada nos podrían dar pistas del comportamiento del clima y como este, incide en el comportamiento de las superficies (Graeme, 2015) para que, de esta manera, se pueda predecir de mejor manera los potenciales cambios en el clima, asociados al aumento de las temperaturas a nivel global (Pelkowski, 2007; Graeme, 2015; IPCC, 2021).

El albedo se puede definir como la reflectividad de las superficies (Porteus, 1992). Es decir, a la energía reflejada desde la Tierra hacia el espacio (Porteous, 1992; Pelkowski, 2007). A grandes rasgos el albedo de superficie se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Ac = \frac{Rc}{Q}$$

Donde:

Ac: Albedo (onda corta)

Rc: Radiación reflejada de la superficie de la capa activa (onda corta)

Q: Radiación global

Los resultados se cuantifican entre 0 a 1 o en porcentaje. Donde 0 se refiere a una superficie perfectamente absorbente, la cual absorbe toda la energía proveniente del espacio, por ejemplo, el color negro y materiales como el hormigón, el asfalto o el mar, que se acercan al valor 0 o 0%. La absorción de energía solar en una superficie puede provocar el aumento de temperatura de esta. El valor de 1 o 100%, por oposición se refiere a una superficie perfectamente reflectante, la cual refleja toda la energía proveniente del espacio, ejemplo, el color blanco y superficies como la nieve o las nubes, que se acercan a este valor (Dirnhirn, 1974; Kukla, 1979; Wanner, 1996; Shaaf, 2002; Coackley, 2003; Riihelä, 2011; Graeme, 2015).

Los rangos típicos de albedo para diferentes superficies se estiman en:

Superficie	Albedo
Nubes	0,90
Nieve	0,66
Mar Polar	0,63
Suelo	0,50
Desierto	0,36
Pastizal	0,20
Tundra	0,17
Arena	0,15
Bosque	0,12
Océano	0,07

Tabla 1: Tabla de albedo Típico según superficie (Kukla, 1979; Coakley, 2003).

2.2.- El albedo en la Puna Andina

La Puna Andina, ubicada en los Andes Central, es una región fría, con temperaturas anuales promedio de 8°C, donde las temperaturas mínimas pueden alcanzar los -30°C. (Alonso, 2017). Además de una variada amplitud térmica diaria, donde se pueden alcanzar los 40°C en verano. Esta región, se caracteriza por vientos secos e intensos, alta heliofanía (horas de sol) y por su sobresaliente altitud (3600-3800 m.s.n.m). En esta región la mayor parte del año existe una escasa presencia de nubes, lo cual se traduce en una elevada incidencia de radiación solar y, por ende, una fuerte reflectividad en la superficie de los grandes salares, como el Salar de Uyuni (Andrade, 2007; Alonso, 2017). Una característica muy notoria de la Puna Andina, es su fuerte limitación en la disponibilidad de agua, asociada a la elevada evapotranspiración y las escasas precipitaciones, generalmente concentradas durante el verano austral, las cuales pueden alcanzar los 230 mm en promedio, y tienden a declinar con el aumento de la latitud (Andrade, 2007; Alonso, 2017).

2.3.- Relación entre albedo y temperatura

La temperatura de la atmósfera, como de las superficies, son el resultado de un equilibrio de balance energético, entre las radiaciones incidentes, la composición de la atmósfera, los cambios de superficies, la incidencia de las corrientes oceánicas y de la órbita terrestre (Useros, 2012). En este equilibrio, cuando llega a ser alterado por cualquier fuerza, tanto externa como interna, se traduce en cambios climáticos (Useros, 2012; Franch, 2013).

Uno de los grandes elementos que aportan y determinan este balance, es la radiación solar. La cual influye directamente en la temperatura terrestre (Useros, 2012; Franch, 2013). De la energía proveniente del sol, al menos un 31% es directamente devuelta al espacio por las nubes, aerosoles y los componentes propios de la atmósfera. El resto es absorbido por la misma atmósfera y la tierra, esta última, reflejando una pequeña parte (Dirmhirn, 1974; Wanner, 1995; Shaaf, 2002; Riihelä, 2011; Useros, 2012; Graeme, 2015).

Para poder mantener el balance energético, la tierra debe irradiar la misma cantidad de energía, y esta energía, es devuelta nuevamente hacia la tierra por la atmósfera, provocando el fenómeno de efecto invernadero natural, que permite calentar la superficie de

la tierra y hacerla habitable (Useros, 2012). Es este constante equilibrio de energías, la que nos permite subsistir. Desde las energías que llegan del espacio que calientan la tierra, y las energías que salen de esta para enfriarla. Así mismo, desde el final del Holoceno aproximadamente, este balance tuvo un carácter de retroalimentación positiva, en la cual, al aumentar la reflexión a la atmósfera de los rayos solares, permitía el enfriamiento de la tierra. En la actualidad, ocurre lo contrario, en la cual, la disminución de los elementos reflectivos, como lo son los casquetes polares principalmente, provoca una disminución del albedo y por ende aumenta la temperatura terrestre (Shaaf, 2002; Useros, 2012, IPCC, 2021).

2.4.- Clima en la Puna Andina

La meteorología y climatología en la Puna Andina es única, esto debido a que, en ninguna parte del mundo, existen montañas tan altas y con grandes extensiones en regiones subtropicales, como lo es en esta región subtropical de América del Sur. Es por eso, que la cordillera de los Andes y las planicies características de la Puna Andina, tienen una real participación en la circulación atmosféricas. Poseyendo climas únicos en el mundo (Prohaska, 1961). La Puna Andina, se caracteriza por una geografía muy variable, con una parte relativamente plana en la zona central, que se encuentra rodeada de montañas de gran altura, que conforman las dos cordilleras que delimitan el Altiplano boliviano (Aramayo, 2004). El clima es mayormente frío, con temperaturas anuales promedio de 5-7°C y con temperaturas máximas de 14-17°C y mínimas de -2 a -10°C bajo cero (Beck, 2002; Campero, 2013). Particularmente en el Altiplano, por sobre los 3.800 metros sobre el nivel del mar, presentan temperaturas medias entre los 12°C y los 14°C, y más arriba, por sobre la cordillera oriental, los promedios son menor a 2°C. Así mismo, las temperaturas mínimas registradas, se encuentran en las partes altas de la Cordillera Oriental con promedios de -7°C. (Campero, 2013).

El Altiplano Boliviano es uno de los tres centros globales de convección atmosférica (Fritz, 2001). Este posee un clima árido a semi-árido, la cual varía a lo largo de toda su extensión. Si bien, en la zona norte del Altiplano, las temperaturas alcanzan 15°C y las precipitaciones 700 mm/año (Rouchy, 1996). En la zona sur, específicamente en el Salar de

Uyuni, las temperaturas promedio registran 5°C y las precipitaciones se estiman en 100 mm/año (Chepstow, 2005). Por su altitud y su escasez de nubes, la radiación es muy fuerte, por lo que la evaporación excede los registros de Precipitación, promoviendo la formación y acumulación de la corteza de sal (Rouchy, 1996). La época húmeda de esta región ocurre durante el verano austral, entre diciembre a marzo (Svendsen, 2003; Gragg, 2004).

2.5.- Teledetección con MODIS

En este estudio se utilizó la información proporcionada por el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Este opera tanto en la superficie de tierra como en la superficie de agua. Tiene un ancho de observación de 2.330 km y visualiza el planeta completo cada uno o dos días. Posee una resolución espectral de 36 bandas que oscilan entre 0,405 y los 14,385 μm . Y se puede obtener información en tres diferentes resoluciones espaciales: 250m, 500m y 1.000m (NASA, 2021).

2.5.1- MODIS BRDF

El subproducto MODIS BRDF/Albedo combina registros temporales con corrección atmosférica de reflectancia superficial de los datos obtenidos por los instrumentos MODIS y MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer) para ser ajustados bajo la función de distribución de reflectancia bidireccional o BRDF por sus siglas en inglés (Bidirectional Reflectance Distribution Functions) en siete bandas del espectro a 500 m de resolución espacial en un ciclo de 16 días. Se ha comprobado que este producto posee una alta confianza en la calidad de albedo. Con sus funciones internas, garantiza un producto consistente tanto temporal como de relieve (Strahler, 1999; Shaaf, 2002; Moody, 2007; Medrano, 2013; NASA, 2021).

El BRDF es definido como el ratio de la radiancia dispersa por una superficie dentro de una dirección específica de la radiancia incidente unidireccional en la superficie. Así el satélite estima las medidas de BRDF a través de la integración de las medidas de radiancia sobre las diferentes vistas geométricas (Salomon, 2006).

Esta función depende y está determinado por múltiples factores como las propiedades estructurales y ópticas de la superficie. Es así, que esta es necesaria en la teledetección para la corrección de los efectos del ángulo de visión y de iluminación para estimar el albedo. La utilización de esta función proporciona la condición de límite radiométrico inferior para cualquier problema de transferencia radiativa en la atmósfera y, por ende, significativo para la creación de modelos climáticos y para los estudios de investigaciones de balance energético (Shaaf, 2021).

2.5.1.1.- MODIS BRDF Producto MCD43A1

El producto utilizado para el siguiente estudio es el MODIS BRDF MCD43A1 al cual se le aplica el modelo semiempírico BRDF, utilizando las funciones RossThick-LiSparse (RTLSR) para la caracterización de la dispersión isotrópica, de volumen y de superficie (Wanner, 1995; Lucht, 2000; Schaaf, 2002; 2011). Esta función es la más utilizada por la comunidad científica por ser efectiva ante un gran número de situaciones prácticas, permitiendo así, reproducir una amplia variedad de formas de BRDF, siendo estable para condiciones de observación angular reducido (Verger, 2005).

Utilizando las medidas de reflectancia de MODIS como inputs, el modelo RTLSR comienza a describir la reflectancia de la superficie en cualquier dirección como una función de iluminación y ángulos de visión de una parte del espectro electromagnético deseado. El modelo RTLSR, se reproducen bajo a tres kernels diferentes: Una dispersión geométrica o superficial (f_1), en volumen (f_2) y un término isótropo que toma ordenes superior de dispersión (kernel constante). El Modelo RTLSR es el resultado de combinar los kernel geométrico LiSparse y el Kernel de volumen RossThick (Verger, 2005; Salomon, 2006).

Modelo RTLSR

$$R(\theta_i, \theta_v, \Phi, \lambda) = k_0(\lambda) + k_1(\lambda)f_1(\theta_i, \theta_v, \Phi) + k_2(\lambda)f_2(\theta_i, \theta_v, \Phi)$$

R = Reflectividad

θ_i = Ángulos cenitales de iluminación

θ_v = Ángulos cenitales de observación

Φ = Ángulo acimutal relativo

λ = Longitud de Onda

El albedo superficial entonces será descrito como una fracción de la energía del sol reflejada en un punto y tiempo dado. Para una mejor visualización, a los resultados se le aplica el factor de escala de 0.001. Gracias al modelo BRDF, es que el albedo intrínseco se describirá con las características de la superficie (Gao, 2005; Salomon, 2006; Tian, 2021).

2.5.1.2.- Temperatura con Modis

Para los datos de temperatura se utilizó la versión MODIS/006/MOD11A1 Land Surface. Del producto MODIS versión 006. Este producto fue creado como una secuencia de productos que inician con una escena y que se procesan. Obteniendo transformaciones tanto espaciales como temporales, para día, para 8 días y productos globales de carácter mensual (NASA, 2021). De este producto se utilizó la banda denominada LST_Day_1km. Donde sus valores se representan en Kelvin y tiene una resolución espacial de 1 km (NASA, 2021).

El subproducto MOD11A1 LST se construye con los valores diarios de píxeles LST (Land-Surface Temperature) en cada gránulo recuperado por el algoritmo de Split-Window generalizando bajo las condiciones de cielo despejado definidas previamente por MOD35 (Con una confianza $\geq 95\%$ sobre tierra $\leq 2000\text{m}$ o $\geq 66\%$ sobre tierra $> 2000\text{m}$, y de una confianza de un $\geq 66\%$ sobre lagos) (NASA, 2021). Esto se realiza mediante el mapeo de todos los datos LST válidos de Cielo Claro en su proyección sinusoidal y promedia los valores LST de cada píxel superpuesto en cada cuadrícula con áreas superpuestas y su peso (NASA, 2021).

2.6.- Precipitación con ERA5

Los productos ERA (ECMWF ReAnalysis) son desarrollados por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo (European Centre for Medium-Range Weather Forecast o ECMWF) que tiene por objetivo, la proporción de pronósticos meteorológicos globales precisos (ECMWF, 2021).

Los productos ERA, tienen como finalidad, realizar un reanálisis atmosféricos o meteorológico y climático. En el cual toman datos históricos de observación atmosférica que abarcan algún periodo prolongado y se entrecruzan con modelos actuales para la generación de series de tiempo consistentes de múltiples variables climáticas del globo (ECMWF, 2021).

Este principio es llamado de Asimilación de datos, y se basa en la utilización del método empleado por los diversos centros de predicción numérica del tiempo, donde cada X cantidad de horas, en el caso de ECMWF son 12, se combina un pronóstico anterior con observaciones recientemente disponibles para así producir una nueva estimación del estado de la atmósfera, de la cual se emite un pronóstico mejorado y actualizado (Hersbach, 2018). En el caso particular de los Reanálisis, funcionan a una resolución menor, para justamente permitir la provisión de un gran conjunto de datos temporales. Como la reanálisis no tiene la obligación de emitir pronósticos, existe mayor tiempo para recopilar observaciones y datos que complementen y ayuden a mejorar la certeza de los pronósticos pasados (Hersbach, 2018).

2.6.1.- ERA5-Land

Para los datos de Precipitación, se utilizó el producto ERA5-Land Monthly de Copernicus, que posee una resolución espacial de 9 km y una resolución temporal de 1 hora desde 1981 (ECMWF, 2021). Este nos entrega un conjunto de datos de reanálisis que proporciona una visión coherente de la evolución de diversas variables de la tierra desde 1981 (Muñoz, 2021; ECMWF, 2021). El producto ERA5-Land reproduce el componente terrestre de la reanálisis climática ECMWF ERA5. Este proceso combina datos de los modelos con observaciones de todo el mundo en un gran y único conjunto de datos coherentes y completo a nivel mundial utilizando las leyes de la física. Este producto proporciona una visión coherente y de los ciclos del agua y la energía a nivel de superficie (Muñoz, 2021; ECMWF, 2021).

La banda utilizada para este estudio se denomina Total_Precipitation, donde se obtienen datos de agua líquida y congelada acumulada, incluida la lluvia y la nieve que cae en la superficie. Es la suma de la Precipitación a gran escala y la Precipitación convectiva (Muñoz, 2021; ECMWF, 2021). Estas variables no incluyen la niebla ni el rocío o la

Precipitación que se evapora en la atmósfera antes de aterrizar en la superficie. Esta variable es un acumulativo desde el comienzo del tiempo pronóstico hasta el final del paso del pronóstico (Muñoz, 2021; ECMWF, 2021).

2.7.- Google Earth Engine ¿Qué es y cómo funciona?

Una de estas últimas plataformas que está adquiriendo fuerza para la obtención de información espacial y satelital, es Google Earth Engine (GEE). Una nube digital, diseñada para almacenar y procesar una enorme cantidad de datos a escala planetaria (a una escala de Petabyte). Google ha archivado información satelital, desde las primeras misiones Landsat, hasta las últimas misiones Sentinel, pasando por una gama de diferentes sensores, y las ha unido al motor de la nube digital para una fuente Open Source (Gorelick, 2017; Kumar, 2018; Mutanga, 2019).

Esta nueva forma de observación de data espacial se traduce en una democratización de información, dado que es de relativo fácil acceso y amigable con el usuario. Esto debido a que como usuario puedes utilizar la información entregada por la nube o subir tus propios dataset para poder trabajarlos a gusto (Mutanga, 2019). Se podría decir, que su única desventaja, es el lenguaje de programación que utiliza la plataforma para realizar los procesos. Lo que limita al usuario novato, pero no imposible de aprender y manejar (Gorelick, 2017).

Esta plataforma posee información desde Landsat, Sentinel, MODIS y ASTER. Siendo una base de datos ideal para poder trabajar con Mapeo de cobertura de suelo, aplicaciones para agricultura, manejo de desastres y ciencias de la tierra y sobre todo análisis temporales. (Gorelick, 2017; Kumar, 2018; Mutanga, 2019)

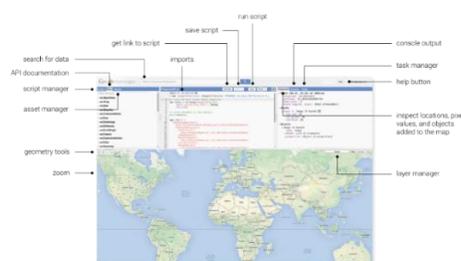


Figura 1: Plataforma Google Earth Engine (Fuente: Google Earth Engine, 2020).

3.- ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en uno de los tercios del “Triángulo del litio” (Área conformada por Bolivia, Argentina y Chile) y que equivale alrededor de un cuarto de los recursos mundiales de Litio (Fornillo, 2022). Una de las características de esta zona, es la presencia de grandes salares y lagos salados, remanentes de antiguos sistemas lacustres (Molina, 2007; Gragg, 2008; Sieland, 2014). La superficie y el nivel de los lagos que conforman el altiplano ha variado considerablemente en los últimos 200.000 años, lo que se les atribuye principalmente a los cambios temporales de temperatura y Precipitación (Molina, 2007). Al ser una zona particularmente árida, es más sensible al cambio en la Precipitación y evaporación (Molina, 2007). Esta gran superficie de sal es un lago que se seca estacionalmente. Las precipitaciones en esta región son las más bajas de Bolivia, con registros que rodean los 200 mm/año, que disminuyen hacia la cordillera y la frontera con Chile (Fig.N°3) (Aramayo, 2004; Molina, 2007; Campero, 2013).

El Salar de Uyuni ($20^{\circ}27'34,8''$ S, $66^{\circ}49'30,1''$ O) (Fig.2a) se ubica en el sur de Bolivia, en el Departamento de Potosí, sobre los 3.653 m.s.n.m. (De la Hoz, 2015) (Fig. N°2c). Es el salar más extenso del mundo, con una superficie que supera los 10.000 km² aproximadamente (Sieland, 2014).

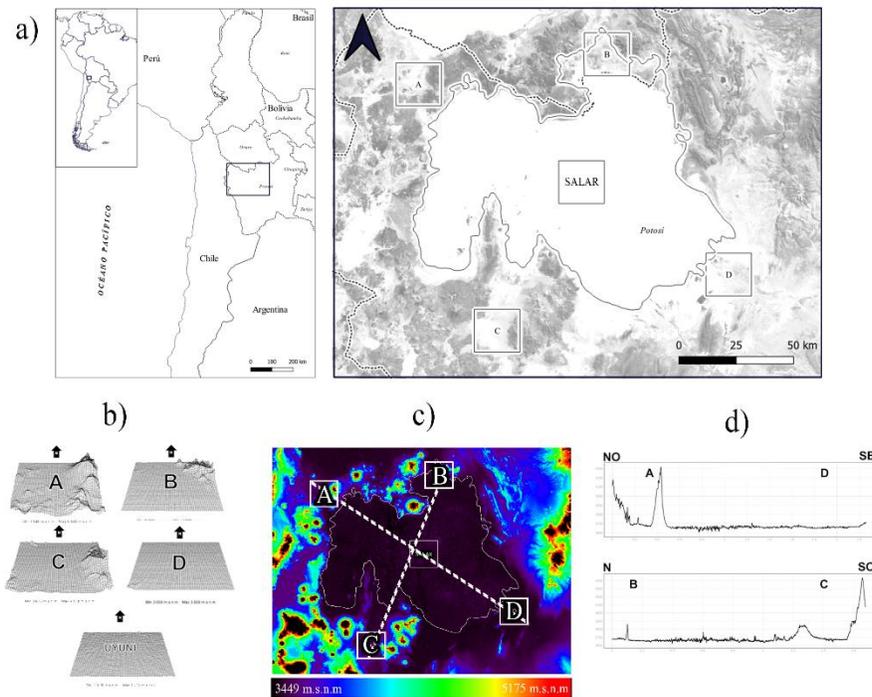


Figura 2: Descripción del área de estudio. a) Localización geográfica del salar de Uyuni, ubicado en el departamento de Potosí, Bolivia. $20^{\circ}27'34.8''$ S, $66^{\circ}49'30.1''$ O. b) Detalle de la orografía de cada Zona de Control. c) Mapa gradiente altitudinal y transectos topográficos. 4) Perfiles Topográficos que dan cuenta las diferencias altitudinales entre el Salar y las Zonas de Control Fuente: Elaboración Propia.

Debido a su hipersalinidad las fluctuaciones de temperatura y humedad, además de la elevada exposición a la radiación UV y su elevada concentración de agentes caotrópicos como $MgCl_2$, $LiCl$ y $NaBr$, el Salar de Uyuni se considera un entorno poliextremo, es decir, un ambiente con variadas condiciones concomitantes, o que actúan en conjunto. Una de las características más relevantes de este salar, es su homogeneidad en superficie (Fig. 2d), lo que le entrega propiedades de reflexión prácticamente isotrópicas (Andrade, 2007; Alonso, 2017; Martínez, 2021). Y es justamente que, con esta propiedad en particular, además de las condiciones climáticas poco variables, bajo ozono, escasa presencia de partículas de aerosol y la escasa presencia de nubosidad en la zona, lo que provoca una alta incidencia en radiación solar, es un lugar idóneo para realizar estudios de balance radiativo (Andrade, 2007).

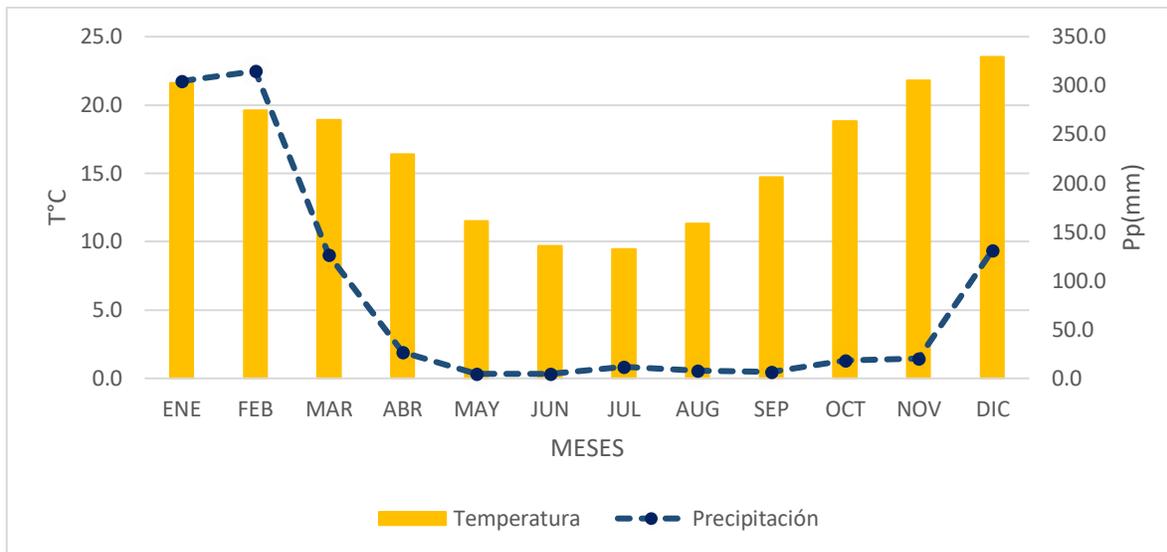


Figura 3: Diagrama ombrotérmico promedio de Uyuni periodo 2001-2020. Fuente:
Elaboración propia.

4.- MATERIALES Y MÉTODOS

En el siguiente capítulo, se profundizará en los materiales utilizados para obtener la información necesaria para el cumplimiento de los objetivos planteados. Además de la metodología empleada.

4.1 MATERIALES

4.1.2.- IMÁGENES MODIS Y ERA5

Para la obtención de los perfiles topográficos y el gradiente de altitud, se obtuvieron los Modelos de Elevación del Geoportal Bolivia (2002) (Tabla N°3)

NOMBRE	FORMATO	FUENTE
ASTGTM2_S20W067	TIFF	Geoportal Bolivia, 2021
ASTGTM2_S20W068	TIFF	Geoportal Bolivia, 2021
ASTGTM2_S20W069	TIFF	Geoportal Bolivia, 2021
ASTGTM2_S21W067	TIFF	Geoportal Bolivia, 2021
ASTGTM2_S21W068	TIFF	Geoportal Bolivia, 2021
ASTGTM2_S21W069	TIFF	Geoportal Bolivia, 2021

Tabla 3: Imágenes Ráster obtenidas para el cálculo de altitud en el área de estudio.

Para obtener los datos de albedo, temperatura y Precipitación, se utilizaron imágenes MODIS y ERA5 que se encuentran en la plataforma de Google Earth Engine (Tabla 4)

SENSOR	PRODUCTO	BANDA	DATO	FECHAS	N° de Imágenes
MODIS BRDF	MCD43A1	BRDF_Albedo_Parameters_vis_iso	BDRF/Albedo isotropic parameter for the visible band	2001-01-01 AL 2021-01-01	9066
MODIS	MOD11A1	LST_Day_1km	Daytime Land Surface Temperature	2001-01-01 AL 2021-01-01	7300
ECMWF	ERA5-Land	Total_Precipitation	Total precipitation (monthly sums)	2001-01-01 AL 2021-01-01	252

Tabla 4: Productos utilizados de la plataforma GEE para la obtención de variables albedo, temperatura y Precipitación.

4.2.- MÉTODOS

Extracción de Capas Vectoriales:

- a) Lo primero que se realizó para obtener la información deseada, fue extraer de la capa “salar” del Catastro de Salares de Bolivia, el Salar de Uyuni. Con el objetivo de obtener datos de tendencia general y de control.
- b) De las cinco zonas de control utilizadas, cuatro se encuentran distribuidas alrededor y fuera del salar y una se encuentra en la zona más extensa e interior del salar, para así evitar información obtenida de píxeles de borde.
- c) Utilizando las zonas de control como input, se les realizó una Zona de Influencia de 20 km para cada uno. Estos serán nuestras áreas de control para la obtención de data, con el fin de estudiar semejanzas o diferencias en la obtención de datos, tanto dentro como fuera del salar.
- d) Una vez obtenido estas áreas, se exportaron como capas vectoriales y posteriormente comprimidas en Zip para ser subidas a Google Earth Engine.
- e) En GEE utilizamos Scripts ¹ para poder extraer los datos temporales de albedo, temperatura y precipitación desde el año 2000 al 2020, tanto para el área de estudio, para el área del Salar de Uyuni y para los cuadrantes, donde posteriormente se establecieron los parámetros de descarga de datos (Tabla 5).
- f) A los datos de albedo se le aplicó el factor de escala 0.001, para su mejor interpretación.
- g) Los datos de temperatura fueron convertidos desde Kelvin a Celsius.

¹ Anexo N°3: Script para la obtención de albedo | Anexo N°4: Script para la obtención de temperatura | Anexo N°5: Script para la obtención de precipitación

- h) Los datos de precipitación fueron trabajados para obtener valores en mm y no en litros.
- i) Finalmente, se descargaron las imágenes correspondientes a los promedios mensuales de albedo, temperatura y precipitación²
- j) Al descargar la información, pudimos notar que, en la época invernal de cada año, sobre todo en el periodo 2000-2010, entre los meses de mayo a octubre, los píxeles que conforman gran parte del salar no tenían registro de datos de albedo (NULL) en la Zona de Control. Situación que se pudo sortear, promediando todas las imágenes con datos de cada mes en un software de procesamiento de imágenes para obtener una aproximación al valor de albedo faltante.

SCRIPT	DATASET	SERIE DE TIEMPO	MÉTODO	PRODUCTO
ALBEDO_SCRIPT	Ptos_ctrl.shp MODIS/006/MCD43A1	2000-01-01 / 2021-01-01	Extracción vía gráficos	Datos temporales de albedo en las zonas de Control
TEMP_SCRIPT	Ptos_ctrl.shp, MODIS/006/MOD11A1	2000-01-01 / 2021-01-01	Extracción vía gráficos	Datos temporales de temperatura en las zonas de control
PP_SCRIPT	Ptos_ctrl.shp, ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY	2000-01-01 / 2021-01-01	Extracción vía gráficos	Datos temporales de precipitación en las zonas de control

Tabla 5: Scripts y data utilizada en GEE. Fuente: Elaboración Propia

Finalmente utilizando un software estadístico en conjunto con softwares de manejo espacial, se realizaron los gráficos finales y se promediaron los ráster obtenidos desde la plataforma GEE.

5.- RESULTADOS

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos en este estudio. Donde se analizará la tendencia anual del albedo y la temperatura, seguido de la tendencia mensual, para finalizar con un análisis espacial de la dinámica de las variables estudiadas.

5.1.- Tendencia anual del albedo, temperatura y precipitación

La tendencia promedio de los valores de albedo en el Salar de Uyuni (Fig. 4a, Fig. 5a), supera significativamente a los valores obtenidos en las zonas de control (F : 1349, $p < 0,001$).

² Anexo N°6: Descarga de imágenes

Demostrando que, la reflectividad de este gran espejo de agua es muy efectiva, en comparación a los sectores de las zonas de control, que se caracterizan por ser suelos arenosos y secos. Por otro lado, la tendencia de temperatura anual de todos los datos recopilados, nos muestran una inversión del patrón (Fig. 4b, Fig. 5b). Es decir, las temperaturas medias obtenidas en las zonas de control (30°C), son superiores a las obtenidas en el Salar (15°C) ($F: 579,6, p < 0,001$). Lo que muestra las propiedades reflectivas diferentes entre las zonas de control y el Salar de Uyuni. En cuanto a la Precipitación, no se observan mayores diferencias entre el salar y las zonas de control, en donde la diferencia más significativa se observa para la zona de control D (Fig.4c, Fig.5c).

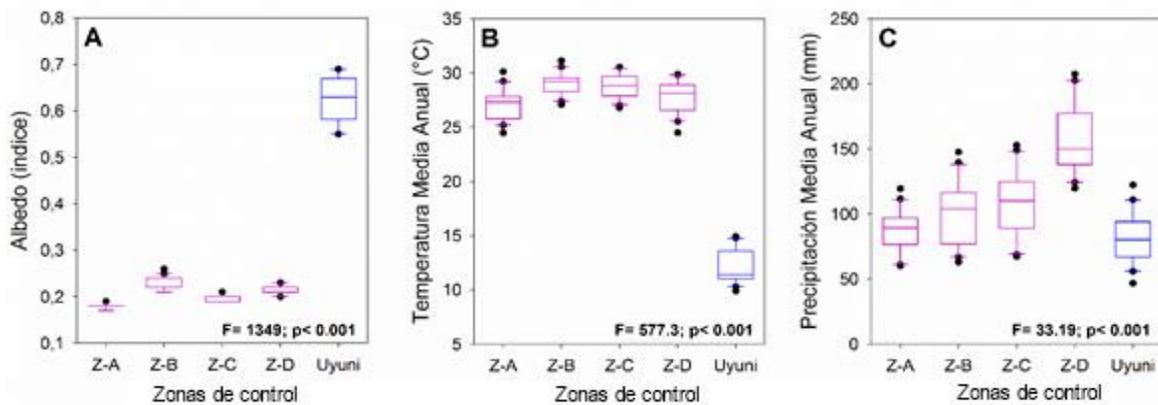


Figura 4: Variación en las condiciones ambientales entre el salar de Uyuni y las zonas de control (2001-2020) a) Patrón promedio de albedo para las cuatro zonas y el salar. b) Patrón promedio de temperatura Media Anual para las cuatro zonas y el salar. c) Patrón promedio de precipitación Media Anual para las cuatro zonas y el salar.

Al observar el promedio de los datos obtenidos tanto de albedo como de temperatura, se muestra la relación inversa que poseen durante los 20 años de estudio. Cuando la temperatura desciende por los 10°C, el albedo toma protagonismo en sus valores promedios altos de 0,65, lo cual lo podemos ver con mayor claridad en los años 2002, 2005-7, 2012-13, 2017-18 y 2020 (Fig.5). Años en los cuales se tienen registro de las mayores precipitaciones en modo general³. En caso contrario, cuando el albedo desciende a valores 0,6 a 0,55, es la

³ Anexo N°8: Dinámica de albedo, Temperatura y Precipitación para el Salar de Uyuni

temperatura quien se eleva, alcanzando hasta los 14,5°C. Comportamiento que se ve en los años 2004, 2009-10-11, 2014-15-16 y 2019⁴ (Fig.5).

Este comportamiento cíclico y marcado entre el albedo y la temperatura, se puede asociar al fenómeno del niño⁵ en la cual podemos ver que en los años en donde el efecto del ENSO (El Niño-Southern Oscillation) se hace presente y, por ende, provoca mayor precipitación en el invierno altiplánico. De lo contrario cuando se hace presente el efecto de climático de la Niña, esta provoca una disminución en las lluvias andinas, por ende, incrementa la temperatura en la zona y se teoriza que existiría una menor limpieza del salar. Efecto que podemos observar con mayor claridad para los años 2002, 2003, 2004 y para 2014, 2015 y 2016⁶ (Fig.5).

Anexo N°9: Dinámica de Albedo, Temperatura y Precipitación para las Zonas de Control

⁴ Anexo N°10: Dinámica de Albedo y Temperatura 2001-2020

⁵ Anexo N°12: Años ENSO periodo 2001-2020

⁶ Anexo N°12: Tendencia promedio anual de Albedo, Temperatura y Precipitación.

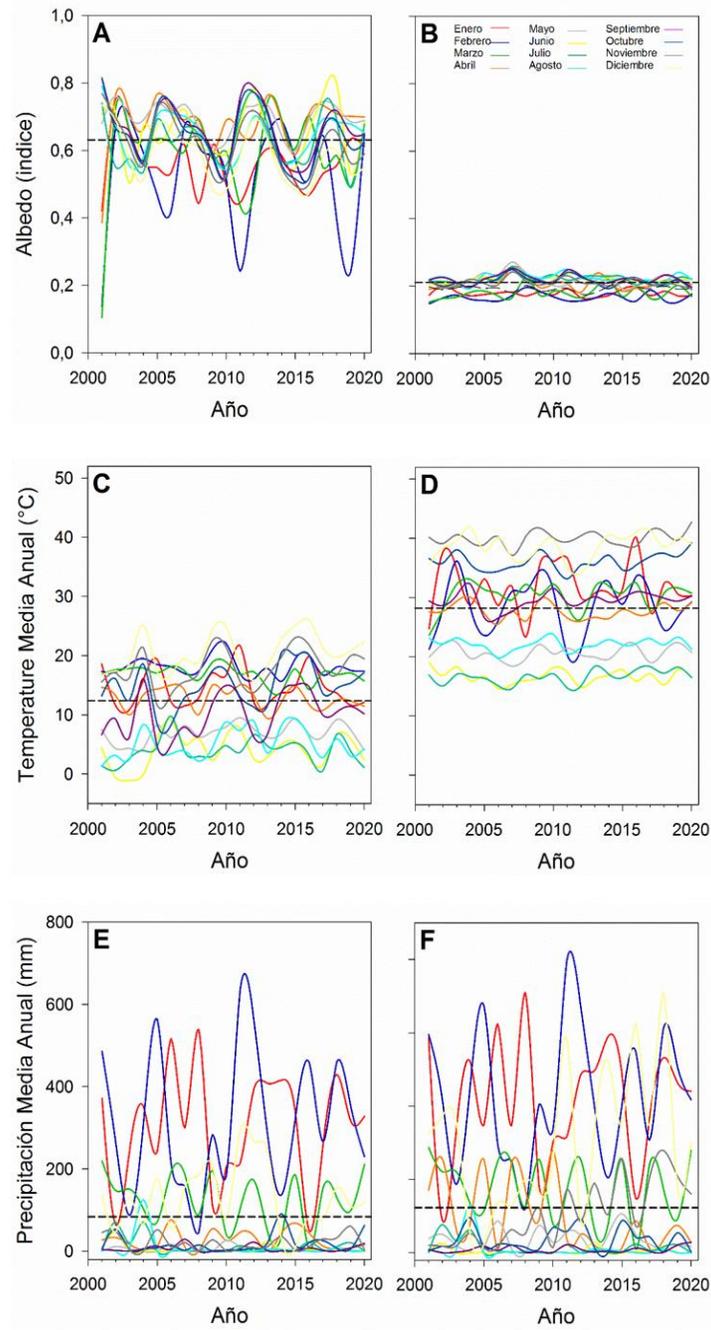


Figura 5: Variación mensual de las condiciones ambientales en el salar de Uyuni y zonas de control (2001-2020) a) albedo en el Salar de Uyuni. b) albedo en las zonas de control. c) temperatura en el Salar de Uyuni. d) temperatura en las zonas de control. e) precipitación en el Salar de Uyuni. f) precipitación en las zonas de control.

En cuanto a la dinámica de los datos en el salar, como en las zonas de control, tienen comportamientos diferentes. Podemos observar que la variabilidad de datos en el Salar de Uyuni, tiene mayor amplitud, que los obtenidos en las zonas de control. Siendo el albedo, la variable con mayor inestabilidad dentro del salar, en comparación a la temperatura, que si bien, son diferentes, la variabilidad es constante. Caso similar con la precipitación, en donde no se observan mayores diferencias con las zonas de control, demostrando que el albedo es más sensible a los pequeños cambios en el ambiente (Fig.5).

5.2.- Resultados tendencia estacional del albedo, temperatura y precipitación

Con respecto a la tendencia promedio mensual, se observa que la reflectividad durante los 12 meses en cada zona de control y en el salar poseen similar comportamiento. En cuanto a sus diferencias en valores de albedo son notorias (A: $F= 37,35$, $p < 0,001$ B: $F= 25,32$, $p < 0,001$; C: $F= 38,98$, $p < 0,001$; D: $F= 27,26$, $p < 0,001$; Salar: $F= 5,306$ $p < 0,001$), al igual que con la temperatura, dando a entender la amplitud térmica característica de la Puna Andina y del Salar de Uyuni.

Los meses con mayores diferencias perceptibles en albedo y temperatura, son los meses entre diciembre y abril donde las temperaturas alcanzan los 40°C en las zonas de control, y los 25°C para el caso del salar (Fig.6c, Fig.6d.), correspondiente al periodo del llamado “Invierno Boliviano”, que se provoca en la estación de verano del hemisferio sur, donde las precipitaciones pueden alcanzar los 800 mm, contra mayo a noviembre, donde las temperaturas mínimas registradas para los controles son del orden 10°C , y 0°C para el caso de salar, y las precipitaciones no superan los 100 mm en ambos casos. Salvo diciembre, el cual existe una mayor diferencia entre las zonas de control y el salar (Fig. 6e. Fig. 6f). Destacando así, que existen diferencias significativas en cuanto a valores, entre albedo y temperatura, entre temperatura y precipitación, más no entre albedo y precipitación (Tabla N°6)

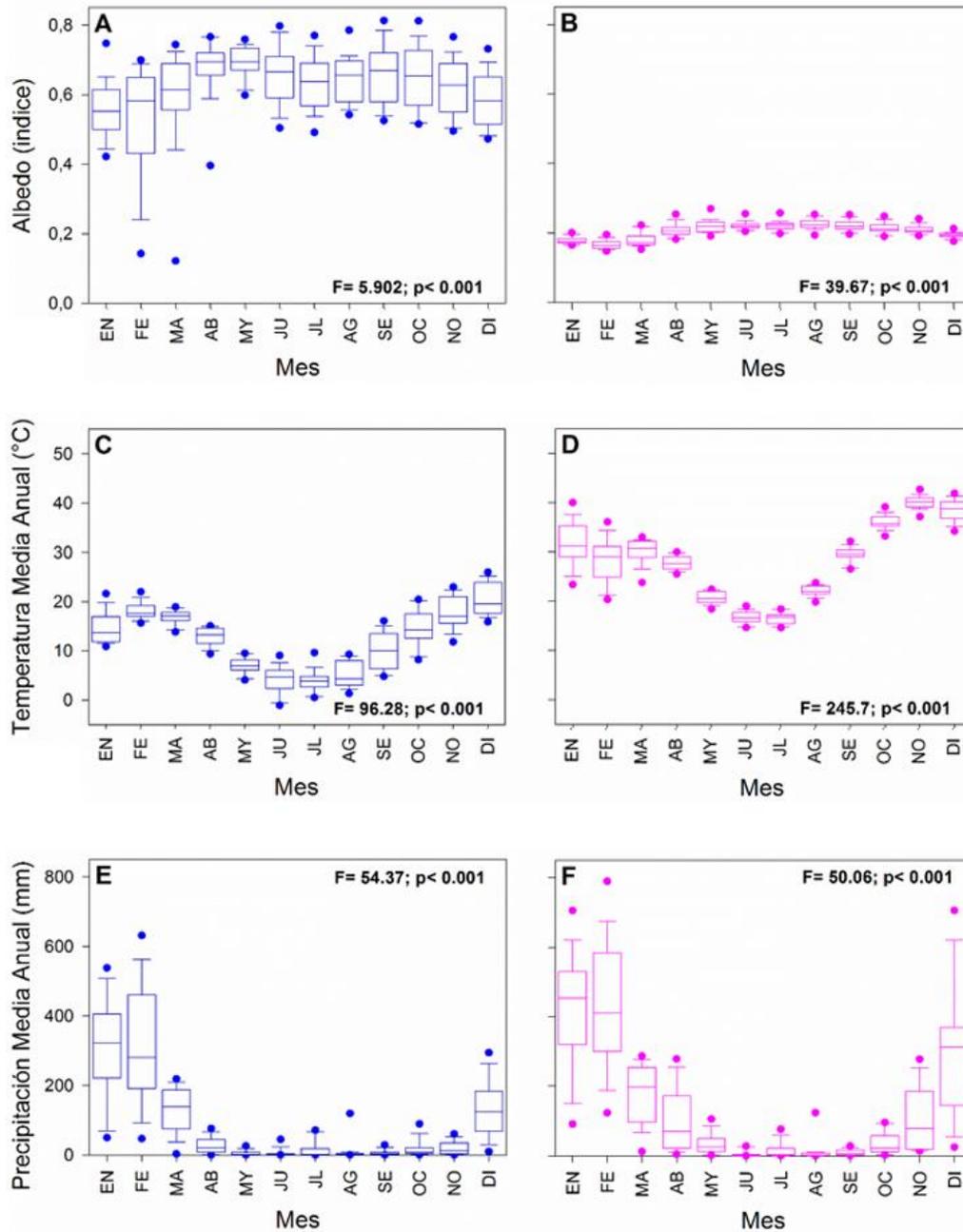


Figura 6: Variación en las condiciones ambientales del Salar de Uyuni y zonas de control (2001-2020). a) albedo en el Salar de Uyuni. b) albedo en las zonas de control. c) temperatura en el Salar de Uyuni. d) temperatura en las zonas de control. e) precipitación en el Salar de Uyuni. f) precipitación en las zonas de control.

Tal como se observa en la Figura N°7, existe una relación negativa y significativa entre albedo y temperatura, tanto para el salar de Uyuni (Fig.7a) como para las zonas de control (Fig. 7d) Lo que nos confirma que a medida que aumenta el albedo, la temperatura disminuye, tanto para el salar como para los controles fuera de este. Así mismo, mientras el albedo disminuye, la temperatura tenderá a aumentar. En cuanto a la relación entre albedo y precipitación, no se observan relaciones significativas para ninguno de los sitios (Fig. 7b, Fig. 7e).

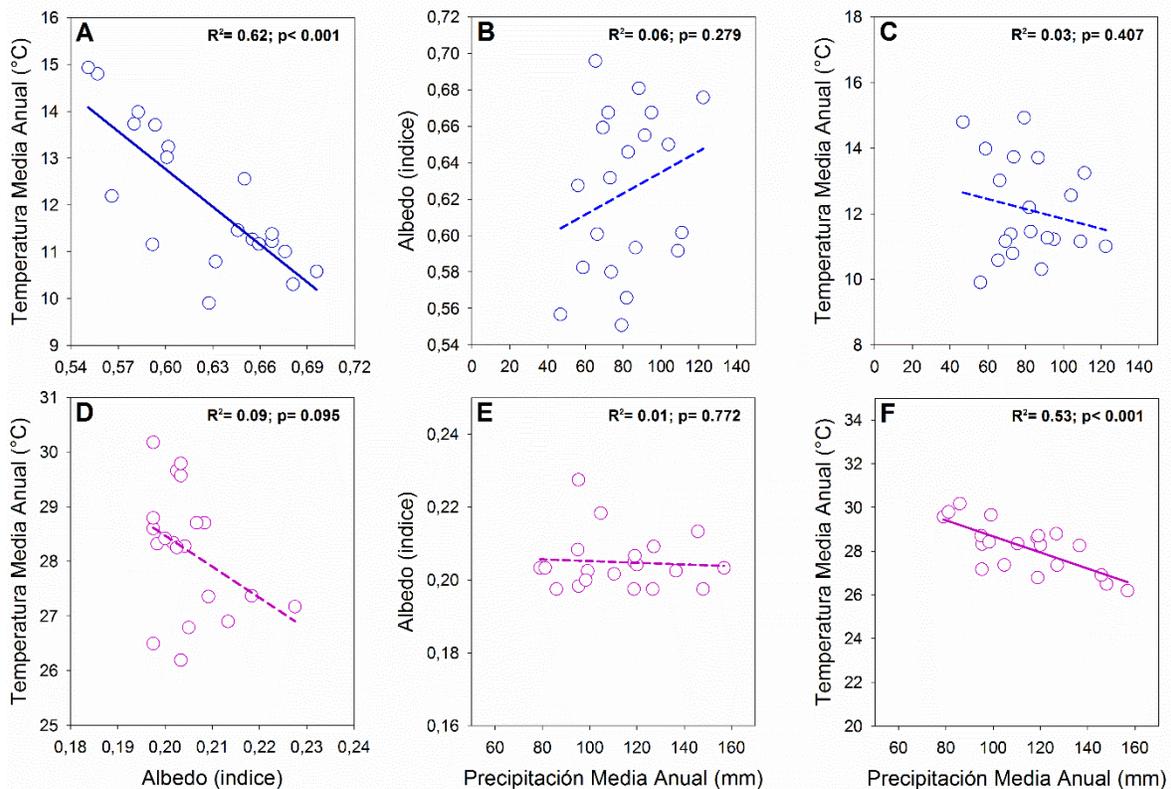


Figura 7: Regresión lineal entre variables. Línea continua: Diferencia significativa. Línea discontinua: No hay diferencia significativa. a) Regresión lineal entre temperatura media anual y albedo para el salar. b) Regresión lineal entre albedo y precipitación media anual para el salar. c) Regresión lineal entre temperatura media anual y precipitación media anual para el salar. d) Regresión lineal entre temperatura media anual y albedo para las zonas de control. e) Regresión lineal entre albedo y precipitación media anual para las zonas de

control. f) Regresión lineal entre temperatura media anual y precipitación para las zonas de control.

	ALB R ²	T° R ²	PP R ²
ALBEDO	-	0,349	0,056
TEMPERATURA	0,349	-	0,351
PRECIPITACIÓN	0,056	0,351	-

Tabla 6: Tabla de diferencia significativa entre albedo, temperatura y precipitación.

Esta misma información la podemos observar en la figura 8, donde en el salar en promedio, se registra una temperatura alrededor de 10°C y un albedo de alrededor 60%. Mientras que, en su alrededor, alcanza temperaturas aproximadas de 40°C, y un albedo de 8%. De esta manera se puede visualizar las diferencias significativas entre la superficie del salar y la superficie a su alrededor. En cuanto a las precipitaciones medias, podemos destacar que en la zona NE se registra mayor precipitación, alcanzando los 900 mm. Mientras que en las zonas SO, las precipitaciones descienden cerca de los 100 mm, pero su comportamiento no llega a ser relevante en cuanto a las diferencias entre superficies.

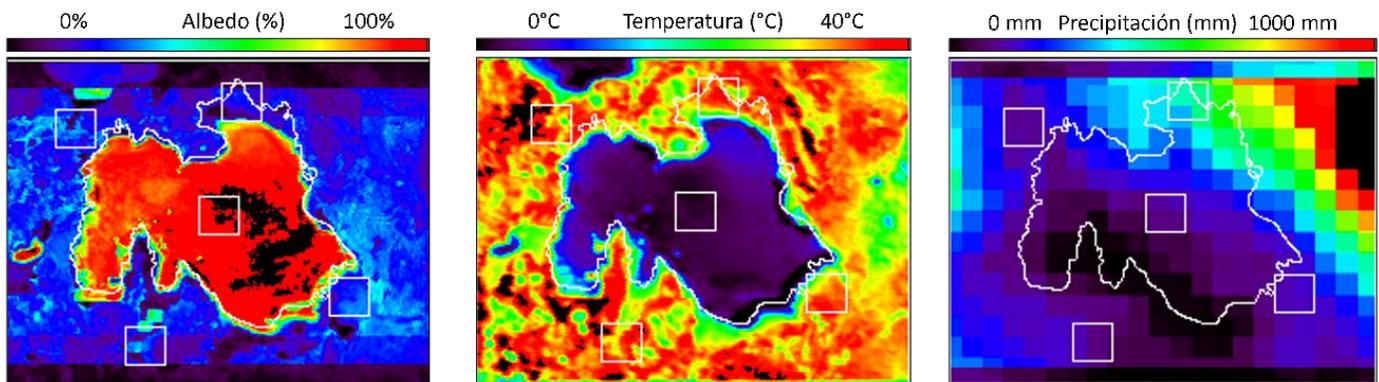


Figura 8: Promedio de la serie temporal de imágenes MODIS para albedo, temperatura y precipitación

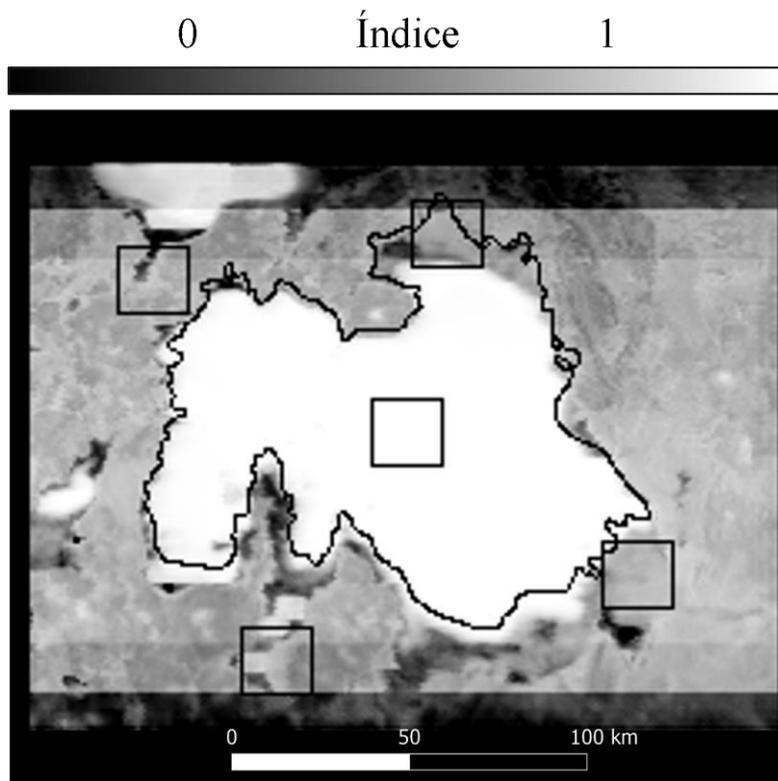


Figura 9: índice que resalta la diferencia en el territorio sobre temperatura y albedo. Blanco representa las mayores diferencias entre las variables.

6.- DISCUSIÓN

6.1.- Dinámica Temporal del albedo en los 20 Años

Según lo obtenido en este estudio, podemos observar que el albedo en la región central de la Puna Andina de Bolivia posee una dinámica cíclica de ± 3 años, con una leve tendencia a la disminución, que se observa a partir del año 2014-2016 en donde las máximas registradas no superan los 6,5. En cuanto al detalle mensual, podemos notar que existe una diferencia significativa entre los meses de verano y el resto del año. Como lo observado por el equipo de Zaratti, (2010), quienes dieron cuenta que existen diferencias entre los valores de albedo entre mayo y noviembre en un periodo de estudio de tres años. Y una disminución del 30% en valores de albedo entre mayo del 2004 y mayo del 2008 para estudios en estaciones locales, pero sin obtener diferencias significativas para explicar las diferencias. Nuestros

resultados, por su parte, demuestran que estas diferencias mensuales son notorias, confirmando esta variabilidad mensual.

Además se estima que, sin necesidad de descartar las fluctuaciones locales del clima local, con esta información, se podría profundizar en la hipótesis propuesta por Zaratti et al. 2010, donde habla sobre la posible influencia del polvo en el Salar de Uyuni, provocado principalmente por el cambio climático en la región, en donde se registran lluvias más intensas en los primeros tres meses, para luego proseguir con una sequía más extensa, la cual se puede apreciar en los resultados aquí expuestos, y que coinciden con que los valores de albedo van en leve descenso a través de los años, y como la temperatura, por oposición, asciende. En cuanto a los valores de precipitación⁷, estos se concentran principalmente en los primeros meses del año, registrando un aumento en sus registros en el periodo establecido, lo que provoca que se inunden por más tiempo en el salar, afectando de igual manera sus propiedades radiativas. Pudiéndose extraer de estos resultados, que no sólo es el polvo quien afectaría las propiedades ópticas del salar, sino que también podrían ser las aguas lluvias.

6.2.- Dinámica Temporal de la precipitación y la temperatura en los 20 años

En cuanto a la precipitación y la temperatura, podemos observar que la dinámica entre ambas es algo irregular. Si bien, existen diferencias significativas en la tendencia de sus valores. En el comportamiento anual de ambas variables, la relación no es muy clara. Ronchail (1995) en su estudio sobre la variabilidad interanual de las precipitaciones en Bolivia entre 1950 y 1980 estima una anomalía positiva de lluvia durante 1970-1980. Aun así, observó retrocesos en los glaciares de los Andes, concluyendo que este tipo de fenómeno no solamente está asociado a la lluvia, sino también a las variaciones de temperatura. Que, de cierta manera, reafirma esta dinámica irregular entre precipitación y temperatura en la Puna Andina en el periodo de tiempo estudiado, y que ambas variables pudieran tener efectos diferentes en la regulación del clima, sin necesariamente potenciarse o disminuirse entre ellas, al menos, en el área de estudio.

⁷ Anexo N°6: Tendencia Anual de albedo, temperatura y precipitación del salar. Anexo N°7: Tendencia Anual de albedo, temperatura y precipitación de las zonas de control.

Además, en el área de estudio, existe una heterogeneidad en términos climatológicos, principalmente por grandes masas de aire que se localizan y se mueven por esta región. Y estos intercambios atmosféricos, se acentúan en la cordillera. Principalmente por los efectos del relieve, las grandes áreas de extensiones de agua y sal como los salares y el gran lago Titicaca, influyen notablemente en el clima local (Melice, 1993). En el caso particular del área de estudio, el Salar de Uyuni, en el periodo propuesto, posee un registro en Precipitación que va en ascenso. Aumento que coincide con lo expuesto por Andrade (2021), donde estimaron que, en los departamentos de la zona sur de Bolivia, en los cuales se encuentra Potosí, poseería un incremento en la probabilidad de la ocurrencia de eventos extremos asociados a la Precipitación (cerca de un 0,02%). Mientras que en el estudio de Mendoca (2017) para el estudio del Monzón Sudamericano en el Altiplano Andino y para el estudio de Morales et al. (2012) en donde se estudia la Precipitación en el Altiplano Sur en base a dendrocronología, obtienen que a partir de los años 90 comienza un descenso abrupto de la Precipitación. Y ese descenso se mantiene hasta el año 2010, donde, según lo obtenido en este estudio, comienza a aumentar progresivamente. Comenzando a concentrarse principalmente en enero y febrero, y disminuyendo para el resto del año, tanto para las zonas de control, como para el salar.

En cuanto a la Temperatura, dado por estudios del IPCC (2021) y registros en diversas entidades climáticas, demuestran que esta, va en constante aumento desde los 1800 (Andrade, 2015; Andrade, 2021). Y en el salar de Uyuni, el comportamiento se manifiesta de igual manera para las zonas de control como para el salar en sí mismo. Iniciando los registros promedios alrededor de los 10°C y finalizando el periodo de estudio alcanzando los 13°C. Mientras que, en sus alrededores, las Temperaturas registran en los primeros años 26°C y a finales del periodo fluctúan entre los 27°C y los 28°C.

6.3.- Interacción entre Temperatura y albedo

En cuanto a la interacción entre Temperatura y albedo podemos observar que los resultados indican que poseen una relación inversa o negativa. Situación que es claramente observable

cuando lo vemos de manera macro a lo largo de los años⁸. En donde los años con un promedio alto en albedo, poseen un promedio bajo en Temperatura⁹. Situación que se repite al momento de observar los resultados mensuales de cada año. Esto puede ocurrir principalmente por dos motivos: El primero, por las diferencias estacionales entre los meses húmedos (diciembre, enero, febrero y marzo) con los meses secos (junio, julio, agosto, septiembre) registrados en el área de estudio. En donde a mayores lluvias, el salar se inunda, y como tal, refleja en menor medida (Considerando que el agua posee un albedo promedio de 0,07). Y esta misma situación, se puede ver reflejada al observar el comportamiento en base al ENSO¹⁰, en donde en los años Niño, momento en que las precipitaciones se hacen más abundantes, los valores de albedo promedio anual llegan a su máxima (0,68) y los valores de Temperatura promedian el mínimo (10°C). Caso contrario cuando los años son Niña, el albedo registra sus valores mínimos promedio (0,55) y la Temperatura registra sus valores máximos promedio (14,5 °C). En los casos, en donde el efecto del Niño no es tan fuerte, los valores de Temperatura y albedo se mantienen en valores constantes, variando entre 0,65 a 0,67 y el segundo entre 10,5°C y los 11°C.

Al comparar los resultados obtenidos fuera del Salar versus el salar en sí mismo, podemos percatarnos que la capacidad reflectiva del Salar es bastante alta, como expresa Andrade (2007). Además, las Temperaturas en las zonas de control superan los 20°C alcanzando los 30°C, mientras que lo obtenido en el salar no superan los 15°C.

Hahnenberg, (2003), enuncia por su parte, que el albedo del salar es muy alto, y tal como se puede constatar en los valores obtenidos en este estudio, tiene valores semejantes del albedo típico a la nieve o las nubes. Y como tal, lidera en la baja absorción de la radiación solar. Sus propiedades bajo la capa de sal, de difundir y conducir el calor, provoca que posea menos energía disponible para el calentamiento. Comprobando las diferencias notorias entre las zonas de control y el salar.

⁸ Anexo N°10: Dinámica temporal de albedo y temperatura promedio del salar.

⁹ Anexo N°7: Tendencia Anual de albedo, temperatura y precipitación del salar. Anexo N°8: Tendencia Anual de Albedo, temperatura y precipitación de las zonas de control.

¹⁰ Anexo N°9: Gráfico años Niño y Niña en el periodo estudiado

6.4.- Efecto del albedo y el Sistema de la Puna Andina

El Salar de Uyuni es uno de los salares más extensos y llanos que existen en el planeta. Su altitud, sus propiedades físicas y ópticas, hacen que tenga unas cualidades radiativas muy particulares (Andrade, 2007).

Zaratti (2010) expone que el albedo en Uyuni, no sólo es dependiente de la estación del año, sino también a los cambios climáticos de la misma zona. En el Sistema de la Puna Andina, las variaciones podrían deberse principalmente a la humedad, esto debido al periodo de inundación en verano y posteriormente de sequedad en invierno, de este mismo. Estudios como los expuestos por Gascoin (2009), expresan que los suelos desnudos secos, son más reflectivos, que los suelos desnudos en épocas de lluvias. Situación que se complementa con estudios del albedo en zonas árticas, como lo discute Blok (2011), en el cual expone que la variabilidad misma del albedo está supeditada tanto por la extensión espacial de elementos con propiedades radiativas y por las condiciones de estos mismos.

Dada esta situación, es que los efectos que puedan nacer de este gran espejo de agua pueden llegar a ser suficientemente grande, tanto, como menciona Hahnenberger (2003), para llegar a modificar el clima regional. De esta manera, los distintos factores existentes para evaluar el Cambio Climático, el albedo debiese ser uno de los más importantes (Pelkowski, 2007).

7.- CONCLUSION

Según los resultados obtenidos en este estudio, concluimos que, el efecto del cambio en el balance radiativo asociado al albedo sobre la Temperatura superficial del salar es inversamente proporcional. A medida que observamos que los valores de albedo comienzan a disminuir a lo largo de los años, la Temperatura comienza a ascender. Lo que se puede estimar, que al momento de que el salar comience a perder sus propiedades radiativas, es muy posible que la Temperatura local y, por ende, regional, comiencen a tener mayores fluctuaciones, tendiendo más a una zona de sequía. Hipótesis que se invita a comprobar a futuro utilizando modelos proyectivos y datos de terreno.

La dinámica temporal del albedo y la Temperatura de la superficie es cíclica. Tendiendo a la disminución del primero y al crecimiento del segundo, al menos en los años propuestos de estudio.

En cuanto a los efectos de los eventos ENSO, podemos destacar que en los años en donde el efecto climático del Niño hace su aparición, los valores de albedo aumentan y la Temperatura disminuye, confirmando de forma teórica, la limpieza que produce la lluvia en el salar, dejando óptima sus propiedades ópticas. Mientras que cuando es La Niña quién influye en el clima, los datos se invierten, es decir que, las Temperaturas aumentan y, por ende, los momentos de sequía y polvo se extiendan en el tiempo, “ensuciando” el salar y opacando sus propiedades ópticas¹¹.

Por otra parte, el salar de Uyuni posee características únicas en el planeta. Sus características ópticas, geográficas y radiativas, son ideales para hacer de Uyuni un gran laboratorio natural para el estudio del albedo y su influencia en el clima.

Las dificultades principales que podemos destacar en este estudio, es en la obtención de información al momento de la descarga de data espacial. Donde nos encontramos con información faltante, sobre todo en el periodo invernal de cada año. Este tipo de déficit se podría complementar y enriquecer con la utilización de data con sensores locales.

Finalmente, este estudio nos entrega un atisbo del comportamiento general del albedo y la Temperatura utilizando sensores remotos. Demostrando ser una excelente herramienta para estudios a gran escala, donde el presupuesto y material disminuyen a nivel usuario. Este tipo de estudios se podría llegar a complementar con estudios de albedo y Temperatura nocturna para análisis más acabados.

¹¹ Anexo N°9: Fluctuaciones de años Niña y Niño

8.- Bibliografía

Aceituno, P. 1996. Elementos del Clima en el Altiplano sudamericano. Revista Geofísica. Vol 44. Pp.37-55

Allmendinger, R. 1997. The evolution of the altiplano-puna plateau of the Central Andes. Annual review of Earth and Planetary Sciences. 25:1, 139-174.

Alonso, H.; Risacher, F. 1996. Geoquímica del Salar de Atacama, parte 1: Origen de los componentes y balance salino. Revista Geológica de Chile. Vol.23. N°2. 113-122.

Alonso, R. 2017. Los salares de la Puna Argentina y su Recurso Minero. Ciencias de la Tierra y Recursos Naturales del NOA. Relatorio del XX Congreso Geológico Argentino, San Miguel de Tucumán: 1018-1038.

Andrade, M. & Francesco Zaratti. 2007. Medidas de albedo en el Salar de Uyuni. Revista Boliviana de Física. Vol. 13. N°12. La Paz.

Andrade, M; Jemio, L; Andersen, L; Arenas, J; Calvo, N; Machicado, C; Molina, O & Horacio Valencia. 2015. La dinámica del cambio climático en Bolivia. Fundación INESAD. La Paz, Bolivia.

Andrade, M; Sazcha, M. & Ojilve, R. 2021. Exposición a cambios en el clima en Bolivia. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Tecnología y Ciencias del Agua. 12(6). Pp. 90-144.

Aramayo, C. 2004. La region altoandina de Bolivia. Ecología, medio ambiente y Desarrollo sostenible: Algunos ejemplos prácticos.

Beck, S. & George Zandt. 2002. The nature of orogenic crust in the Central Andes. Vol. 107.

Blok, D. 2011. The response of Arctic vegetation to the summer climate: relation between shrub cover, NDVI, surface albedo and temperature. Environment Research Letters. 6. Pp. 1-9.

- Budyko, M. 1969. The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth. *Tellus*. 21:5,611-619.
- Campero, S. 2013. Atlas Climatológico de Bolivia. La Paz. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia.
- Cahalan, R. & North, G. 1979. A Stability Theorem for Energy-Balance Climate Models. *Journal of Atmospheric Sciences*. 36(7). 1178-1188.
- Chepstow, A. 2005. Vegetation and climate change on the Bolivian Altiplano between 108.000 and 18.000 ye ago. *Quaternary Research*. Vol. 63. N°1. Pp. 90-98.
- Curry, J. 1995. Sea Ice-Albedo Climate Feedback Mechanism. *Journal Of Climate*.8(2). Pp.240-247
- Coakley, J. 2003. Reflectance and Albedo, Surface. Elseiver Science. Pp. 1914-1923
- Cotana, F. 2014. Albedo control as an effective strategy to tackle Global Warming: A Case study. *Applied Energy*. Vol. 130. Pp. 641-647.
- De la Hoz, G. 2013. El litio: Desde los salares de la Puna a nuestros celulares. *Temas de Biología y geología del NOA*.3; 3; 58-67
- Dirmhirn, I. 1974. Some Characteristics of the Albedo of Snow. *Journal of Applied Meteorology*. Vol.14. Pp. 375 – 379
- Dobos, E. 2005. Albedo. University of Miskoic. *Encyclopedia of Soil Siencie*. Vol.10. N°1081. Pp. 1-3
- European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF). 2021. ERA5: Data documentation.
<https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation> (12-01-2022)
- Fornillo, B. 2019. Industria, ciencia y política en el Triángulo del Litio. *Ciencia, Docencia y Tecnología*. Vol.30. N°58.

- Fornillo, B. & Martina Gamba. 2022. Política, ciencia y energía en el “Triángulo del litio”. Litio en sudamérica. Geopolítica, energía y territorios. Pp. 133-172
- Franch, B. 2013. Analysis of directional effects on atmospheric correction. Remote Sensing of Environment. Vol. 128. N°21. Pp. 276-288.
- Fritz, S. 2001. A 160.000-Year Record of Tropical Climate Variability From Salar de Uyuni, Bolivia. American Geophysical Union. Vol.2001. Pp 22a-0509.
- Gascoin, S. 2009. Sensitivity of bare soil Albedo to surface soil moisture on the moraine of the zongo glacier (Bolivia). Geophysical Research Letters.36(2).
- Gaffin, S. 2012. Bright is the new black-multi-year performance of high-Albedo roofs in an urban climate. Environmental Research. Vol.7. Pp.2-12
- Gao, F; Shaaf, C; Strahler, A; Roesch, A. & Wolfgang Lucht. 2005. MODIS bidirectional reflectance distribution function and Albedo Climate Modeling Grid products and the variability of Albedo for major global vegetation types. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. Vol.110.
- Graeme. S. 2015. The Albedo of Earth. Reviews of Geophysics. Vol. 53. N°1. Pp. 141-163
- Gragg, K. 2008. Preservation of microorganisms within halite fluid inclusions from the Salar de Uyuni, Bolivia. State University of New York at Binghamton.
- Gorelick, N. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial análisis for everyone. Remote Sensing of Environment. Vol.202. Pp 18-27.
- Graversen, R. 2014. Polar Amplification in CCSM4: Contributions from the lapse Rate and Surface Albedo Feedbacks. American Meteorological Society. Vol. 27. Pp. 4433-4450
- Hachikubo, A. 2000. Effects of snow physical parameters on spectral Albedo and bidirectional reflectance of snow Surface. Journal of geophysical research. Vol.105. N°D8. Pp. 219-236.

Hahnenberger, M. 2003. Summertime Precipitation Variability and Atmospheric circulation over the South American Altiplano: Effects of Lake Titicaca and Salar de Uyuni. Oklahoma Weather Center Research Experiences for Undergraduates Finales Project.

Hall, A. 2004. The Role of Surface Albedo Feedback in Climate. *Journal Climate*. Vol. 17. Pp. 1550-1568

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, JN. (2018): Datos horarios de ERA5 sobre niveles de presión desde 1979 hasta el presente. Almacén de datos climáticos (CDS) del Servicio de Cambio Climático de Copernicus (C3S). (Consultado el <20-08-2021>), 10.24381 / cds.bd0915c6

Intergovernmental panel on climate change. (2021). *Climate Change 2021, The Physical Science Basis*. Ginebra, Suiza.

Izquierdo, A. 2016. “Hidroecosistemas” de la Puna y Altos Andes de Argentina. *Acta geológica iilloana*. Vol. 28. N°2. Pp. 390-402.

Jerez, G. 2021. Lithium extractivism and wáter injustices in the Salar de Atacama, Chile: The colonial shadow of green electromobility. *Political Geography*, 87.

Kukla, G. & Robinson, D. 1979. Annual Cycle of Surface Albedo. *Monthly Weather Review*. Vol.108. Pp. 56-68

Laval, K. & Picon, L. 1986. Effect of a Change of the Surface Albedo of the Shael on Climate. *Journal of Armospheric Sciences*. 43 (21). 2418-2429.

Kumar, L & Onismo Mutanga. 2018. Google Earth Engine Applications Since Inception: Usage, Trends, and Potential. *Remote Sensing*. MDPI. Vol. 10. Pp.1509

Lucht, W; Roujean, J. 2000.Consideration in the parametric modeling of BRDF and Albedo from multiangular satellite sensor observations. *Remote Sensing*. N°18. Pp. 343-379.

Magaña, V. 2004. El Cambio Climático global: Comprender el problema. En *Cambio Climático: Una vision desde México* (2004). Hernández, J; Fernández, A, 2004.

Martinez, J. 2021. Subsurface and surface halophile communities of the chaotropic Salar de Uyuni. *Environmental Microbiology*. Vol. 23. N°7. Pp 3987-4001.

Medrano, E; Paz, F; Orozco, J; Valdez, J y Martín Bolaños. 2013. Evaluación de un modelo de la BRDF a partir de simulaciones con modelos semi-empíricos lineales (SEL). *Terra Latinoamericana*. Vol 31. N°3. Pp 181- 192

Mendoza, M. 2017. Monzón Sudamericano: La Integración de la circulación amazónica y altiplánica y las variabilidades climáticas del altiplano andino chileno. *Diálogo Andino*. N°54. Arica.

Mignaqui, V.2019. Puna, litio y agua: estimaciones preliminares para reflexionar sobre el impacto en el recurso hídrico. *Revista de ciencias sociales*. Vol. 10 N°36. 37-55.

Ministerio de Planificación del Desarrollo. 2002. Geoportal. Estado plurinacional de Bolivia. Unidad de Innovación Tecnológica 2021.

Muñoz, J; Dutra, E; Agustí, A; Albergel, C; Arduini, G; Balsamo, G; Boussetta, S; Choulga, M; Harrigan, S; Herbach, H; Martens, B; Miralles, D; Piles, M; Rodriguez, N; Zsoter, E; Buontempo, C. & Jean-Noël Thépaut. 2021. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth Syst. Sci. Data*. Vol. 13. Pp. 4349-4383.

Melice, J. 1993. Lake Titicaca, a Recorder of Dryness Events in the Amazonian Region. *European Association of Geoscientists & Engineers*.

Molina, J. 2007. Agua recurso hídrico en el Sudoeste de Potosí. Comité para la gestion Integral del Agua en Bolivia. Coordinación General: Centro de Estudios superiores Universitarios, Universidad Mayor de San Simón. Publicado por Foro Boliviano sobre Medio Ambiente y Desarrollo-FOBOMADE.

Moody, E. 2007. Northern Hemisphere five-year average (2000-2004) spectral Albedos of surfaces in the presence of snow: Statistics computed from Terra MODIS land products. *Remote Sensing of Environment*. Vol 111. Pp 337-345.

- Morales, R. 2000. “Precipitation changes in the South American Altiplano since 1300 AD reconstructed by tree-rings” *Climate of the Past*, 8: 653-666.
- Mutanga, O. & Lalit Kumar. 2019. Google Earth Applications. *Remote Sensing*. MDPI. Vol.11. Pp. 591
- Nacif, F. 2014. El litio en Argentina: de insumo estratégico a commodity. *Revista Herramienta*. Vol. 54. 101-117
- NASA, 2021. MODIS Land. Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio. Centro de vuelo especial Goddard. <https://modis-land.gsfc.nasa.gov/snow.html>
- Nunnery, J. 2018. Lake-level variability in Salar de Coipasa, Bolivia during the past ~40,000 yr. *Quaternary Research*. 881 - 891
- Oropeza, O. 2004. Evaluación de la vulnerabilidad a la desertificación. En *Cambio Climático: Una vision desde México (2004)*. Hernández, J; Fernández, A, 2004.
- Paoli, H. 2011. Cuenca Cerrada de la Puna, Caracterización de las cuencas hídricas de las provincias de Salta y Jujuy, EEA Salta. INTA.
- Payne, R. 1972. Albedo of the Sea Surface. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 29 (5), Pp. 959-970.
- Pelkowski, J. 2007. El Albedo Terrestre. *Rev. Acad. Colomb. Cienc*. V°31, N°121. Pp. 499-520.
- Pérez, C. 2010. Climate Change in the High Andes: Implications and Adaptation Strategies for Small-scale farmers. *International Journal of Environmental, Cultural, Economic and Social Sustainability*.
- Peña, M.; Olmedo, F. 2019. Estimación de las variaciones espacio temporales de Albedo en los glaciares Olivares, Chile central. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis* Vol. 55. Pp.35-44.

Porteous, A. 1992. Dictionary of environmental science and technology. John Wiley and Sons. Edition 429. Pp.80.

Prohaska, F. 1961. Algunos aspectos del clima de Alta Cordillera y de la Puna Argentina. Boletín de estudios geográficos. Vol.15.Nº30.

Reuder, J. 2007. Investigations on the effect of high Surface Albedo on erythemally effective UV irradiance: results of a campaign at Salar de Uyuni, Bolivia. J Photochem Photobiol B. Vol, 2. Nº87. Pp. 1-8.

Riihelä, A. 2011. The radiation, Snow Characteristics and Albedo at Summit (RASCALS) Expedition report. Reports. Finnish Meteorological Institute. Helsinki. Vol. 8.

Rouchy, J. 1996. Extensive carbonate algal bioherms in upper Pleistocene saline lakes of the Central Altiplano of Bolivia. Sedimentology. Vol. 43. Nº6. Pp. 973-993.

Ronchail, J. 1995. Variabilidad interanual de las precipitaciones en Bolivia. Bull. Inst. Fr. Études andines. 24 (3). Pp. 369-378.

Sagan, C. 1979. Anthropogenic Albedo Changes and the Earth's Climate. Science. Vol. 206. Nº4425. Pp. 1365-1368.

Salomon, J; Shaaf, C; Gao, F. & Yufang Jin. 2006. Validation of the MODIS bidirectional reflectance distribution function and albedo retrievals using combined observations from the aqua and terra platforms. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol.44.Nº6. Pp 1555 - 1565

Santiago, J. 2008. Tendencias del cambio climático global y los eventos extremos asociados. Ra Ximhai. Universidad Autónoma Indígena de México. Mochicahui, El Fuerte, Sinaloa. Pp. 625-633.

Shaaf, C. 2002. First operational BRDF, Albedo nadir reflectance products from MODIS. Remote Sensing of Environment. Vol. 83. Nº1-2. Pp. 135-148.

- Shaaf, C. 2021. BRDF Explained. Professor Crystal Shaaf's Lab. University of Massachusetts Boston. MA 02125.
(https://www.umb.edu/spectralmass/terra_aqua_modis/modis)
- Sieland, R. 2014. Hydraulic Investigations of the Salar de Uyuni, Bolivia. Technische Universität Bergakademie Freiberg.
- Strahler, A. & Muller, J. 1999. MODIS BRDF/Albedo Product: Algorithm Theoretical Basis Document Version 5.0. University of Boston. EOS. MODIS. UCL. NASA.
- Svendsen, J. 2003. Parabolic halite dunes on the Salar de Uyuni, Bolivia. *Sedimentary Geology*. Vol. 155. N°1-2. Pp. 147-156.
- Verger, A; Camacho, F. & Meliá, J. 2005. Revisión de los modelos paramétricos de BRDF. *Revista de Teledetección*. 2005. N°23. Pp. 65-80.
- Tian, X; Liu, Q. & Gao Zhiquiang. 2021. Improving MODIS Aerosol Estimates Over Land With the Surface BRDF Reflectances Using the 3D discrete Cosine Transform and RossThick-LiSparse Models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Pp 1-10.
- Useros, J. 2012. *El Cambio Climático: Sus causas y efectos medioambientales*, Valladolid, España.
- Wanner, W; Li, X. & A. H. Strhler. 1995. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance. *Journal Geophysics*. Vol. 100. Pp.21077-21089.
- Winton, M. 2008. *Sea Ice-Albedo Feedback and Nonlinear Arctic Climate Change*. Geophysical Fluid Dynamics Laboratory. NOAA. Princeton University Forrestal Campus.
- Zaratti, F.2010. Medidas de Albedo en UV.B en el Salar de Uyuni. *Revista Boliviana de Física*. 17, 8-12.

ANEXOS

Anexo N°1: Coordenadas Zonas de control

ZONA DE CONTROL	COORDENADAS
ZONA DE CONTROL A	-20°33'10.46" S, -66°57'15.26" O
ZONA DE CONTROL B	-20°47'20.89" S, -67°55'42.96" O
ZONA DE CONTROL C	-19°45'11.08" S, -68°15'31.43" O
ZONA DE CONTROL D	-19°37'37.45" S, -67°28'1.45" O
ZONA DE CONTROL SALAR	-20°17'30.40" S, - 67°57'44.30" O

Anexo N°2: Capas Vectoriales

Para la creación de las cartografías y delimitación de las zonas de control, se utilizó la información disponible en el GeoPortal de Bolivia, de la cual se obtuvo la capa de la División Política Administrativa de los Departamentos y el Catastro de salares de Bolivia. Además, se crearon zonas de control, de los cuales se extrajeron las zonas de control (Tabla N°2).¹²

NOMBRE	DESCRIPCIÓN	TIPO	PRODUCTO	FUENTE
<i>departamentos_geo</i>	División Política Administrativa de los Departamentos de Bolivia	POLÍGONO	Cartografía Área de estudio	Ministerio de Planificación y Desarrollo de Bolivia (2002)
<i>salar</i>	Catastro de Salares de Bolivia	POLÍGONO	Salar de Uyuni	Ministerio de Planificación y Desarrollo de Bolivia (2002)
¹ <i>puntos_de_ctrl</i>	Zonas de control	PUNTOS	Zonas de Control	Elaboración Propia

Tabla N°2: Capas vectoriales utilizadas. Fuente: Elaboración propia.

Anexo N°3: SCRIPT OBTENCIÓN DE DATOS DE ALBEDO: ALBEDO_SCRIPT

```
//COMENZAMOS LLAMANDO NUESTROS VECTORES QUE UTILIZAREMOS
//COMO MÁSCARA PARA OBTENER LOS DATOS
var Uyuni = ee.FeatureCollection('users/macastellani/ptos_ctrl');
print(Uyuni.limit(5));
Map.centerObject(Uyuni,8);
Map.addLayer(Uyuni, {}, 'Uyuni')

//VISUALIZACIÓN

//IMPORTAMOS LA COLECCION MODIS
var ALBEDO = ee.ImageCollection("MODIS/006/MCD43A1");

// DEFINIMOS EL RANGO DE FECHA QUE NECESITAMOS
// LA FECHA ESTÁ DETERMINADA DESDE FECHA A HASTA UN ALCANCE DE
5 AÑOS,
// ESTO DEBIDO A LA CANTIDAD DE DATOS QUE PROCESA. POR LO QUE
ESTE
// PROCESO SE REPITIÓ AL MENOS 4 VECES CAMBIANDO LAS FECHAS
var INICIO = ee.Date('2000-01-01');
var RANGO_FECHAS = ee.DateRange(INICIO, INICIO.advance(5, 'year'));

// FILTRAMOS LAS IMÁGENES SEGÚN NUESTRO RANGO DE FECHAS
var ALBEDO_FECHA = ALBEDO.filterDate(RANGO_FECHAS);

// SELECCIONAMOS SÓLO LA BANDA DE INTERÉS
var ALBEDO_FINAL =
ALBEDO_FECHA.select('BRDF_Albedo_Parameters_vis_iso');
```

```
// Para una mejor visualización, a los resultados se le aplica el factor de escala de 0.001.
var ALBD_P = ALBEDO_FINAL.map(function(img) {
  return img
    .divide(1000)
    .copyProperties(img, ['system:time_start']);
});

// AHORA PARAMETRIZAREMOS NUESTRO GRÁFICO
var ts1 = ui.Chart.image.series({
  imageCollection: ALBD_P,
  region: Uyuni,
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  scale: 1000,
  xProperty: 'system:time_start'})
.setOptions({
  title: 'Serie Temporal de Albedo',
  vAxis: {title: 'BRDF_ALBEDO'}});
print(ts1);

// CALCULAREMOS EL PROMEDIO DE ALBEDO, PARA PODER VISUALIZAR
LA
// TENDENCIA DE LA VARIABLE A OBSERVAR
var Uyuni2 = ee.FeatureCollection('users/macastellani/Uyuni_recuadro');
var PROMEDIO = ALBD_P.mean().clip(Uyuni2);

// FINALMENTE, VISUALIZAMOS EL PROMEDIO DE DATOS
Map.addLayer(PROMEDIO, {
  min: 0.0, max: 1.0,
```

```
palette: ['blue', 'limegreen', 'yellow', 'darkorange', 'red'],  
'Albedo');
```

Fuente: <https://code.earthengine.google.com/bb6352060e84dc3848428f484c70d083>

Anexo N°4: OBTENCIÓN DE DATOS DE TEMPERATURA: TEMP_SCRIPT

```
//COMENZAMOS LLAMANDO NUESTROS VECTORES QUE UTILIZAREMOS  
//COMO MÁSCARA PARA OBTENER LOS DATOS  
  
var Uyuni = ee.FeatureCollection('users/macastellani/ptos_ctrl');  
print(Uyuni.limit(5));  
Map.centerObject(Uyuni,8);  
Map.addLayer(Uyuni, {}, 'Uyuni')  
  
// CARGAMOS LA COLECCIÓN DE IMÁGENES QUE UTILIZAREMOS  
// POR LA CANTIDAD DE DATOS, SÓLO PERMITE TRABAJAR CON 2 AÑOS  
// POR LO QUE QUE SE TUVIERON QUE REALIZAR 10 ITERACIONES EN  
TOTAL  
var TEMP = ee.ImageCollection("MODIS/006/MOD11A1")  
    .filter(ee.Filter.date('2000-01-01', '2002-01-01'))  
    .select(['LST_Day_1km']);  
  
// CONVERTIMOS LOS DATOS DE °K A °C  
var TEMPC = TEMP.map(function(img) {  
    return img  
        .multiply(0.02)  
        .subtract(273.15)  
        .copyProperties(img, ['system:time_start']);  
});
```

```
// PARAMETRIZAMOS EL GRÁFICO
var chart =
  ui.Chart.image
    .seriesByRegion({
      imageCollection: TEMPC,
      band: 'LST_Day_1km',
      regions: Uyuni,
      reducer: ee.Reducer.mean(),
      scale: 500,
      seriesProperty: 'ORIG_FID',
      xProperty: 'system:time_start'
    })
    .setOptions({
      title: 'PROMEDIO DE TEMPERATURA DIARIO ',
      hAxis: {title: 'FECHA', titleTextStyle: {italic: false, bold: true}},
      vAxis: {
        title: '°C',
        titleTextStyle: {italic: false, bold: true}
      },
      lineWidth: 5,
      colors: ['f0af07', '0f8755', '76b349', '39a8a7', '9c4f97'],
    });
print(chart);

// CALCULAREMOS EL PROMEDIO DE TEMPERATURA, PARA PODER
VISUALIZAR LA
// TENDENCIA DE LA VARIABLE A OBSERVAR
var Uyuni2 = ee.FeatureCollection('users/macastellani/Uyuni_recuadro');
```

```
var PROMEDIO = TEMPC.mean().clip(Uyuni2);

// FINALMENTE, VISUALIZAMOS EL PROMEDIO DE DATOS
Map.addLayer(PROMEDIO, {
  min: 0.0, max: 50,
  palette: ['blue', 'limegreen', 'yellow', 'darkorange', 'red']},
  'Temperatura');
```

Fuente: <https://code.earthengine.google.com/39d5d0936d508272fd894a233afe7d7d>

Anexo N°5: OBTENCIÓN DE DATOS DE PRECIPITACIÓN: PP_SCRIPT

```
//COMENZAMOS LLAMANDO NUESTROS VECTORES QUE UTILIZAREMOS
//COMO MÁSCARA PARA OBTENER LOS DATOS

var Uyuni = ee.FeatureCollection('users/macastellani/ptos_ctrl');
print(Uyuni.limit(5));
Map.centerObject(Uyuni,8);
Map.addLayer(Uyuni, {}, 'Uyuni')

// CARGAMOS LA COLECCIÓN DE IMÁGENES QUE UTILIZAREMOS
var PP = ee.ImageCollection("ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY")
    .filter(ee.Filter.date('2000-01-01', '2021-01-01'))
    .select(['total_precipitation']);

// CONVERTIMOS LOS LITROS A MILILITROS
var PP_mm = PP.map(function(img) {
  return img
    .multiply(100000)
    .copyProperties(img, ['system:time_start']);
});
```

```
// PARAMETRIZAMOS EL GRÁFICO
var chart =
  ui.Chart.image
    .seriesByRegion({
      imageCollection: PP_mm,
      band: 'total_precipitation',
      regions: Uyuni,
      reducer: ee.Reducer.mean(),
      scale: 500,
      seriesProperty: 'ORIG_FID',
      xProperty: 'system:time_start'
    })
    .setOptions({
      title: 'PROMEDIO DE PRECIPITACIÓN DIARIO ',
      hAxis: {title: 'FECHA', titleTextStyle: {italic: false, bold: true}},
      vAxis: {
        title: 'mm',
        titleTextStyle: {italic: false, bold: true}
      },
      lineWidth: 5,
      colors: ['f0af07', '0f8755', '76b349', '39a8a7', '9c4f97'],
    });
print(chart);

// CALCULAREMOS EL PROMEDIO DE PRECIPITACIÓN, PARA PODER
VISUALIZAR LA
// TENDENCIA DE LA VARIABLE A OBSERVAR
```

```
var Uyuni_2 = ee.FeatureCollection('users/macastellani/Uyuni_recuadro');  
var PROMEDIO = PP_mm.mean().clip(Uyuni_2);  
  
// FINALMENTE, VISUALIZAMOS EL PROMEDIO DE DATOS  
Map.addLayer(PROMEDIO, {  
  min: 0.0, max: 1000,  
  palette: ['blue', 'limegreen', 'yellow', 'darkorange', 'red']},  
  'Precipitación');
```

Fuente: <https://code.earthengine.google.com/07d6b75eb8b9ad46cec8de49e6eba00d>

Anexo N°6: Script de descarga de imágenes

```
Export.image.toDrive({  
  image: MODIS_Composicion.select("LST_Day_1km"),  
  description: 'Imagen Descarga',  
  scale: 1000});
```

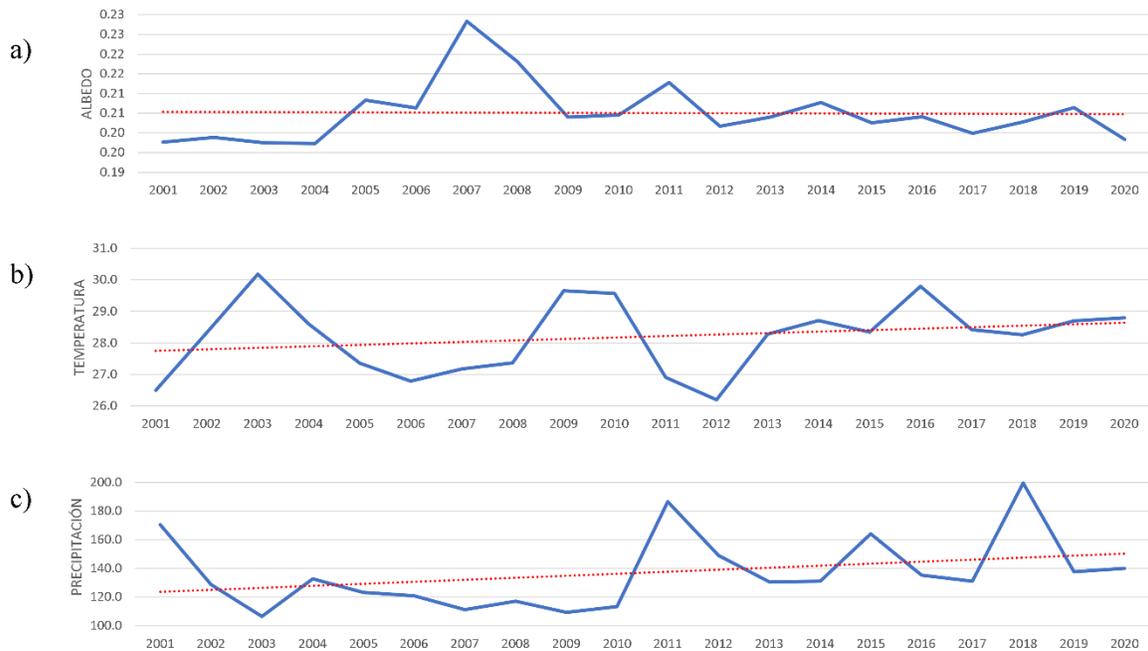
Fuente: <https://code.earthengine.google.com/07d6b75eb8b9ad46cec8de49e6eba00d>

Anexo N°7



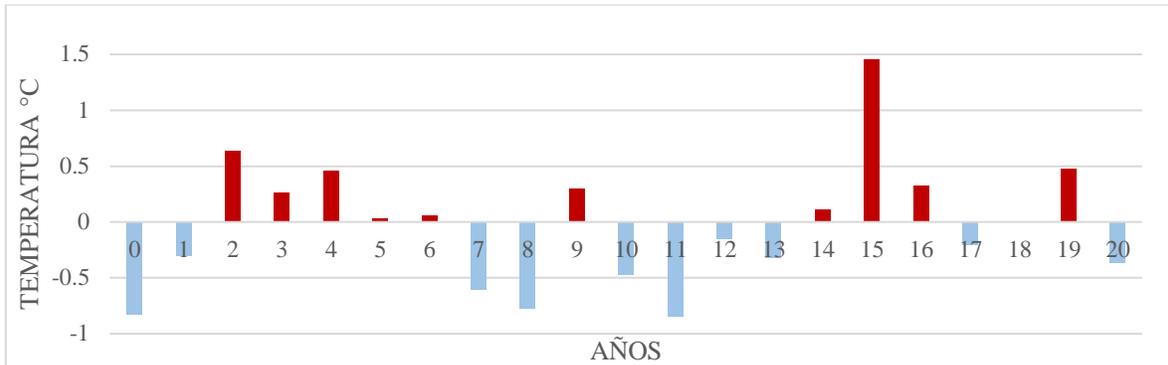
Tendencia temporal de Albedo, Temperatura y Precipitación en el salar (Elaboración propia)

Anexo N°8



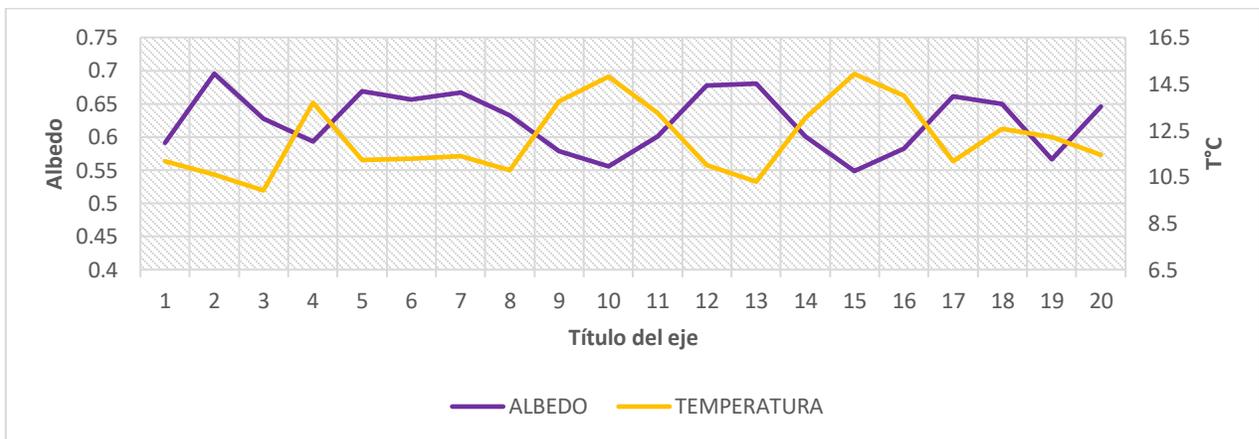
Tendencia temporal de Albedo, Temperatura y Precipitación en las zonas de control
(Elaboración propia)

Anexo N°9:



Ciclo climático del Niño y la Niña. Elaboración propia (Fuente: NOAA, 2021)

Anexo N°10



Dinámica de albedo y temperatura temporal promedio del salar (Elaboración propia)

Anexo N°11

Mes	UYUNI			R ²		
	Razón Albedo	Razón T°	Razón PP.	Albedo	T°	PP.

ENE	3.27	0.46	0.73	0.017	0.08	0.94
FEB	3.13	0.64	0.73	0.37	0.13	0.96
MAR	3.28	0.56	0.71	0.18	0.027	0.95
ABR	3.28	0.46	0.76	0.16	0.0006	0.07
MAY	3.19	0.33	0.74	0.10	0.0003	0.02
JUN	2.99	0.24	1.05	0,007	0.015	0.80
JUL	2.89	0.23	0.85	0.01	0.053	0.96
AGO	2.88	0.23	0.85	0.08	0.002	0.99
SEP	3.02	0.34	0.71	0.21	0.43	0.52
OCT	3.04	0.41	0.77	0.10	0.093	0.15
NOV	2.97	0.45	0.52	0.0006	0.086	0.002
DIC	3.01	0.53	0.70	0.15	0.46	0.003

Tabla 6: Razón del salar y las zonas de control ante albedo, temperatura y precipitación