


**ESTUDIO DE SEQUÍAS EN LAS REGIONES XVI, VIII Y IX
MEDIANTE OBSERVACIONES GEODÉSICAS EN EL PERIODO
2010-2015**

Madeleine Sheyla Revillod Rodríguez



Proyecto de Título presentado al
Departamento de Ciencias Geodésicas y Geomática
Universidad de Concepción, Campus Los Ángeles

En cumplimiento del requisito parcial

Para obtener el título de

Ingeniero Geomático

Escrito bajo la orientación del profesor

Dr. Henry Montecino Castro

Aprobado por la comisión

Aharon Cuevas

Cristian Núñez

Los Ángeles

Diciembre, 2018

RESUMEN

La sequía es uno de los peligros naturales más complejos debido a su inicio lento y su impacto a largo plazo. En Chile han ocurrido diversos fenómenos de sequías que han afectado la región central del país. Dentro de ellas la más extensa registrada ocurrió entre los años 2010 y 2015, afectando desde la IV Región de Coquimbo hasta la IX Región de la Araucanía. En el presente estudio, se evaluaron tres tipos de sequías por diferentes métodos para el periodo 2010-2015 en las regiones: XVI región de Ñuble, VIII región del Biobío y IX región de la Araucanía. Las sequías meteorológicas fueron identificadas mediante el uso de datos de precipitaciones obtenido desde estaciones pluviométricas y el cálculo del *Standardized Precipitation Index* (SPI) a diferentes escalas (1 mes, 3 meses, 6 meses y 12 meses), identificando la mega sequía 2010-2015. Las sequías de tipo agrícola se detectaron mediante datos de *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) del sensor *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) desde el producto MOD13Q1 y el cálculo del *Vegetation Condition Index* (VCI), identificando una sequía agrícola importante en el año 2014-2015. Las sequías de tipo hidrológicas fueron detectadas mediante datos obtenidos desde la serie temporal de la componente *Up* de *Global Positioning System* GPS y el cálculo del uso del *Drought Index* GPS (DI_{GPS}), identificando una sequía hidrológica importante a inicios del año 2014. Los resultados fueron contrastados con el *Oscillation Niño Index* (ONI) para valores de *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO), encontrando una tendencia significativa de las sequías respecto a esta oscilación climática.

DEDICATORIA

A:

Mi madre, Marlene.

Mis hermanos, Andruf y Alonso.

Mi abuela, Leonor.

Mis tíos y primos.

Mis Amigos.



AGRADECIMIENTOS

Primero, quisiera agradecer a mi profesor guía, el Dr. Henry Montecino, cuyas ideas, conocimientos y motivación, me impulsaron a comenzar este proyecto, y su paciencia y apoyo fueron fundamentales para finalizar con éxito este escrito. Además, quisiera agradecer a los miembros de mi comisión, el profesor Aharon Cuevas y el colaborador académico Cristian Núñez.

En segundo lugar, quisiera agradecer a las instituciones que proporcionaron de forma gratuita los datos necesarios para llevar a cabo mi estudio, la Dirección General de Aguas (DGA), la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), el *United States Geological Survey* (USGS), y el *Nevada Geodetic Laboratory* (NGL).

Tercero, me siento muy agradecida del apoyo y amor incondicional que mi familia y amigos me han entregado a lo largo de todos estos años de carrera. Sin su constante aliento no hubiese sido capaz de finalizar con éxito. Quisiera dar un especial agradecimiento a mi madre, Marlene, y a mi abuela, Leonor, que han dado tanto para que pudiese llegar hasta este punto, sé que seguirán conmigo en el futuro. Le agradezco a todas aquellas personas que han pasado por mi vida en estos años, cada uno de ellos ha marcado hechos importantes en mi vida. También, quisiera agradecer a mi gatito, Ragnar, por haber estado conmigo todas aquellas noches de desvelo y angustias de este último año.

Finalmente, y más importante, le agradezco a Dios ... TODO!!!

Índice de Contenidos

RESUMEN	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
Índice de Contenidos.....	iv
Lista de Tablas	vi
Lista de Figuras.....	vii
Lista de Símbolos, Nomenclatura o Abreviaciones.....	viii
1. Introducción	1
2. Revisión bibliográfica.....	9
2.1. Importancia del monitoreo de sequías en zonas agrícolas de Chile.....	9
2.2. Revisión de Índices de Sequías	13
2.2.1. Standardized Precipitation Index (SPI).....	13
2.2.2. Vegetation Condition Index (VCI)	14
2.2.1. Drought Index GPS (DI _{GPS}).....	15
2.2.2. Otros índices	18
3. Área de estudio	20
4. Datos	23
4.1. Estaciones pluviométricas.....	23
4.2. Imágenes satelitales.....	25
4.3. Estaciones GPS	26
4.4. El Niño-Southern Oscillation (ENSO) y Oscillation Niño Index (ONI)	28
5. Métodos.....	30
5.1. Índice SPI.....	30
5.2. Índice VCI.....	30
5.3. Índice DI _{gps}	31
5.4. Correlación de Pearson.....	32
6. Resultados	34
6.1. Índice SPI.....	34

6.2.	Índice VCI.....	38
6.3.	Índice DI _{GPS}	39
6.4.	Correlación de variables.....	40
7.	Conclusiones y discusiones.....	45
8.	Referencias.....	47
9.	Anexos	54
9.1.	Códigos implementados para VCI	54
9.2.	Scripts para el cálculo del Índice DI _{GPS}	57
9.2.1.	Script Principal.....	57
9.2.2.	Función Climato.m	59
9.2.3.	Función mes_medio.m.....	60
9.2.4.	Función DIGPS_f.m.....	60
9.2.5.	Función disenio_grap.m.....	61



Lista de Tablas

Tabla 1: Clasificación de sequías según Índice SPI.....	14
Tabla 2: Clasificación de sequías según Índice VCI.	15
Tabla 3: Comparación de diferentes índices.	19
Tabla 4: Estaciones Pluviométricas.	23
Tabla 6: Clasificación del Índice ONI.	29
Tabla 7: Datos ONI.....	29
Tabla 8: Resultados Estadísticas.....	43



Lista de Figuras

Figura 1: Esquema del comportamiento de las Sequías.....	10
Figura 2: Mapa de ubicación de la zona de estudio.....	20
Figura 3: Mapa de estaciones Pluviométricas.....	24
Figura 4: Imagen MODIS-2000049.....	26
Figura 5: Mapa de ubicación estaciones GPS.....	27
Figura 6: Regiones del Niño.....	29
Figura 9: Mapa de Calor Series Temporales GPS.....	32
Figura 10: Mapa de Calor - Resultado índice SPI-1.....	34
Figura 11: Mapa de Calor - Resultado Índice SPI-3.....	35
Figura 12: Mapa de Calor - Resultado Índice SPI-6.....	36
Figura 13: Mapa de Calor - Resultado Índice SPI-12.....	37
Figura 14: Mapa de calor - Resultado Índice VCI.....	38
Figura 16: Mapa de Calor - Resultado Índice DI _{GPS}	39
Figura 17: (a-f) Gráficos de DI _{GPS} vs. ONI.....	43
Figura 18: Diagrama de Taylor de las series GPS.....	44

Lista de Símbolos, Nomenclatura o Abreviaciones

Abreviación	Definición
CPC	<i>Climate Prediction Center</i>
CZI	<i>China-Z Index</i>
DGA	Dirección General de Aguas
DI _{GPS}	<i>Drought Index GPS</i>
ENSO	<i>El Niño-Southern Oscillation</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GRACE	<i>Gravity Recovery and Climate Experiment</i>
IDA	<i>Aggregate Drought Index</i>
MODIS	<i>Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NADI	<i>Nonlinear Aggregate Drought Index</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NGL	<i>Nevada Geodetic Laboratory</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
ONI	<i>Oscillation Niño Index</i>
PDSI	<i>Palmer Drought Severity Index</i>
PHDI	<i>Palmer Hydrological Drought Index</i>
SLTM	<i>Standard Linear Trajectory Model</i>
SMN	Servicio de Meteorología Nacional
SPI	<i>Standardized Precipitation Index</i>
SWSI	<i>Surface Water Supply Index</i>
TCI	<i>Temperature Condition Index</i>
TIROS	<i>Television and Infrared Observation Satellite</i>
TSM	Temperatura de la Superficie del mar
TWS	<i>Terrestrial Water Storage</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
VCI	<i>Vegetation Condition Index</i>
VCM	<i>Vertical Crustal Movement</i>
VHI	<i>Vegetation Health Index</i>
VI	<i>Vegetation Index</i>

1. Introducción

Las sequías han sido reconocidas como un peligro climático importante a nivel mundial (Organización Meteorológica Mundial, 2016), esto debido a que pueden conducir a una disminución significativa de los recursos hídricos, impactando negativamente en aspectos ecológicos, sociales y económicos (Mishra & Singh, 2010). Estos impactos, pueden prevalecer por largos periodos, por lo que una rigurosa caracterización de sequías es fundamental para la planificación y optimización de recursos hídricos (Meza, Corzo, & Soza, 2010).

Las sequías son una parte normal del clima, y pueden ocurrir en cualquier estación del año en todo el mundo, incluso en los desiertos y las selvas tropicales. Las sequías son uno de los riesgos naturales más costosos año tras año, sus impactos son significativos y generalizados (Organización Meteorológica Mundial, 2016).

Dependiendo de la intensidad y duración de los cambios observados en las precipitaciones, temperaturas, agua superficial y subterránea, y los impactos sociales en una región, las sequías son clasificadas en cuatro categorías (Mishra & Singh, 2010): Meteorológica (déficit de precipitación), Agrícola (déficit en la humedad del suelo), Hidrológica (déficit en escorrentía) y Socioeconómica (demanda de agua y respuesta social).

A lo largo de los años, se han desarrollado diversos métodos para investigar las propiedades de las sequías, éstos se conocen como índices de sequías (Zargar, Sadiq, Naser, & Khan, 2011). Estos índices son expresiones matemáticas basadas en enfoques empíricos y/o físicos para estudiar la sequía de forma cuantitativa o cualitativa. La aplicación de estos índices suele ser más efectivo que analizar datos brutos directamente (Otun & Adewumi, 2009).

La forma clásica y más antigua de caracterizar sequías está basada en observaciones obtenidas desde estaciones pluviométricas (AghaKouchak et al., 2015). Esta estrategia ha sido utilizada para estudiar sequías de carácter meteorológico, agrícola, y en largos

periodos, los déficits pluviométricos son relacionados con sequías hidrológicas (AghaKouchak et al., 2015). Dentro de los índices más comunes para estudiar sequías (McKee, Doesken, & Kleist, 1993), *China-Z Index* CZI (Wu, Hayes, Weiss, & Hu, 2001), *Palmer Drought Severity Index* (PDSI) (Palmer, 1965).

El SPI se utiliza para caracterizar sequías en distintas escalas de tiempo, en periodos de 1 a 6 meses se asocia con sequías meteorológicas y agrícolas (Zambrano, Lillo-Saavedra, Verbist, & Lagos, 2016), y en largos periodos de 6 a 24 meses está relacionado con sequías de carácter hidrológico (Bağ & Kubiak-Wójcicka, 2014). El SPI se estima analizando los registros de precipitación, para lo cual requiere un largo registro de datos, se recomienda más de 30 años, para seleccionar una distribución de probabilidad apropiada (Guttman, 1994).

El CZI (Wu et al., 2001) es similar al SPI debido a que se utiliza la precipitación para determinar los períodos húmedos y secos, suponiendo que la precipitación sigue una distribución de Pearson tipo III, pero en escalas temporales más cortas suele ser menos representativo que el SPI (Zargar et al., 2011). Por su parte, el índice de severidad de la sequía de Palmer (PDSI) (Palmer & C., 1965), emplea datos de temperatura y precipitación para estimar el suministro y la demanda de humedad, en un modelo de suelo de dos capas. Este índice depende de la disponibilidad de datos de campo temporal y espacial, lo que complica su implementación en países en desarrollo, donde la disponibilidad de registros históricos es limitada y la densidad de la estación pluviométricas es insuficiente para caracterizar sequías en grandes extensiones de territorio.

Por otro lado, a partir del año 1960, se comienza a utilizar la percepción remota para el estudio del clima de la Tierra, con la misión *Television and Infrared Observation Satellite* (TIROS-1) (NASA, 1987). Inicialmente, los datos satelitales de bandas multiespectrales, infrarrojo cercano, o microondas fueron utilizados para recuperar variables como la precipitación, humedad del suelo o evapotranspiración. Desde la década pasada, se pueden obtener datos directos de precipitación, nieve, humedad del suelo, temperatura del suelo,

evapotranspiración, almacenamiento total de agua terrestre, vegetación y cobertura del suelo (NASA, 2010).

La percepción remota aplicada en el estudio de sequías, permite mejorar la cobertura espacial en zonas donde las estaciones climatológicas, y otras estaciones terrestres, son escasas o bien, inexistentes. La alta frecuencia con la que se puede obtener imágenes satelitales: 1-2 días (e.g., *Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES)*, *Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)*) o en periodos ~2 semanas (e.g., *Landsat*), permiten manejar etapas tempranas de sequías, lo cual es crucial en el desarrollo de zonas agrícolas.

Otra ventaja importante de esta técnica, es el volumen de datos que se puede obtener de los registros históricos, ya que algunos de los satélites como AVHRR y *Landsat* poseen más de 30 años con información, y satélites como *Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)* proporcionan imágenes desde el año 2000. Estos registros históricos permiten comprender los eventos de sequía ocurridos y sus frecuencias, así como su gravedad y duraciones. Estos registros también se pueden utilizar para cuantificar los impactos socioeconómicos de los eventos de sequía y, proporcionar comparaciones entre las condiciones actuales de sequía y las condiciones históricas.

Esta metodología basada en observaciones satelitales, permitieron estudiar las sequías desde nuevas perspectivas, generando una extensa gama de índices de vegetación (*Vegetation Index*, VI) que permiten comprender y caracterizar este fenómeno. Los VI basados en percepción remota, se han utilizado ampliamente para evaluar la vegetación y las condiciones de sequía. Entre los principales índices de sequía basados en teledetección, se encuentra el *Vegetation Health Index (VHI)*, el *Temperature Condition Index (TCI)* y el *Vegetation Condition Index (VCI)*. Éstos índices se han aplicado con éxito en numerosos estudios de casos en diferentes condiciones ambientales en todo el mundo (Karnieli et al., 2010; Ke, Im, Lee, Gong, & Ryu, 2015; Liu & Kogan, 1996; Peters, WalterShea, Lel JI, Hayes, & Svoboda, 2002; Quiring & Ganesh, 2010; Rhee, Im, & Carbone, 2010). Estos índices utilizan *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)* como entrada, el cual es

el índice más utilizado para monitorear la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación (AghaKouchak et al., 2015; Organización Meteorológica Mundial, 2016; Zargar et al., 2011). Estos VI son utilizados ampliamente para caracterizar sequías de tipo meteorológico y agrícola, debido a que son capaces de detectar cambios en la salud de la vegetación, precipitación y la humedad del suelo.

Por otro lado, las estimaciones de los impactos de la sequía en el almacenamiento de agua terrestre (*Terrestrial Water Storage*, TWS) y las condiciones del agua subterránea, a escala regional o global, pueden obtenerse utilizando la misión de *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE). GRACE responde a todos los factores que cambian el campo de gravedad de un área, incluido el TWS. Esta misión fue lanzada en el año 2002 y, es capaz de rastrear las variaciones globales en los campos de gravedad que se pueden convertir en estimaciones de TWS (Thomas, Reager, Famiglietti, & Rodell, 2014). El principio de la gravimetría y la estimación de TWS, es que la masa de agua superficial y otras cargas variables de la superficie, tiene un potencial gravitatorio que altera el campo de gravedad de la Tierra, lo cual induce desplazamientos verticales y horizontales instantáneos a partir de la deformación elástica de la corteza (Borsa, Agnew, & Cayan, 2014).

Se ha estudiado ampliamente el comportamiento del TWS por medio de GRACE (Chew & Small, 2014; Ferreira et al., 2018; Frappart & Ramillien, 2018; Thomas et al., 2017), pero debido a que la resolución espacial de esta misión es de varios cientos de kilómetros (~400km), se necesita información adicional sobre TWS, a una resolución más alta para comprender el alcance y el impacto de las sequías hidrológicas a escalas regionales. Debido al comportamiento estacional elástico de la corteza, estas variaciones son detectadas a niveles milimétricos por la componente *Up* de las series temporales obtenidas de posicionamiento por *Global Navigation Satellite System* (GNSS) o de *Global Positioning System* (GPS) (Ferreira et al., 2018).

Las series temporales de la componente *Up*, obtenidas a partir de observaciones de GPS continuas se han utilizado en muchos estudios para cuantificar el total de agua perdida debido a eventos de sequía (Borsa et al., 2014; Chew & Small, 2014), una vez removidas

las cargas atmosféricas y oceánicas, así como los efectos no geodinámicos, como la estabilidad del marco de la estación, la expansión térmica y el cambio de antena, y también los errores debidos a *Tidal Aliases* y periodos draconíticos (Ferreira et al., 2018).

En los últimos años, se han registrado intensas sequías en todo el mundo, las cuales han afectado grandes áreas en Europa, África, Asia, Australia, América del Norte, América Central y América del Sur (Mishra & Singh, 2010). Los efectos de la sequía varían dependiendo de la capacidad de cada país para afrontar las sequías. Por ejemplo, las personas que viven en regiones con sistemas de riego avanzados, como los de los países desarrollados, pueden mitigar los impactos de la sequía mucho mejor que los agricultores en África, y otros países en desarrollo que a menudo cuentan con herramientas limitadas para combatir las sequías y otros desastres naturales (Dai, 2011).

En el caso de América Latina y el Caribe la presencia de lluvias y sequías extremas se ha convertido, en una amenaza constante (Báez, Fuchs, & Rodríguez-Castelán, 2017). Los eventos climáticos extremos pueden manifestarse en ambos lados del espectro, de este modo, la escasez crítica y prolongada de agua, también es común. El Corredor Seco, es una región de bosques tropicales secos en Centroamérica que se extiende en algunas zonas de Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua y Panamá, la cual se ve regularmente afectado por sequías recurrentes, las cuales amenazan los cultivos, la ganadería y la seguridad alimentaria de más de un millón de familias dedicadas a la agricultura.

La capacidad de reacción de América Latina y el Caribe ante el fenómeno de la sequía es dispar, ya que algunos países presentan más capacidades que otros para responder a las contingencias (Báez et al., 2017). Países como Perú, Venezuela, Brasil y las naciones centroamericanas han informado recientemente de problemas por la sequía, las cuales han afectado significativamente su producción y desarrollo económico (FAO, 2017).

Por otro lado, Chile ha sido evaluado como un país vulnerable al cambio climático y, en la actualidad no se encuentra completamente preparado para enfrentar desastres naturales. La

variabilidad natural del clima en Chile a menudo conduce a eventos climáticos extremos, como heladas, inundaciones, tormentas severas, sequías, entre otros. Las sequías en Chile, tienen una ocurrencia periódica, asociada a la Oscilación Climática del Sur – El Niño (*El Niño Oscillation Southern*, ENOS), e incide fuertemente en las zonas de secano y, en general, donde se concentra la producción agrícola del país (Meza et al., 2010).

Las sequías en Chile han sido estudiadas desde diferentes perspectivas y en diferentes escalas espacio-temporales. Garreaud (2015) estudió las mega-sequías meteorológicas en la zona central de Chile mediante 153 estaciones pluviométricas con registros históricos de entre 30 y 50 años, caracterizando la intensidad de estas sequías mediante el índice SPI, detectando como la más severa y extensa la mega sequía del 2010-2015. Zambrano et. al (2016) estudió las sequías agrícolas en la región del Biobío (Ahora dividida en las Regiones XVI y VIII) para los años 2000-2016, con datos de precipitaciones desde 26 estaciones pluviométricas con registros superiores a 30 años, y datos derivados del satélite MODIS, con los índices SPI y VCI, respectivamente. Obteniendo como resultado la identificación de 3 sequías de carácter agrícola, en los periodos 2007-2008, 2008-2009, y 2014-2015.

Por otro lado, las sequías de tipo hidrológicas se han estudiado utilizando estaciones pluviométricas presentes a lo largo de Chile (Fernández, 1997), pero muchas de estas estaciones se encuentran inactivas o con registro muy cortos para caracterizar sequías de tipo hidrológico, considerando también que la distribución de estas estaciones, no aseguran ser representativas en zonas de grandes extensiones.

Métodos para el estudio de sequía hidrológicas mediante GRACE no son factibles en Chile, debido a su forma estrecha y alargada, la resolución espacial de este sensor (~400km), no es suficiente para realizar estudios de este tipo. Sin embargo, Chile cuenta con una red nacional de más de 100 estaciones GPS de monitoreo permanente distribuidos a lo largo de todo el país. Esto proporciona una oportunidad interesante para estudiar el uso de GPS como una fuente complementaria en el estudio y monitoreo de sequías de tipo hidrológico.

El presente estudio se enfoca en identificar las sequías ocurridas en las Regiones XVI Región de Ñuble, VIII Región del Biobío, y la IX Región de la Araucanía en el periodo 2010-2015, mediante diferentes observaciones geodésicas. La región de Ñuble y el Biobío han sido afectados por intensas sequías a lo largo de los años, y se han caracterizado sequías de tipo meteorológicas y agrícolas, mediante estaciones pluviométricas e imágenes satelitales. Por el contrario, la región de la Araucanía, no ha sido ampliamente estudiada en este aspecto, a pesar de que en los últimos años ha sido afectada por inusuales eventos de sequías (Garreaud et al., 2017), perjudicando su desarrollo económico. Por otro lado, las sequías de tipo hidrológico, en ambas regiones, son principalmente determinadas mediante estaciones fluviométricas, las cuales son escasas e inexactas, ya que carecen de datos continuos y estos se ven perturbados por la actividad de las hidroeléctricas. Es por esto que se propone el uso de datos derivados de las series temporales de la componente *Up* de GPS como una alternativa para detectar y monitorear sequías con carácter hidrológico. Los resultados serán contrastados con los datos obtenidos por índices tradicionales de sequías, el primero de ellos está basado en estaciones pluviométricas obtenidas desde la Dirección General de Aguas (DGA), el índice SPI en diferentes escalas de tiempo, y el segundo se encuentra basado en percepción remota por medio del producto MOD13Q1 del satélite Terra MODIS, el índice VCI. También se realizará un análisis de correlación entre la serie temporal GPS y los datos del índice ONI (*Oscillation Niño Index*).

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Evaluar el potencial de los índices de sequía mediante observaciones geodésicas, durante el periodo 2010-2015 en las regiones XVI de Ñuble, VIII del Bio bio y IX de la Araucanía.

1.1.2. Objetivos específicos

- Estimar el índice de sequías basado en datos obtenidos desde estaciones pluviométricas.
- Estimar el índice de sequías basado en datos obtenidos desde imágenes MODIS.
- Estimar el índice de sequías basado en datos obtenidos desde estaciones GPS.
- Identificar y caracterizar las sequías significativas en el periodo 2010-2015.
- Establecer una relación entre los diferentes índices estimados mediante las sequías caracterizadas y el ONI.



2. Revisión bibliográfica

2.1. Importancia del monitoreo de sequías en zonas agrícolas de Chile

El clima variable de Chile a menudo conduce a eventos climáticos extremos, como heladas, inundaciones, tormentas severas, sequías, entre otros. Estos eventos suelen destruir insumos clave para la agricultura, generando el descenso de la producción agrícola, lo que compromete la seguridad alimentaria del país. De forma particular, las sequías pueden generar efectos perjudiciales sobre la salud, reducir la productividad de las empresas, acelerar la destrucción de los bosques y poner en peligro los sistemas agrícolas (FAO, 2017).

Un suministro continuo de agua durante toda la temporada del crecimiento de los cultivos, mejora la calidad y cantidad de la producción agrícola. Esto puede lograrse a través del riego, sin embargo, con la ausencia de instalaciones de riego, y la dispareja distribución de los recursos hídricos del país (Zona norte árida, Zona Sur muy húmeda), los cultivos dependen principalmente de la distribución espacial y temporal de la precipitación, que, a su vez, controla el rendimiento y la producción de los cultivos. Por lo tanto, el monitoreo efectivo y oportuno de las sequías durante la temporada de crecimiento podría ser de gran ayuda para minimizar las pérdidas agrícolas (Hazaymeh, 2016)

Cuando las sequías no son detectadas a tiempo y su origen se debe a las variaciones climáticas naturales, éstas tienden a evolucionar, es decir: a medida que la sequía se extiende en el tiempo, su severidad aumenta, evolucionando de sequías meteorológicas a agrícolas y, finalmente, en su etapa más severa, evoluciona a una sequía hidrológica, donde los recursos hídricos superficiales y freáticos se ven afectados significativamente. Por otro lado, las sequías de tipo socioeconómico pueden ocurrir en cualquier etapa de sequía. En la Figura 1 a continuación, se presenta el diagrama de cómo evoluciona la sequía en el tiempo según variaciones climáticas naturales. Cuando existen intervenciones humanas importantes, este patrón se perturba y es posible que ocurra una sequía agrícola o hidrológica sin estar relacionadas con una sequía meteorológica (Hazaymeh, 2016).

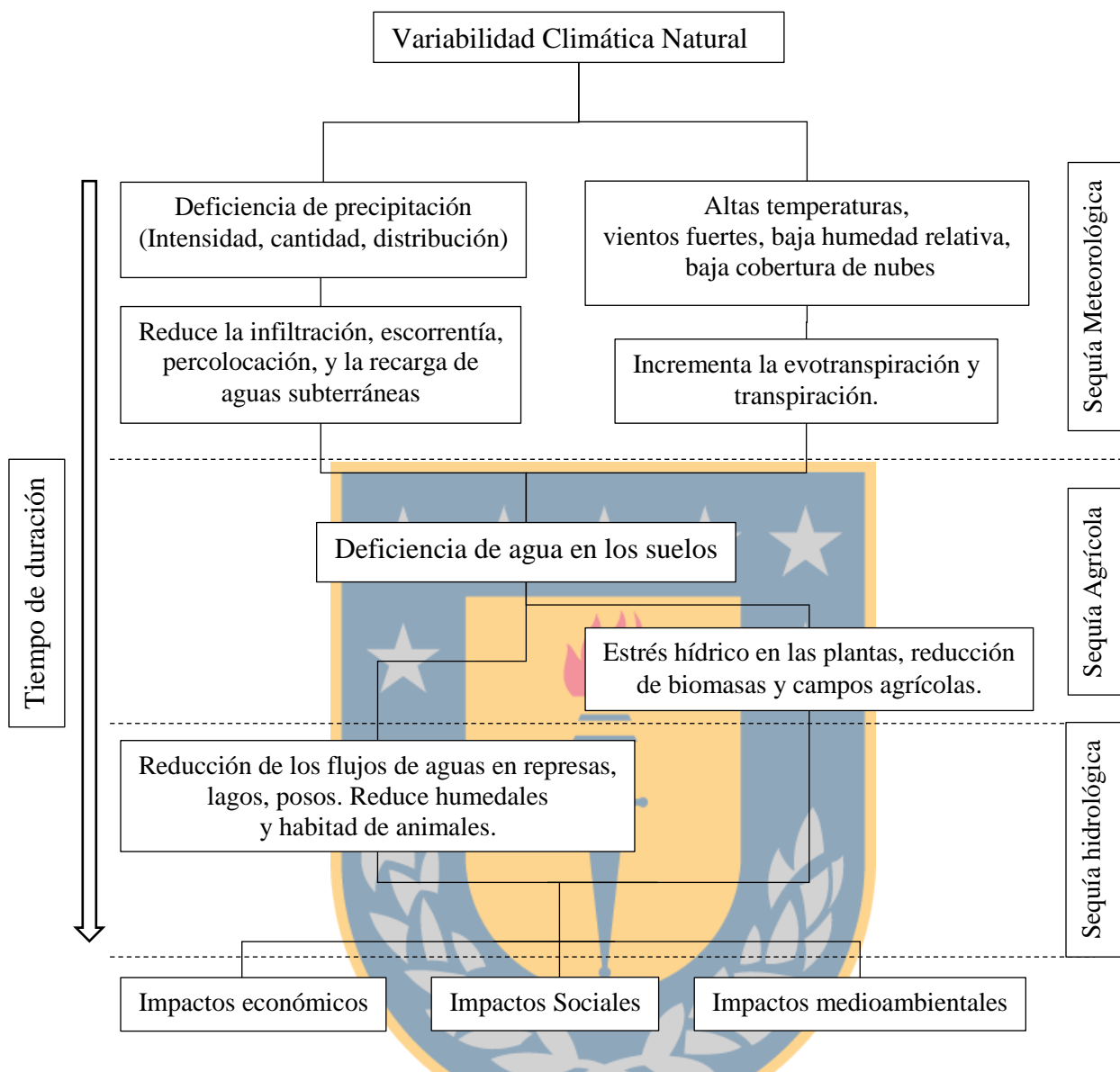


Figura 1: Esquema del comportamiento de las Sequías.
Fuente: Hazaymeh, 2016.

Las sequías en Chile, tienen una ocurrencia periódica, asociada a la Oscilación Climática del Sur – El Niño (ENSO), e incide fuertemente en general, donde se concentra la producción agrícola del país (Meza et al., 2010). Éstas han sido estudiadas en diversas escalas de tiempo y espacio. A continuación, se presenta una revisión de las principales sequías que han afectado el país.

- Sequías Meteorológicas:

Sequías meteorológicas de uno o dos años han afectado de manera recurrente la zona central de Chile, valores anuales con déficit pluviométricos cercanos al 30% (valor indicativo de una condición de sequía meteorológica), ocurren en 20 casos dentro de los registros históricos, comprendidos entre los años 1940 y 2015, es decir, aproximadamente ocurren sequías un 25% del tiempo. La mayoría de los años de sequía ocurren en forma aislada, aunque existen 4 eventos de multianuales (2 o 3 años) en que la deficiencia de precipitaciones es cercana al 30%. Estos eventos singulares son denominados mega-sequías (Garreaud et al., 2017): 1967-1969, 1988-1990, 1994-1996, 2010-2015.

Cada Mega-sequía registrada posee una intensidad y extensión diferente, por ejemplo, la Mega-sequía 1967-1969, incluye el año más seco registrado en el historial de sequías (año 1968, con déficits superiores al 60%) y fue particularmente intensa en el norte Chico y sector central, extendiéndose hasta la región del Maule, al igual que el evento 1988-1990. La Mega-sequía 1994-1996 solo afectó desde la región de O'Higgins hacia el norte con déficit cercanos al 40%. En contraste, la mega-sequía (2010-2015) es el evento de mayor extensión espacial, con déficit pluviométricos superiores al 30% desde el norte Chico hasta la región de la Araucanía. (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia CR2, 2015; Garreaud et al., 2017).

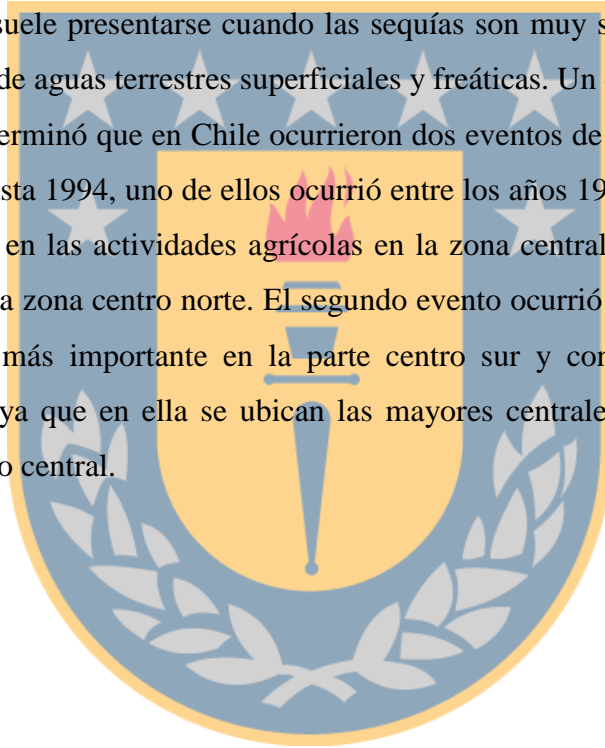
- Sequías Agrícola:

Este tipo de sequías afecta fuertemente la zona central de Chile, ya que en esta zona la actividad económica principal está asociada con la agricultura y ganadería. Zambrano et. al (2016) estudió las sequías agrícolas en la región del Biobío para los años 2000-2016, con datos de precipitaciones desde 26 estaciones pluviométricas con registros superiores a 30 años, y datos derivados del satélite Terra MODIS, con los índices SPI y VCI, respectivamente. Obteniendo como resultado la identificación de 3 sequías de carácter agrícola, en los periodos 2007-2008, 2008-2009, y 2014-2015.

- Sequías Hidrológicas:

Las sequías de tipo hidrológicas, han sido estudiadas utilizando estaciones fluviométricas presentes a lo largo de Chile (Fernández, 1997), el problema de esta metodología es que muchas de estas estaciones se encuentran inactivas o con registro muy cortos para caracterizar sequías de este tipo, considerando también que la distribución de estas estaciones, no aseguran ser representativas del comportamiento de las aguas en zonas de grandes extensiones debido a que los caudales de los ríos y embalses pueden variar dependiendo de la intervención humana o la posición de la estación en el afluente.

Este tipo de sequías suele presentarse cuando las sequías son muy severas e intensas, lo cual afecta las masas de aguas terrestres superficiales y freáticas. Un estudio realizado por Fernández (1997) determinó que en Chile ocurrieron dos eventos de sequías hidrológicas en el periodo 1950 hasta 1994, uno de ellos ocurrió entre los años 1968-1972 el cual tuvo una gran repercusión en las actividades agrícolas en la zona central de Chile, afectando fundamentalmente a la zona centro norte. El segundo evento ocurrió entre los años 1988-1990 con un efecto más importante en la parte centro sur y consecuencias sobre la producción eléctrica ya que en ella se ubican las mayores centrales hidroeléctricas del sistema interconectado central.



2.2. Revisión de Índices de Sequías

2.2.1. Standardized Precipitation Index (SPI)

El SPI fue desarrollado por McKee et al. (1993), se basa en la probabilidad estadística de ocurrencia de precipitaciones, fue diseñado para comportarse como un indicador temporal y espacial de las sequías. El SPI se calcula mediante una serie de datos de precipitaciones de un período suficientemente largo (30 o más años) para cada estación pluviométrica, con registros de promedios mensuales de datos diarios con más de 20 días observados. La distribución de la serie es ajustada a una distribución Gamma, dado que es la que mejor se ajusta a las series de precipitaciones mensuales. La probabilidad acumulada obtenida con la distribución Gamma es transformada a una distribución Normal con una media igual a cero y una desviación estándar igual a uno. Esta estandarización brinda la ventaja de tener valores constantes en el espacio y el tiempo para la frecuencia de eventos de sequía y humedad extremos (Karavitis, Alexandris, Tsesmelis, & Athanasopoulos, 2011).

Los valores de SPI pueden ser obtenidos para reflejar las condiciones hídricas en diferentes escalas de tiempo: un mes (SPI1), tres meses (SPI3), seis meses (SPI6), 12 meses (SPI12) y 24 meses (SPI24), lo cual permite evaluar los déficits de precipitación en las diferentes fuentes de agua (agua subterránea, embalses, humedad del suelo y escurrimientos superficiales). Se considera que un período de sequía comienza cuando el SPI alcanza un valor de -1.0 y que el mismo termina cuando los valores de SPI se tornan nuevamente positivos (McKee et al., 1993).

La Organización Meteorológica Mundial (OMM), desde el año 2009, recomienda que todos los servicios meteorológicos, agrícolas e hidrológicos nacionales utilicen SPI para controlar la sequía (OMM, 2012) debido a su simplicidad y flexibilidad en el control de este fenómeno. Se han realizado diversos estudios para evaluar su eficiencia frente a eventos de sequías (Bağ & Kubiak-Wójcicka, 2014; de Oliveira-Júnior et al., 2018; Karavitis et al., 2011).

El SPI clasifica las sequías en 4 tipos, dependiendo del valor del SPI calculado, es decir, sequías casi normales, moderadas, severas y extremas (McKee et al. 1993).

Clase de sequía	Escala SPI
Extrema	SPI < -2.0
Severa	-2.0 ≤ SPI < 1.5
Moderada	-1.5 ≤ SPI < -1.0
Leve	-1.0 ≤ SPI < 0.0
Sin sequía	0.0 < SPI

Tabla 1: Clasificación de sequías según Índice SPI (McKee et al., 1993).

2.2.2. Vegetation Condition Index (VCI)

El índice VCI fue diseñado por Kogan (1990), es ampliamente usado en el estudio de sequías de carácter agrícola (Quiring & Ganesh, 2010; Zambrano et al., 2016). Su cálculo deriva de los valores del NDVI, filtrados para minimizar el ruido causado por la variabilidad interanual de sus series de tiempo, las cuales pueden ser causada por (Forkel et al., 2013):

- a) Contaminantes, como datos preprocesados insuficientes u observaciones multisensor insuficientes,
- b) las distorsiones meteorológicas, como nubes o cubierta de nieve y,
- c) los procesos ambientales, como efectos de variaciones año a año en condiciones climáticas sobre la actividad de las plantas o alteraciones del ecosistema.

El cálculo de índice VCI se realiza mediante la siguiente expresión:

$$VCI_{i,p,j} = 100 * \frac{NDVI_{i,p,j} - NDVimin_{i,p}}{NDVImax_{i,p} + NDVimin_{i,p}} \quad (1)$$

Dónde, $NDVI_{i,p,j}$ es el NDVI para el píxel i , en el periodo p y en el año j , el $NDVImax_{i,p}$ y el $NDVimin_{i,p}$ son los valores multianuales máximos y mínimos de NDVI, respectivamente, calculado para cada píxel i , en el periodo p .

Según Kogan (1990), el NDVI representa dos señales ambientales, la primera de ellas es el ecosistema, que explica los cambios a largo plazo en la vegetación (impulsados por el clima, los suelos, el tipo de vegetación, la topografía, etc.) y, la segunda es el clima (a corto plazo), lo que explica las variaciones interanuales en cada ecosistema en respuesta a las fluctuaciones climáticas. Dado que el componente meteorológico es mucho más pequeño que el componente del ecosistema, el algoritmo se desarrolló para mejorar la componente meteorológica.

Clase de sequía	Escala VCI
Extrema	< 10
Severa	< 20
Moderada	< 30
Leve	< 40
Sin sequía	≥ 40

Tabla 2: Clasificación de sequías según Índice VCI (Kogan, 1990).

2.2.1. Drought Index GPS (DI_{GPS})

Las variaciones en el comportamiento estacional elástico de la corteza, son detectadas a niveles milimétricos por la componente Up de las series temporales obtenidas de posicionamiento por *Global Navigation Satellite System* (GNSS) o de *Global Positioning System* (GPS). Las series temporales de la componente Up , obtenidas a partir de observaciones continuas de GPS se han utilizado en muchos estudios para cuantificar la cantidad de agua perdida debido a eventos de sequía (Borsa et al., 2014; Chew & Small, 2014; Fu, Argus, & Landerer, 2015)

La componente Up , obtenida desde observaciones GPS o GNSS, registra una gran variedad movimientos ocurridos en la corteza terrestre (*Vertical Crustal Movement*, VCM), incluyendo movimientos de placas tectónicas, relajación postsísmica, ciclos hidrológicos, cambios de antena, entre otros. Por lo que es necesario modelar los diferentes componentes de la serie temporal, tales como los saltos (*Jumps*), los datos atípicos (*Outliers*), la tendencia (*Trends*), el ruido (*Noises*), los ciclos (*Cycles*), entre otros.

Existen diversos modelos matemáticos para ajustar los comportamientos de las series temporales, uno de ellos es el *Standard Linear Trajectory Model* (SLTM), el cual modela tres aspectos importantes de las series temporales, esto es, saltos, tendencia y ciclos. Se define matemáticamente como (Bevis & Brown, 2014):

$$x(t) = x_{trend} + x_{jumps} + x_{cycles} \quad (2)$$

$$x(t) = \sum_{i=1}^{np+1} p_i(t - t_r)^{i-1} + \sum_{j=1}^{nj} b_j H(t - t_j) + \sum_{k=1}^{nf} s_k \sin(w_k t) + c_k \cos(w_k t) \quad (3)$$

Dónde, np es el orden del polinomio que modela la función de la tendencia, nj es la cantidad de saltos de la serie temporal, b_j caracteriza el salto que se produce en el tiempo t , s_k y c_k son los coeficientes de la serie estandarizada de Fourier, w_k es la frecuencia angular, y nf es el número los ciclos modelados por la serie estandarizada de Fourier de cuatro términos.

Una vez que los efectos de los saltos y los datos atípicos son removidos y modelados, manteniendo la estacionalidad en la serie temporal, es posible relacionar la deficiencia de agua con el desplazamiento vertical de la corteza en el tiempo, como sigue (Ferreira et al., 2018):

$$D(t) = -\Delta u \quad (4)$$

Dónde, D es el desplazamiento realizado por la corteza en un tiempo t y, Δu es la deficiencia de agua detectada según el movimiento de la corteza. Los valores positivos indican exceso de masa de agua y los valores negativos indican déficit de masa de agua en una época t . Por lo tanto, la variable D está correlacionada positivamente con el comportamiento de las masas agua.

Luego, se requiere un estudio climatológico de los datos mensuales para los movimientos de la corteza, esto es:

$$C_i = \text{median}(D(i:12:nx12)), \text{ para } i = 1, 2, \dots, 12.$$

(5)

Dónde i es el mes del año, es decir, de enero a diciembre, siendo del 1 al 12 meses del año en el calendario gregoriano, n es el número entero de años y, cada D mensual se calculan según condiciones normales (Thomas et al., 2017), debido a que las serie temporales presentan fuertes estacionalidades frente a los cambios climáticos. El uso de la mediana se debe a que esta medida no se ve afectada por valores atípicos y es más estable que la media. Finalmente, se calcula una serie normalizada para expresar el exceso de masa de agua (+) o el déficit (-):

$$DI_{GPS} = \frac{D^*(t)}{std(D^*)} \quad (6)$$

donde DI_{GPS} representa el índice de sequía basado en observaciones GPS y, D^* es la serie de la deformación vertical después de restar la normal climática mensual basada en la ecuación 5.



2.2.2. Otros índices

El Índice de Sequía Agregada (IDA) fue desarrollado por Keyantash & Dracup (2004). IDA considera exhaustivamente todas las formas físicas de sequía (meteorológica, hidrológica y agrícola), a través de la selección de variables relacionadas con cada tipo de sequía. Barua, Muttill, Ng, & Perera (2013) propusieron el Índice de Sequía de Agregados No lineales (NADI) el cual es más complejo y exigente con la disponibilidad de datos, por lo que contrarresta las debilidades de la IDA.

El índice de severidad de la sequía de Palmer (PDSI) (Palmer & C., 1965), es otro índice de sequía importante. Éste emplea datos de temperatura y precipitación para estimar el suministro y la demanda de humedad, en un modelo de suelo de dos capas. Sin embargo, este índice tiene algunas limitaciones, como el uso de reglas arbitrarias para cuantificarlo y una metodología limitada para estandarizarlo (Alley, 1984). Por otro lado, este índice depende de la disponibilidad de datos de campo temporal y espacial, lo que complica su implementación en países en desarrollo con escasez de datos, donde la disponibilidad de registros históricos es limitada y la densidad de la estación pluviométricas es insuficiente.

El Índice de Suministro de Agua Superficial (SWSI) fue desarrollado por Shafer & Dezman (1982) para complementar el índice de Palmer para las condiciones de humedad en todo el estado de Colorado, Estados Unidos. El objetivo de SWSI era incorporar características hidrológicas y climatológicas en un valor de índice único que se asemejara al índice de Palmer para cada una de las principales cuencas fluviales en el estado de Colorado. Palmer (1965) desarrolló el Índice de sequía hidrológica de Palmer (PHDI), que es muy similar al PDSI, utiliza la evaluación idéntica del balance hídrico en un modelo de suelo de dos capas.

Otro índice importante es el *China-Z Index* CZI, el cual es similar al SPI debido a que se utiliza la precipitación para determinar los períodos húmedos y secos, suponiendo que la precipitación sigue una distribución de Pearson tipo III. El índice CZI utiliza intervalos de tiempo que abarcan entre 1 y 72 meses, lo que posibilita la detección de sequías de varias duraciones. Los resultados de este índice se entregan en valores Z, de la distribución normal de Gauss, y no necesitan ser ajustados a distribuciones Gamma o de Pearson tipo II, por lo

que en escalas temporales más cortas pueden ser menos representativas que en el SPI (Wu et al., 2001). En la Tabla 3 se muestra un resumen de los diferentes índices más frecuentes utilizados para estimar las sequías.

<i>Sigla</i>	<i>Índice</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
SPI	<i>Standardized Precipitation Index</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Solo se necesitan datos de la precipitación, por lo que es muy fácil de usar y calcular. • Se puede realizar para distintos intervalos de tiempo. • Se puede aplicar en todos los regímenes climáticos. • Se pueden comparar los valores del SPI de climas muy diferentes. 	<ul style="list-style-type: none"> • No tiene en cuenta el componente de la temperatura. • El SPI presupone una distribución previa que tal vez no sea compatible con todos los entornos
CZI	<i>China-Z Index</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculos sencillos. • Se pueden realizar para distintos intervalos de tiempo. • Se puede utilizar tanto para episodios de humedad como de sequía. • Admite datos ausentes, de la misma forma que el SPI. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los datos del resultado Z no necesitan ser ajustados a distribuciones gamma o de Pearson tipo II, y se sospecha que por este motivo las escalas temporales más cortas pueden estar menos representadas que en el SPI.
PDSI	<i>Palmer Drought Severity Index</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Se utiliza en todo el mundo, y el código y los productos son fáciles de conseguir. • Es preciso para detectar sequías gracias a la utilización de datos del suelo y de una metodología del balance hídrico total. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesita disponer de datos completos en serie. • Tiene una escala temporal de nueve meses, aproximadamente. • No gestiona adecuadamente la precipitación helada ni los suelos congelados
VCI	<i>Vegetation Condition Index</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Resolución alta. • Buena cobertura espacial. 	<ul style="list-style-type: none"> • Posibilidad de alteración de los resultados por la nubosidad. • Período corto de registro.
DI _{GPS}	<i>Drought Index GPS</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Considera todas las masas de agua terrestre. • Cálculo sencillo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Registro cortos • Necesidad de preprocesar las series de tiempo.
SWSI	<i>Surface Water Supply Index</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Representa condiciones de suministro de agua únicas para cada cuenca. 	<ul style="list-style-type: none"> • Al cambiar una estación o la gestión del agua, se requiere que se calculen nuevos algoritmos, • Es único para cada cuenca, lo que limita las comparaciones entre cuencas
PHDI	<i>Palmer Hydrological Drought Index</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Su método de balance hídrico permite analizar el sistema hídrico en su integridad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los cálculos no se tiene en cuenta el flujo humano, como las decisiones de gestión y el riego.
IDA	<i>Aggregate Drought Index</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Considera todas las formas físicas de sequía (meteorológica, hidrológica y agrícola) 	<ul style="list-style-type: none"> • Asume relaciones lineales entre variables en la formulación de componentes principales.
NADI	<i>Nonlinear Aggregate Drought Index</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Considera todas las variables hidrometeorológicas potenciales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Complejo • Aún no se ha probado en otras regiones.

Tabla 3: Comparación de diferentes índices.

3. Área de estudio

El área de estudio abarca entre los 36° - 41° latitud Sur y entre los 71° - 74° longitud Este, con un total de 55748 km² de superficie y 2.603.736 habitantes, aproximadamente (ver Figura 2). El área comprende las regiones XVI de Ñuble, VIII del Biobío y IX de la Araucanía, las cuales son regiones dedicadas principalmente a la producción agropecuaria y forestal. Además, estas regiones poseen un gran potencial turístico debido a la belleza de su paisaje, ya que se encuentran conformadas por bosques, lagos, ríos, volcanes y montañas.

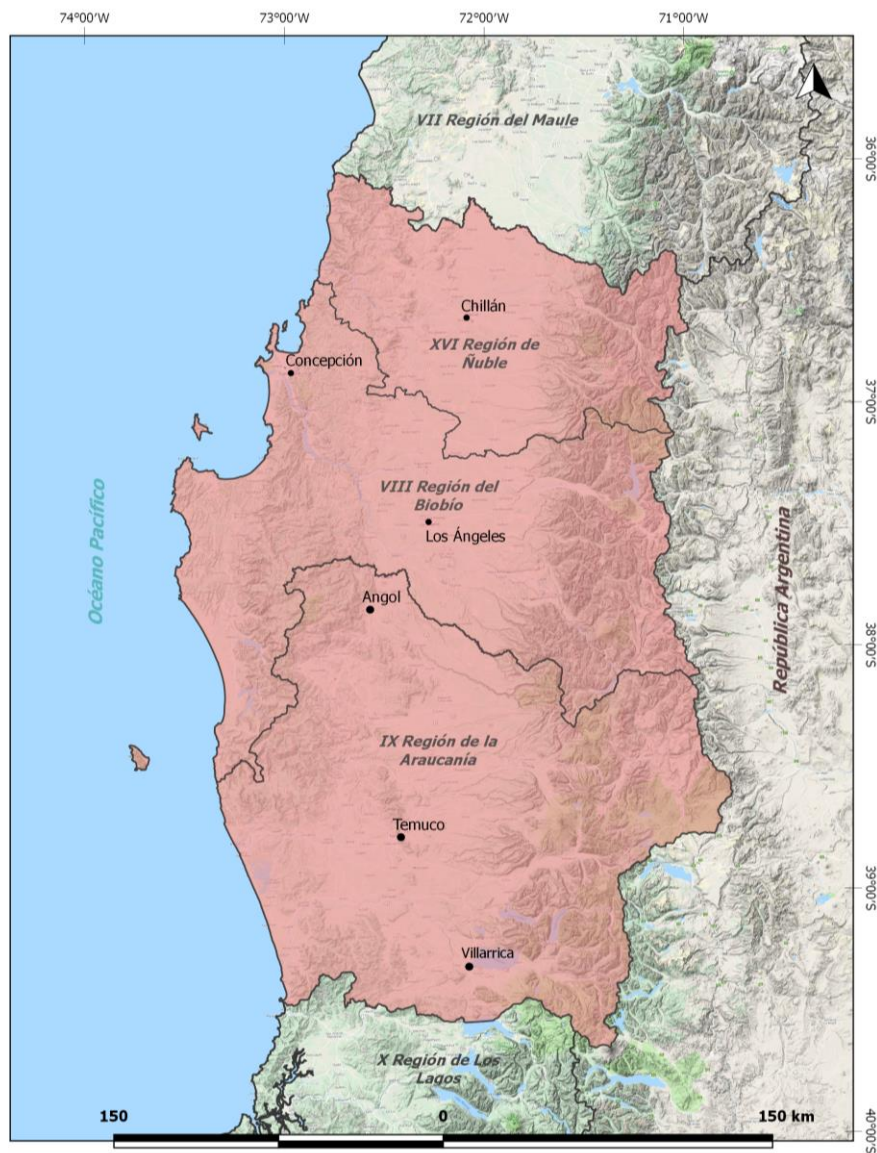


Figura 2: Mapa de ubicación de la zona de estudio
Fuente: Elaboración propia.

El clima de estas regiones es mediterráneo, con estaciones climáticas de características semejantes, sin embargo, hacia el sur la influencia mediterránea cambia a oceánica. La región de Ñuble marca la transición entre los climas templados secos de la zona central de Chile y los climas templados lluviosos que comienzan a desarrollarse desde el borde sur de la cuenca del Itata. En la franja costera y en los sectores altos y laderas occidentales de la Cordillera de la Costa se presenta un clima templado húmedo, con una humedad constante con precipitaciones que fluctúan entre 800 mm y 1.000 mm anuales de norte a sur de la región. Hacia el interior el clima templado mediterráneo posee temperaturas más fluctuantes, donde las precipitaciones alcanzan entre 1.000 a 1.500 mm anuales con un período seco de cuatro meses. En la Cordillera de los Andes por sobre los 1.500 metros de altitud se desarrolla el clima frío de altura con abundantes precipitaciones, superando incluso los 2.000 mm anuales, lo que sumado a las bajas temperaturas dominantes, permiten la presencia de nieves permanentes en la sección de mayores altitudes (BNC, 2015).

La región del Biobío en la franja costanera y en los sectores altos y laderas occidentales de la Cordillera de la Costa presenta un clima templado húmedo, con una humedad constante con precipitaciones que fluctúan entre 1.200 mm y 2.000 mm anuales de norte a sur de la región. Hacia el interior el clima templado costero húmedo posee también temperaturas menos extremas donde las precipitaciones alcanzan 1.330 mm anuales con un período seco de cuatro meses. En la parte norte de la región predomina el clima templado mediterráneo abarcando toda la zona intermedia, bordes orientales de la Cordillera de la Costa y los sectores más bajos de la precordillera. En la Cordillera de los Andes por sobre los 1.500 metros de altura se desarrolla el clima frío de altura con abundantes precipitaciones, más de 2.000 mm anuales y las bajas temperaturas que permiten la presencia de nieves permanentes en las alturas de la cordillera (BNC, 2015).

Por otro lado, la región de la Araucanía presenta características predominantes de clima templado oceánico lluvioso que se localiza de preferencia en la Cordillera de la Costa, y en la precordillera andina, presentando características de mayor continentalidad debido a su relativo alejamiento del mar. Esto provoca un mayor contraste en las temperaturas

encontrándose mínimas de 2°C y máximas de 23°C en los meses más calurosos. Las precipitaciones varían entre 1.500 y 2.500 mm produciéndose los periodos secos de uno a dos meses. En la costa existe una variedad denominada clima templado oceánico de costa occidental, que se caracteriza por abundante humedad relativa y precipitaciones entre 1.000 y 1.500 mm, es en lo alto de la cordillera de la costa donde se producen las mayores precipitaciones. En la Cordillera de los Andes predomina el clima frío de altura, caracterizado por el aumento de precipitaciones de 3.000 mm anuales y bajas temperaturas durante todo el año, sobre los 1.500 metros sobre el nivel del mar las precipitaciones sólidas y las temperaturas son bajo 0°C, los periodos secos son de uno a dos meses (BNC, 2015).



4. Datos

4.1. Estaciones pluviométricas

La Dirección General de Aguas (DGA) y el Servicio de Meteorología Nacional (SMN) mantienen más de 700 estaciones pluviométricas a lo largo de todo Chile. Gran parte de las estaciones son pluviómetros convencionales, y comenzaron sus mediciones en los años 60 hasta la actualidad. Se recolectaron los datos mensuales de 56 estaciones pluviométricas para abarcar el área de estudio (ver Tabla 4). Estas estaciones presentan registros de precipitaciones de más de 30 años y, la media mensual se realiza en base a que, durante el mes, dicha estación posea más de 20 observaciones. Los datos de estas estaciones fueron recuperados desde el *Climate Explorer* de Chile. (<http://explorador.cr2.cl>, accedido en abril, 2018).

N°	Nombre	Región	Coordenadas UTM18S		N°	Nombre	Región	Coordenadas UTM18S	
			Este	Norte				Este	Norte
1	SAN MANUEL	XVI	264459,3	5970794,3	29	LAGUNA MALLECO	IX	253733,2	5766160,8
2	CARACOL	XVI	285706,6	5940783,5	30	MALALCAHUELLO	IX	275123,4	5738489,9
3	CAMAN	XVI	294357,3	5938559,6	31	CURACAUTIN	IX	247049,5	5740185,8
4	SAN FABIAN	XVI	273911,0	5947976,2	32	TRICAUCO	IX	278503,4	5696345,5
5	COIHUECO EMBALSE	XVI	249561,9	5940946,4	33	CURARREHUE	IX	277979,5	5639955,7
6	TRUPAN	XVI	249530,1	5869895,0	34	PUESCO (ADUANA)	IX	280783,4	5622138,4
7	TUCAPEL	XVI	238121,5	5868096,0	35	LLAFENCO	IX	257732,3	5642315,6
8	FUNDO ATACALCO	XVI	269840,3	5910793,5	36	PUCON	IX	245292,8	5648153,3
9	LAS TRANCAS	XVI	278927,9	5911774,5	37	ENCIMAR MALLECO	IX	226783,6	5777550,8
10	DIGUILLIN	XVI	264244,4	5916068,3	38	TRANAMAN	IX	148048,3	5783856,3
11	CERRO EL PADRE	XVI	247353,3	5814382,0	39	LUMACO	IX	157739,9	5768452,6
12	CHILLAN VIEJO	XVI	220217,1	5941027,7	40	LAS MERCEDES (VICTORIA)	IX	217217,9	5761573,8
13	CHOLGUAN	XVI	227418,2	5883400,9	41	TRAIGUEN	IX	180081,3	5759079,0
14	PEMUCO	XVI	223768,5	5902877,6	42	QUILLEN	IX	204296,0	5736874,6
15	CHILLANCITO	XVI	194148,8	5925661,3	43	GALVARINO	IX	169976,2	5741190,6
16	NUEVA ALDEA	XVI	190839,8	5937519,3	44	LA CABAÑA	IX	129892,9	5730452,3
17	COELEMU	XVI	169307,6	5956662,3	45	LAUTARO	IX	198801,5	5730618,7
18	DICHATO	VIII	147864,4	5947968,4	46	PUEBLO NUEVO (TEMUCO)	IX	190601,0	5708719,7
19	QUILACO	VIII	234731,2	5824508,6	47	CHERQUENCO	IX	238838,4	5713657,8
20	SAN CARLOS DE PUREN	VIII	210470,1	5833664,2	48	VILCUN	IX	218423,1	5714814,6
21	MULCHEN	VIII	213872,3	5820509,4	49	FREIRE SENDOS	IX	187116,2	5681187,9
22	LOS ANGELES	VIII	198490,9	5843579,7	50	PUERTO SAAVEDRA	IX	118130,1	5697131,9
23	LAS ACHIRAS	VIII	201741,9	5857217,9	51	CUNCO	IX	238640,7	5686642,4
24	LAJA	VIII	170263,8	5867522,0	52	LOS LAURELES	IX	222458,3	5682571,3
25	CAÑETE	VIII	113089,8	5807094,6	53	VILLARRICA	IX	215593,7	5653828,9
26	CONTULMO	VIII	128419,4	5783294,7	54	CHANLELFU	IX	221666,7	5623757,1
27	LIUCURA	IX	317752,8	5719429,7	55	QUITRATUE	IX	184334,8	5659794,8
28	LONQUIMAY	IX	292623,8	5740811,9	56	TEODORO SCHMITD	IX	146741,1	5671850,1

Tabla 4: Estaciones Pluviométricas.

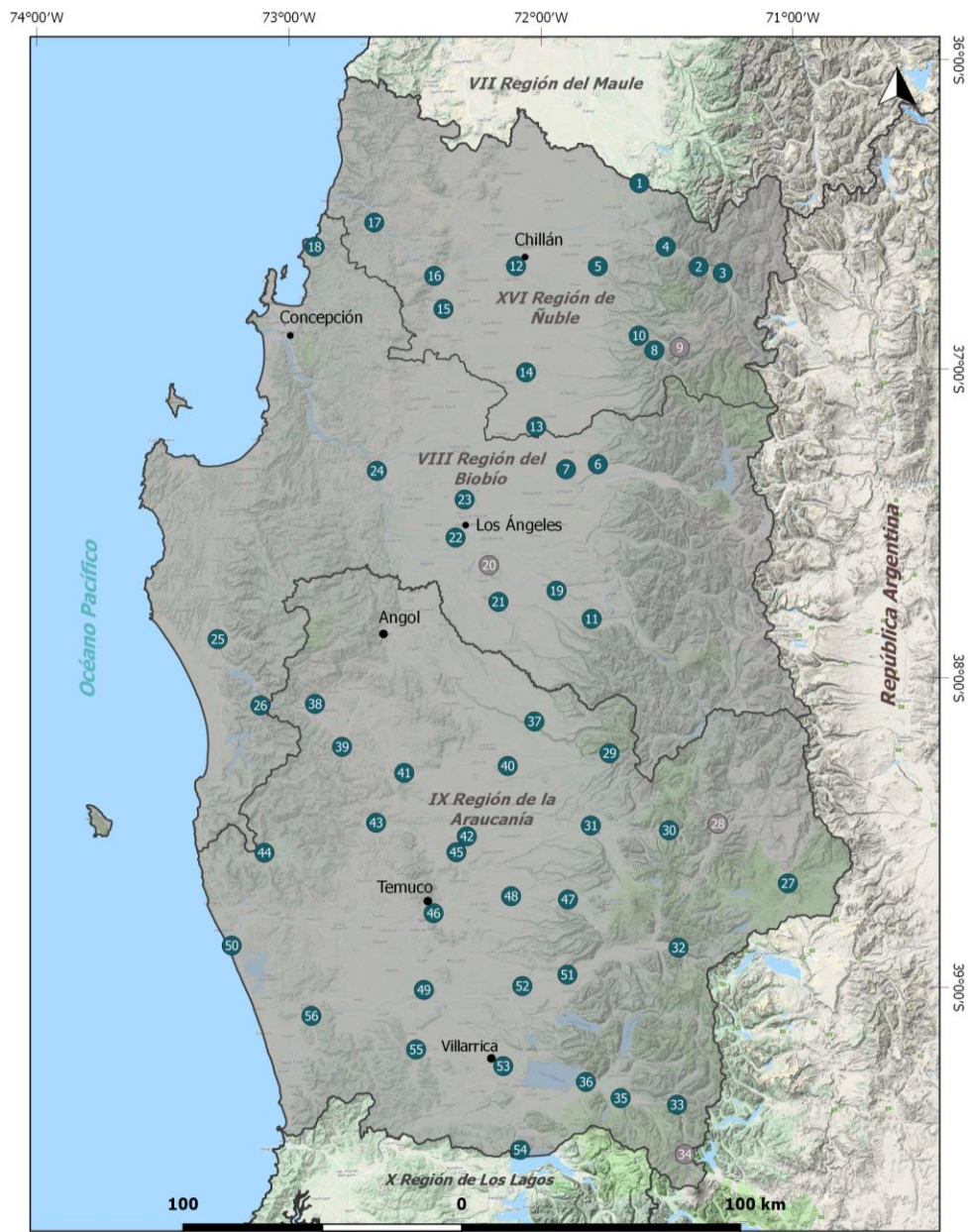


Figura 3: Mapa de estaciones Pluviométricas.
Fuente: Elaboración propia.

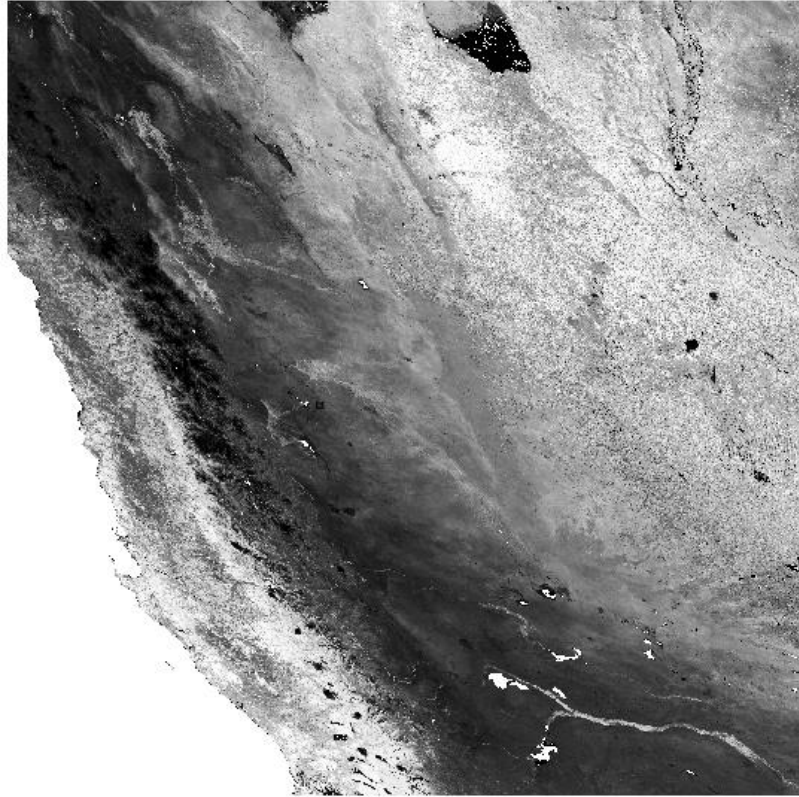
Durante el análisis de la serie temporal de precipitaciones, se eliminaron las estaciones que tuviesen más de dos meses consecutivos sin datos, ya que esto significa que hubieron menos de 20 registros diarios durante esos meses, lo cual puede alterar el resultado final del índice SPI (McKee et al., 1993). Así fueron eliminadas las estaciones: Las Trancas (9), San Carlos (20), Lonquimay (28) y Puesto (34). Las estaciones que presentaban un mes sin datos, fueron interpoladas mediante el método de *Spline Smoothed*.

4.2. Imágenes satelitales

MODIS es una herramienta clave en la percepción remota para la detección de fenómenos climatológicos, manteniendo registros desde febrero del 2000 hasta la fecha. Ha sido utilizado en innumerables estudios de diferentes disciplinas en todo el mundo (Ke et al., 2015; Rhee et al., 2010; Zambrano et al., 2016). Este instrumento realiza observaciones en 36 bandas espectrales que cubren longitudes de onda de 0,41 a 14,4 μm y en tres resoluciones espaciales nadir: 250 m, 500 m y 1 km.

Los índices de vegetación (VI) se obtuvieron a partir del producto de MODIS '*Vegetation Index 16-Day L3 Global 250 m*', abreviado como 'MOD13Q1'. El producto MOD13Q1 Versión 6 proporciona un valor de Índice de Vegetación (VI) por píxel. Contiene dos capas primarias de vegetación, la primera de ellas es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y la segunda capa de vegetación es el Índice de Vegetación Mejorada (EVI).

La cuadrícula consta de 4800 filas y 4800 columnas, con resolución de 250 metros por píxeles (Ver Figura 4). El algoritmo preestablecido elige el mejor valor de píxel disponible de todas las adquisiciones del período de 16 días. Los criterios que usa son: nubes bajas, ángulo de visión bajo y el valor más alto de NDVI / EVI. Para el cálculo de índice VCI se utilizó la capa que contiene los valores de NDVI. Se utilizaron un total de 214 imágenes, esto es, una imagen por mes para el periodo 2000-2017, las imágenes fueron recuperadas desde *Earthdata Search* (<https://search.earthdata.nasa.gov>, accedido en mayo, 2018).



*Figura 4: Imagen MODIS-2000049
Fuente: Elaboración propia.*

4.3. Estaciones GPS

En el área de estudio se encuentran 29 estaciones GPS, luego de analizar las series temporales de cada una de las estaciones, se filtraron las estaciones que cumplieran con poseer registros en el periodo 2010-2016, con máximo un mes sin información durante este periodo. Obteniendo un total de 7 estaciones que cumplieran con estas condiciones, para poder ampliar la cobertura espacial de las estaciones, se decidió incluir aquellas estaciones que tuviesen datos en el periodo 2012-2015, manteniendo la condición de que como máximo tuviesen un mes sin información. Así, finalmente se definieron un total de 10 estaciones GPS presentes en el área de estudio. Las series temporales de estos receptores fueron recuperados desde el Nevada Geodetic Laboratory (NGL) (http://geodesy.unr.edu/NGLStationPages/gpsnetmap/GPSNetMap_MAG.html, accedido en Julio de 2018).

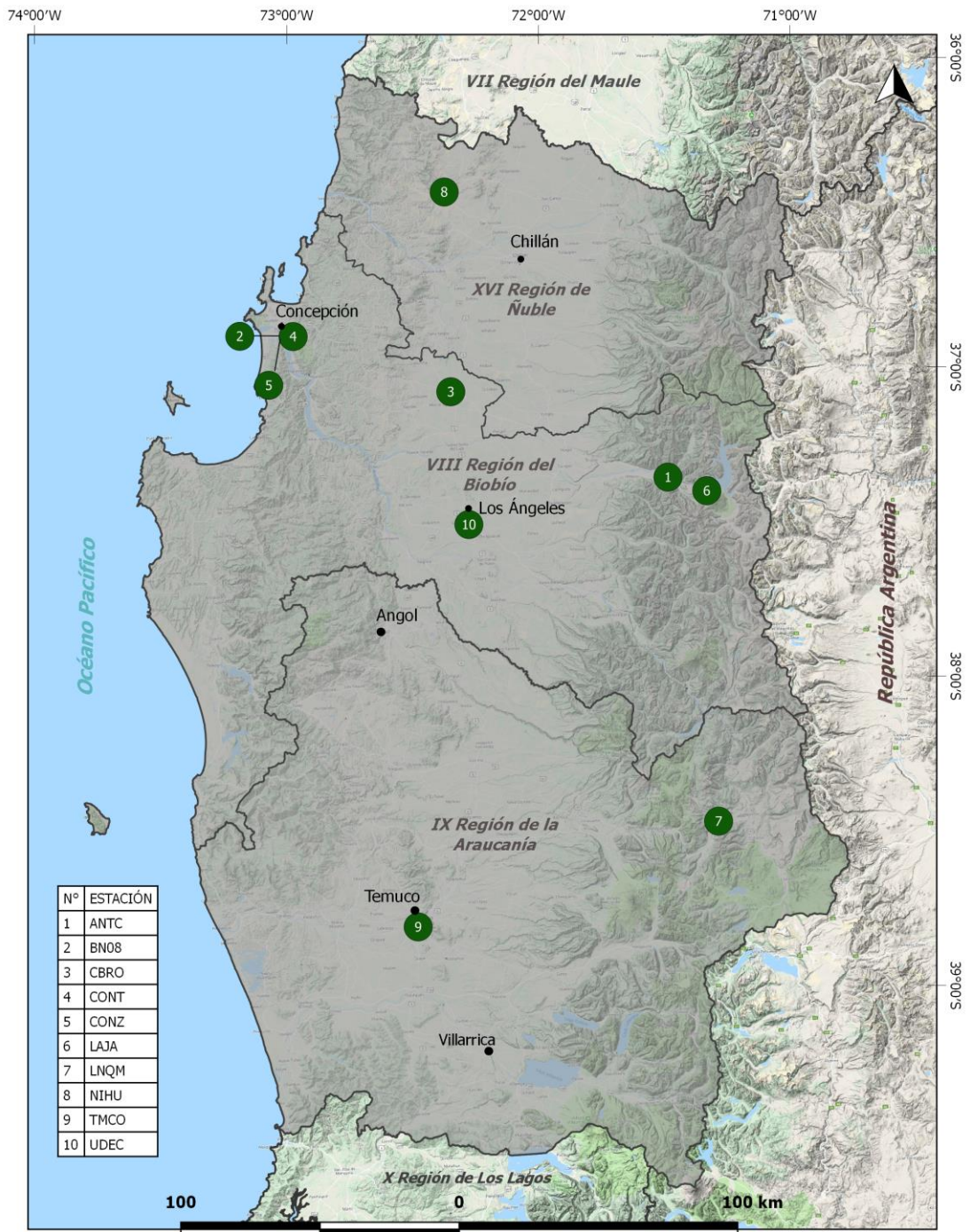


Figura 5: Mapa de ubicación estaciones GPS
Fuente: Elaboración propia.

4.4. El Niño-Southern Oscillation (ENSO) y Oscillation Niño Index (ONI)

ENSO es la interacción de un fenómeno oceánico-atmosférico, que ocurre en la región del océano Pacífico tropical, aproximadamente cada 2 a 7 años, cuyo elemento central está relacionado a la variabilidad climática de corto plazo a través del globo y particularmente en el trópico (NOAA/CPC, 2015).

Este ciclo global tiene dos fases: En el océano se manifiesta como una oscilación de la temperatura superficial del mar entre una fase cálida ("El Niño") y una fase fría ("La Niña") a lo largo del Pacífico tropical, y en la atmósfera como una oscilación entre una fase negativa ("El Niño") y una fase positiva ("La Niña") de la Oscilación del Sur (SO).

Los parámetros que se ven influenciados por la presencia de estos eventos son:

- Intensidad y/o dirección de los vientos alisios y corrientes.
- Temperatura superficial del mar.
- Nivel del mar.
- Presión atmosférica superficial.
- Temperatura del aire.

Se han desarrollado diversos indicadores para la definición y el monitoreo de las condiciones de ENSO, como el Índice de Oscilación del Sur (SOI, Trenberth, 1984), el Índice de ENSO Multivariado (MEI, Wolter & Timlin, 1993) y el Índice Trans-Niño (Trenberth & Stepaniak, 2001). En este trabajo, se utilizó el *Oscillation Niño Index* (ONI), el cual ha sido evaluado para caracterización de sequías con resultados favorables (Terassi, Oliveira-júnior, Góis, & Galvani, 2018). Fue desarrollado y recomendado por el *Climate Prediction Center* (CPC) de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), para definir las condiciones de El Niño / La Niña (NOAA/CPC, 2015). Los efectos de El Niño y La Niña se clasifican (ver Tabla 6) como calientes (rojo) y fríos (azul) en función de un umbral de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ para ONI (ver Tabla 5), aplicando la media de 3 meses consecutivos de anomalías de la Temperatura de la Superficie del mar (TSM) del Pacífico ecuatorial en la región del Niño 3.4 (5°N - 5°S , 120°W - 170°W) (ver Figura 6).

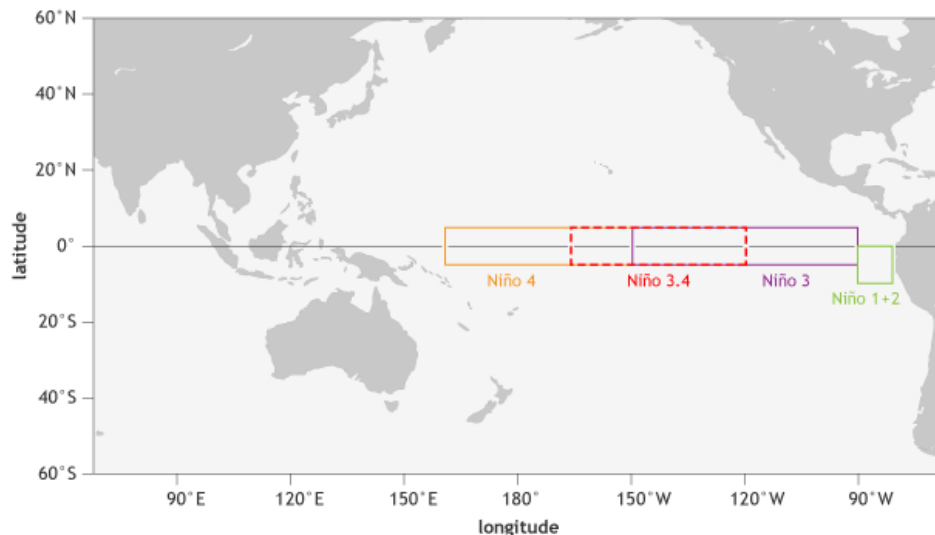


Figura 6: Regiones del Niño. Fuente: NOAA Climate.gov por Fiona Martin.

Según la metodología propuesta por Terassi, Oliveira-júnior, Góis, & Galvani (2018), el índice ONI, se puede clasificar como sigue:

Categoría	Escala ONI
El Niño Fuerte	≥ 1.7
El Niño Moderado	0.9 a 1.69
El Niño Débil	0.5 a 0.89
Neutro	0.49 a -0.49
La Niña Débil	-0.49 a -1.49
La Niña Moderada	-1.49 a -1.69
La Niña Fuerte	≤ -1.70

Tabla 5: Clasificación del Índice ONI.

Se recopilaron los datos para el periodo 2010-2016 del índice ONI v5 proporcionado por CPC/NOAA (http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php, accedido en Octubre del 2018).

Año	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2010	1.5	1.3	0.9	0.4	-0.1	-0.6	-1.0	-1.4	-1.6	-1.7	-1.7	-1.6
2011	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.7	-0.9	-1.1	-1.1	-1.0
2012	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2	0.0	-0.2
2013	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.2	0.1	0.0	0.2	0.4	0.6	0.7
2015	0.6	0.6	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.5	2.6
2016	2.5	2.2	1.7	1.0	0.5	0.0	-0.3	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6

Tabla 6: Datos ONI. Años y meses de ocurrencia de El Niño en rojo, La Niña en azul, y Neutro en negro entre 2010-2016.

5. Métodos

5.1. Índice SPI

El cálculo de SPI se realizó con del software *SPI Generator* versión 1.7.1 del 06-09-2018, desarrollado y recomendado por el *World Meteorological Organization* (WMO). El SPI se calcula a partir del registro histórico de precipitación en una estación pluviométrica, donde la acumulación de precipitación durante un período de tiempo se compara con el mismo período de tiempo a lo largo del registro histórico en esa ubicación. El SPI para cualquier valor de acumulación de precipitación representa la probabilidad de que la ubicación haya recibido al menos la cantidad observada de precipitación durante el período de tiempo.

El SPI calculado en este programa se basa en representar el registro histórico de precipitación con una distribución Gamma. Los valores SPI positivos representan condiciones húmedas y, cuanto más alto es el SPI, más inusualmente húmedo es un período de tiempo. Los valores negativos de SPI representan condiciones secas y, cuanto más bajo es el SPI, más inusualmente seco es un período de tiempo. El SPI fue calculado en 4 escalas de tiempo diferente, 1 mes (SPI-1), 3 meses (SPI-3), 6 meses (SPI-6) y para 12 meses (SPI-12).

5.2. Índice VCI

El cálculo del índice VCI se realizó mediante la implementación de la ecuación 1 en el *software* Matlab R2015a, para el conjunto de 214 imágenes MODIS. El proceso de calcular el índice para cada píxel de cada una de las imágenes, fue considerablemente robusto, por lo que se optó por recuperar únicamente los píxeles donde se ubicaran las estaciones, tanto pluviométricas como GPS. Este proceso de extracción para cada estación fue realizado mediante la implementación del *software* ArcMap 10.3 con la herramienta *Extract Multi Values to Points*. Obtenido como resultado la serie temporal del valor mensual de NDVI para cada una de las 62 estaciones en el periodo 2000 – 2017, posteriormente se realizó el cálculo del VCI para cada estación durante los 17 años.

5.3. Índice DI_{GPS}

Las series temporales GPS registran una gran cantidad de efectos geofísicos y/o sistemáticos, los cuales necesitan ser modelados y removidos de las series temporales para poder calcular el índice DI_{GPS} . Las series temporales GPS sin saltos ni datos atípicos, fueron facilitadas por el docente Dr. Henry Montecino y el colaborador académico Octavio Robles, de la Universidad de Concepción. Estas series fueron procesadas con el software HECTOR 1.6. La tendencia lineal de la serie temporal GPS y el cálculo del índice de sequía DI_{GPS} (Ecuación 6) fue realizado mediante la implementación de un *script* en el *software* Matlab R2015a (ver Script Principal, pág.56)

HECTOR es un software para analizar series temporales, desarrollado por Machiel Bos y Ruiz Fernandez (Portugal), está escrito en el lenguaje C++. Incluye principalmente los siguientes 5 paquetes (Bos, Fernandes, William, & Bastos, 2013):

1. Estimattrend – Programa principal para estimar la tendencia lineal.
2. Estimatespectrum – Programa para estimar densidad espectral potencial de un conjunto de datos o residuales, usando el método de periodogramas de Welch.
3. Modelspectrum – Programa para calcular la densidad espectral potencial para un rango de frecuencias, con un modelo de ruido ingresado y los parámetros de ruido.
4. Removeoutliers – Programa para encontrar los saltos y remover datos atípicos de un conjunto de datos.
5. Simulatenoise – Archivos de modelos ruido sintéticos.

En la Figura 7, se muestran las series temporales GPS de la componente Up resultantes. Se puede apreciar la sensibilidad de GPS a los ciclos estacionales, donde los colores amarillo-rojo muestran estaciones principalmente cálidas y los colores celeste-azul muestran estaciones lluviosas. Los tonos cercanos a verdes muestran, puntos de equilibrio entre invierno y verano, sin embargo, la presencia de color verde en periodos continuos significa una ausencia de datos, como por ejemplo la estación BN08 en el periodo 2010-2011 no se presenta registros.

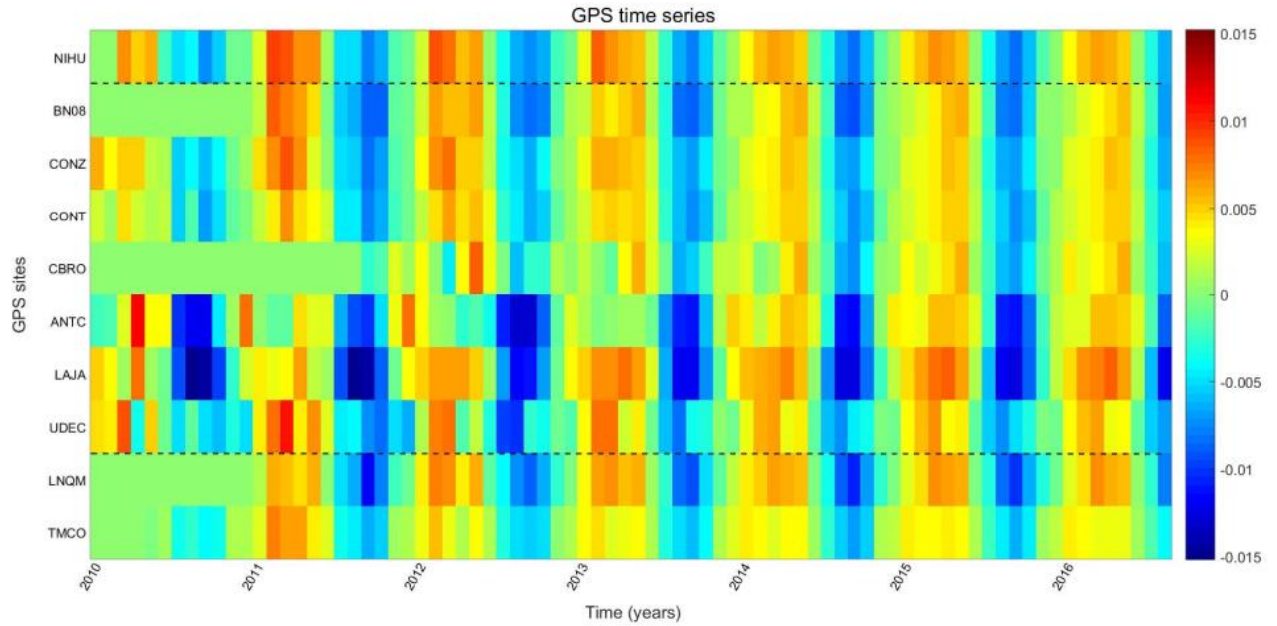


Figura 7: Mapa de Calor Series Temporales GPS facilitadas por docentes de la Universidad.

5.4. Correlación de Pearson

El índice DI_{GPS} y las series temporales, fueron correlacionadas con el Índice ONI mediante el Coeficiente de Correlación de Pearson, el cual proporciona una medida de la asociación lineal entre dos variables. Este coeficiente se calcula de la siguiente manera:

$$\rho(A, B) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{A_i - \mu_A}{\sigma_A} \right) \left(\frac{B_i - \mu_B}{\sigma_B} \right) \quad (7)$$

Dónde, μ_A y σ_A son la media y la desviación estándar de la variable A, y μ_B y σ_B son la media y la desviación estándar de la variable B. También, se puede definir el coeficiente de correlación en términos de la covarianza de A y B:

$$\rho(A, B) = \frac{cov(A, B)}{\sigma_A \sigma_B} \quad (8)$$

El valor de la correlación de Pearson oscila en el intervalo $[-1, 1]$, siendo 1 el máximo de correlación positiva y -1 el máximo de correlación negativa. Una correlación igual a 0, significa que los datos no presentan correlación entre sí.

Debido a que la mayoría de los tamaños de muestra son $n > 20$, las tasas de error Tipo I y Tipo II se redujeron al mínimo al transformar los datos a una forma normal antes de evaluar la correlación de Pearson (Bishara & Hittner, 2012). El error de tipo I se comete cuando la hipótesis nula es verdadera y, como consecuencia del contraste, se rechaza. El error de tipo II se comete cuando la hipótesis nula es falsa y, como consecuencia del contraste se acepta.

Los coeficientes resultantes fueron graficados en un Diagrama de Taylor (ver Figura 15), el cual facilita la evaluación comparativa de diferentes modelos. Este diagrama es utilizado para cuantificar el grado de correspondencia entre el comportamiento modelado y observado en términos de tres estadísticas: el coeficiente de correlación de Pearson, el Radio de Error Cuadrático Medio (RMSE) y la Desviación Estándar.



6. Resultados

6.1. Índice SPI

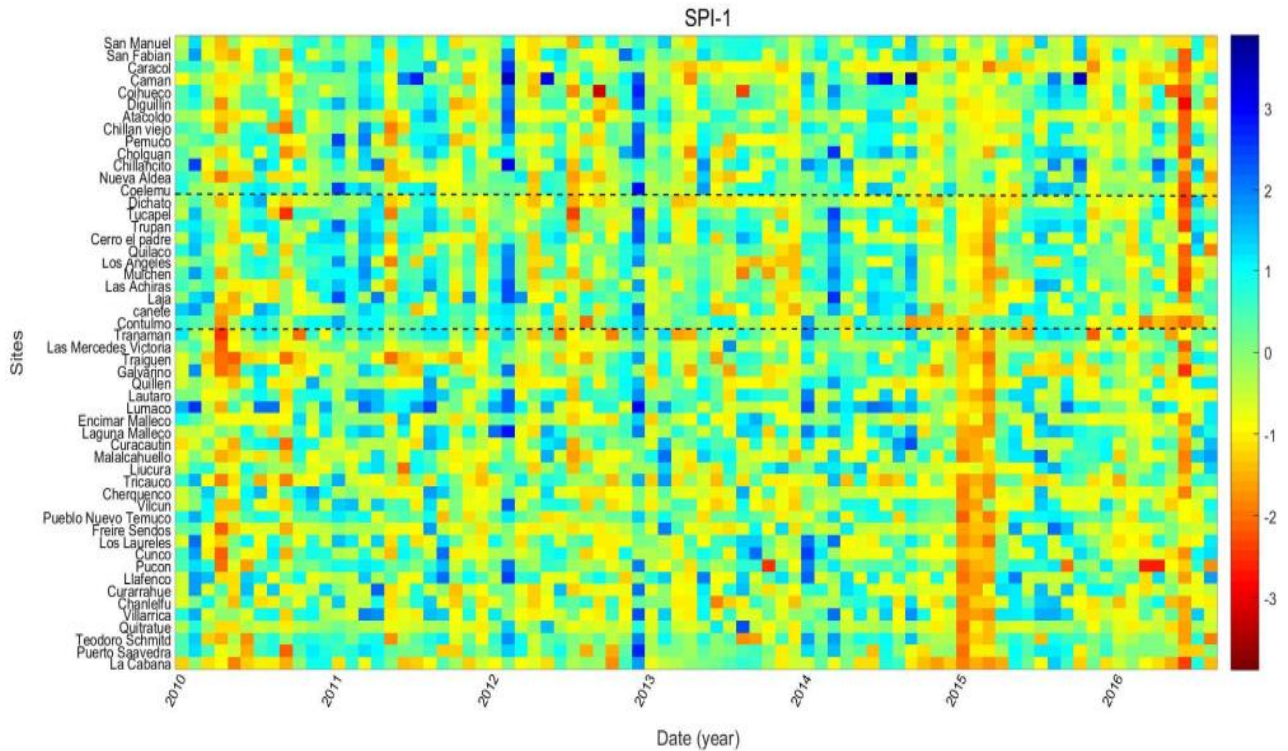


Figura 8: Mapa de Calor - Resultado índice SPI-1

El índice SPI-1 muestra que, a partir del año 2010, una extensa sequía de carácter meteorológico fue detectada en la región de estudio, por las diversas estaciones obstaculizando visualizar la estacionalidad invierno-verano de las mismas. Esta sequía presenta características de ser de una intensidad leve, siendo su etapa más extensa y marcada los primeros cuatro meses del año 2015. Esta última sequía mencionada se intensifica de norte a sur.

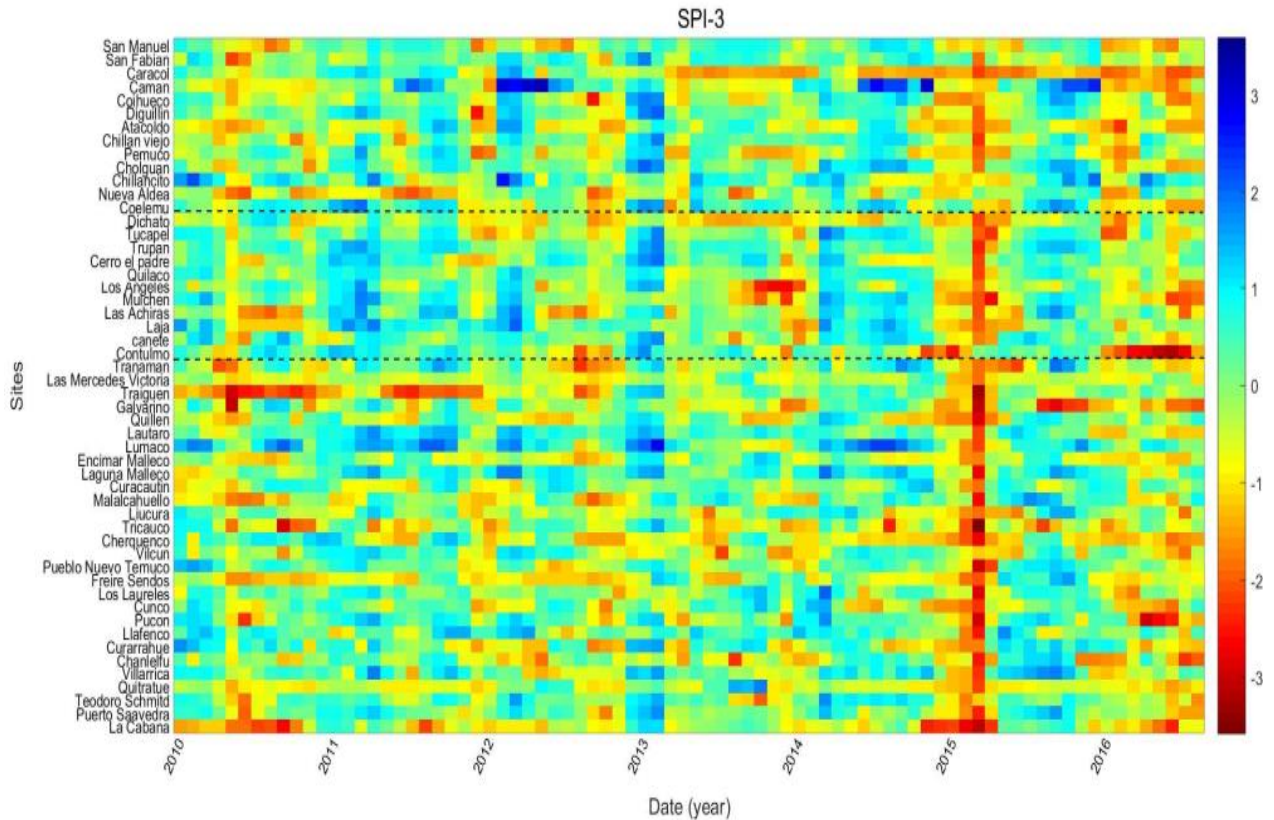


Figura 9: Mapa de Calor - Resultado Índice SPI-3.

El índice SPI-3 muestra que hubo momentos de la sequía severa detectadas por las estaciones Lumaco, Las Mercedes Victoria, Llafenco, Tricauco y Encimar Malleco durante el año 2010, además de una serie de eventos aislados de sequías de tipo moderadas. Finalmente, este índice corrobora que el punto más severo de la sequía ocurrió entre finales del año 2014 y comienzo del año 2015, con valores de SPI entre -1.7 y -3.58, dónde el valor más bajo de SPI fue registrado por la Estación Contulmo en marzo con un valor de -3.58. Esta sequía se intensifica de norte a sur, siendo mucho más severa en la región de la Araucanía y menos severa en la región de Ñuble.

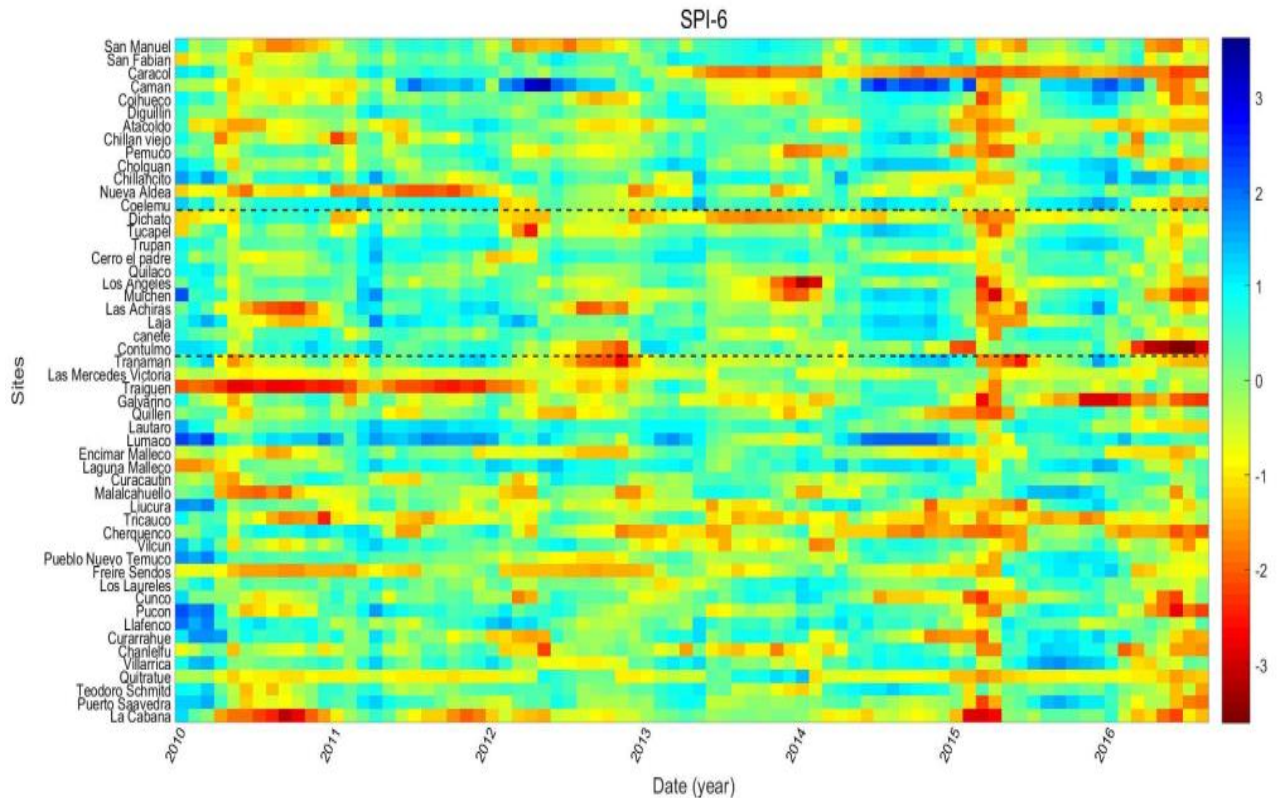


Figura 10: Mapa de Calor - Resultado Índice SPI-6.

El índice SPI-6 se encuentra relacionado con las sequías de tipo hidrológico y con sequías de tipo agrícola (McKee et al., 1993), los resultados de este índice indican que durante los años 2010-2015, ocurrieron algunos eventos de sequías de este tipo hasta mediados del 2015, dónde la sequía llega a su más severo punto. El valor de SPI más bajo fue registrado por la estación Los Ángeles en enero del año 2014 con un valor de -3.26. El comportamiento de las sequías con este índice se desarrolla de forma regular a lo largo del área de estudio, siendo visiblemente más intensa entre las regiones Biobío y la Araucanía.

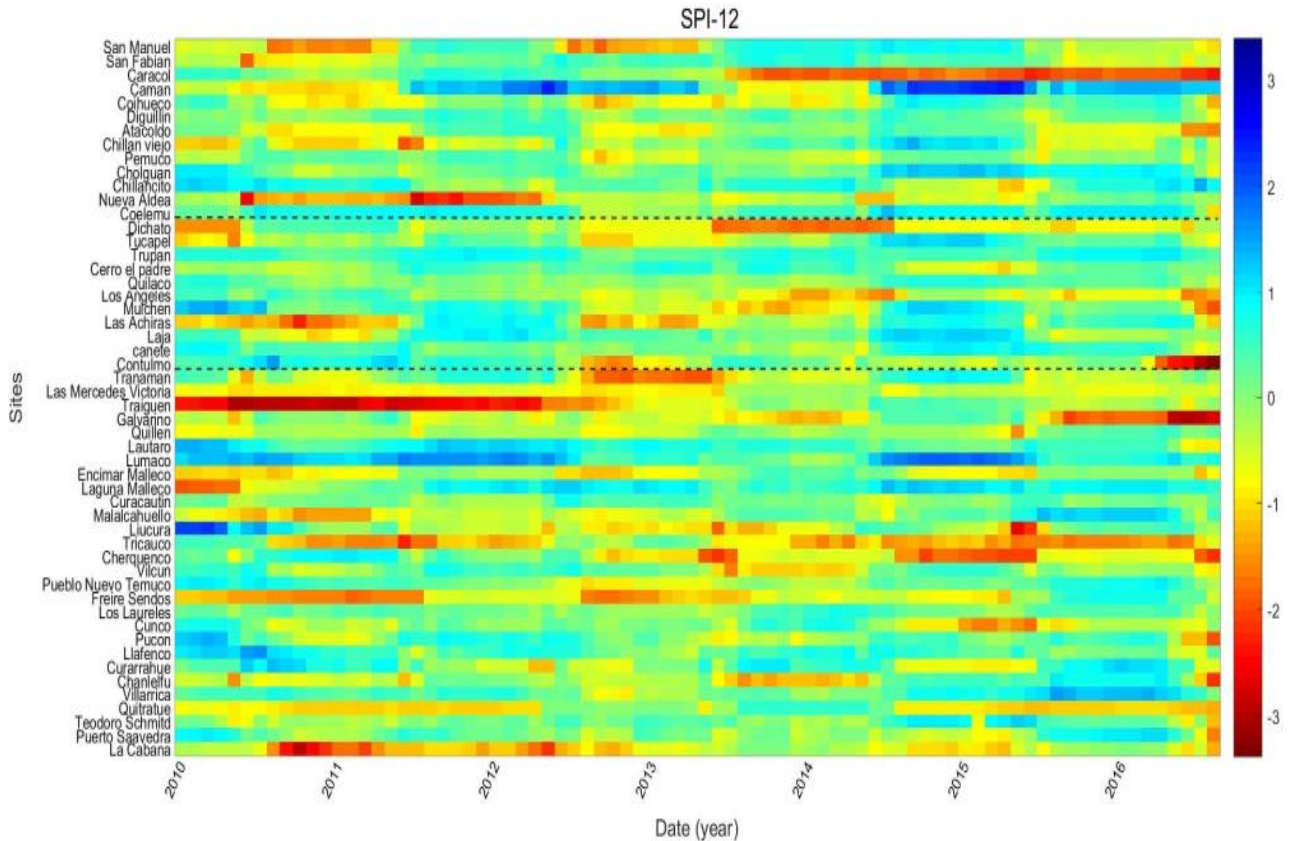


Figura 11: Mapa de Calor - Resultado Índice SPI-12.

El índice SPI-12 está relacionado con eventos sequías de carácter hidrológico más severos (McKee et al., 1993). Dentro del área de estudio, estos eventos son intermitentes y no son registrados por todas de las estaciones, se puede apreciar que la estación más afectada fue la estación Encimar Malleco con valores entre 1.4 y 3.57 en el periodo 2010-2013.

Los resultados obtenidos mediante el Índice SPI en sus diferentes escalas, muestran que durante el periodo 2010-2015, las regiones del Ñuble, del Biobío y la Araucanía fueron afectadas por sequías de carácter meteorológico de intensidad leve y moderada, destacando un evento importante a principio del año 2015, esto concuerda con el estudio realizado por Garreaud et al., (2017) sobre la mega sequía 2010-2015 en la región Central de Chile.

6.2. Índice VCI

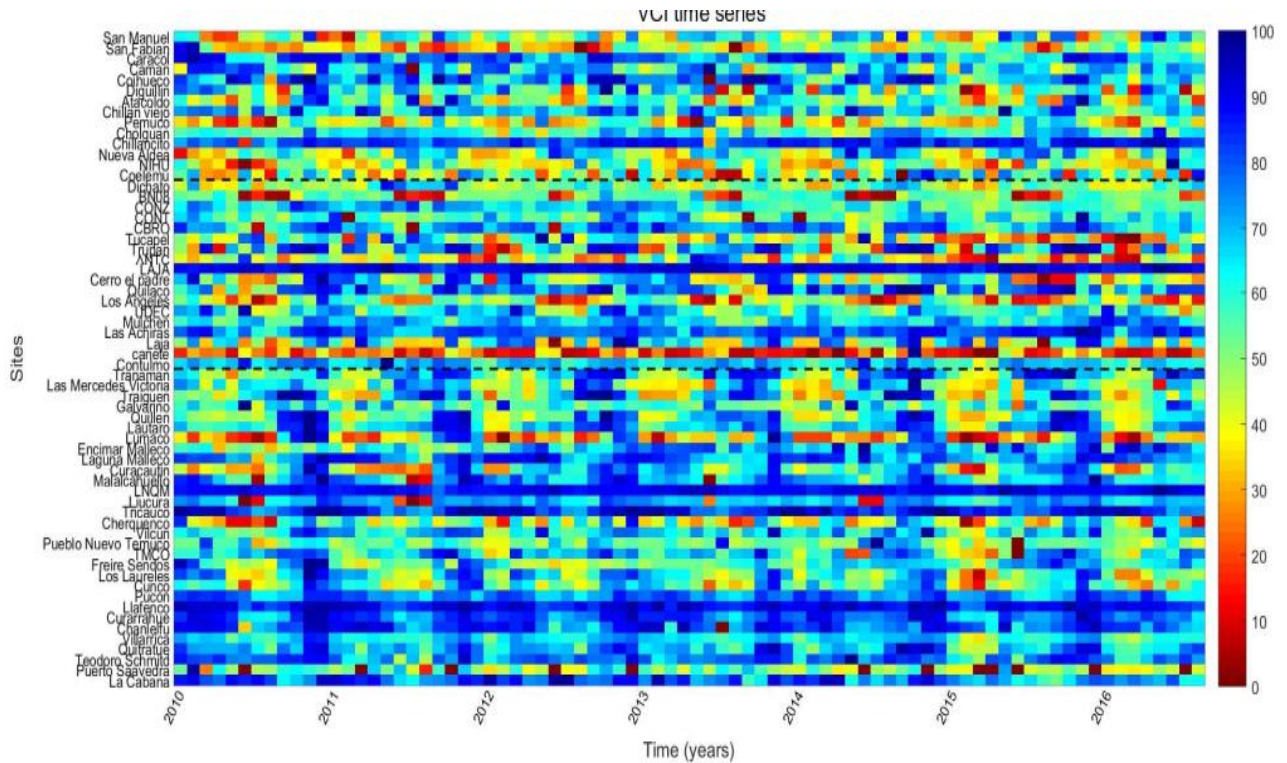


Figura 12. Mapa de calor - Resultado Índice VCI.

El índice VCI, es ampliamente utilizado para sequías de carácter agrícola (Hazaymeh, 2016; Quiring & Ganesh, 2010; Zambrano et al., 2016). Los registros obtenidos mediante este índice muestran sequías agrícolas de mediana intensidad no uniformes en el área de estudio durante el periodo 2010-2014, sin embargo, se aprecia una sequía de carácter agrícola importante entre finales del año 2014 y mediados del año 2015, lo cual es consistente con el estudio realizado por Zambrano et al., (2016) en la Región del Biobío.

6.3. Índice DIGPS

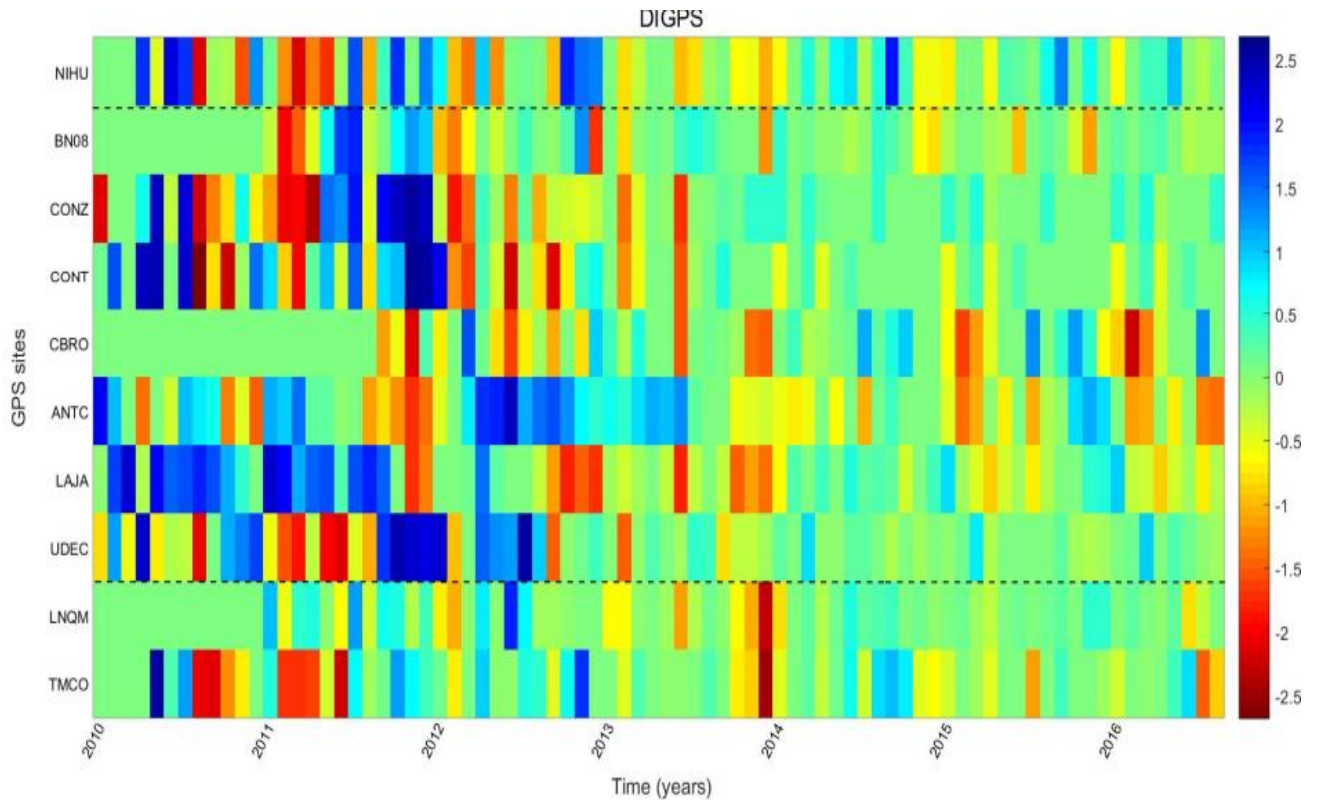
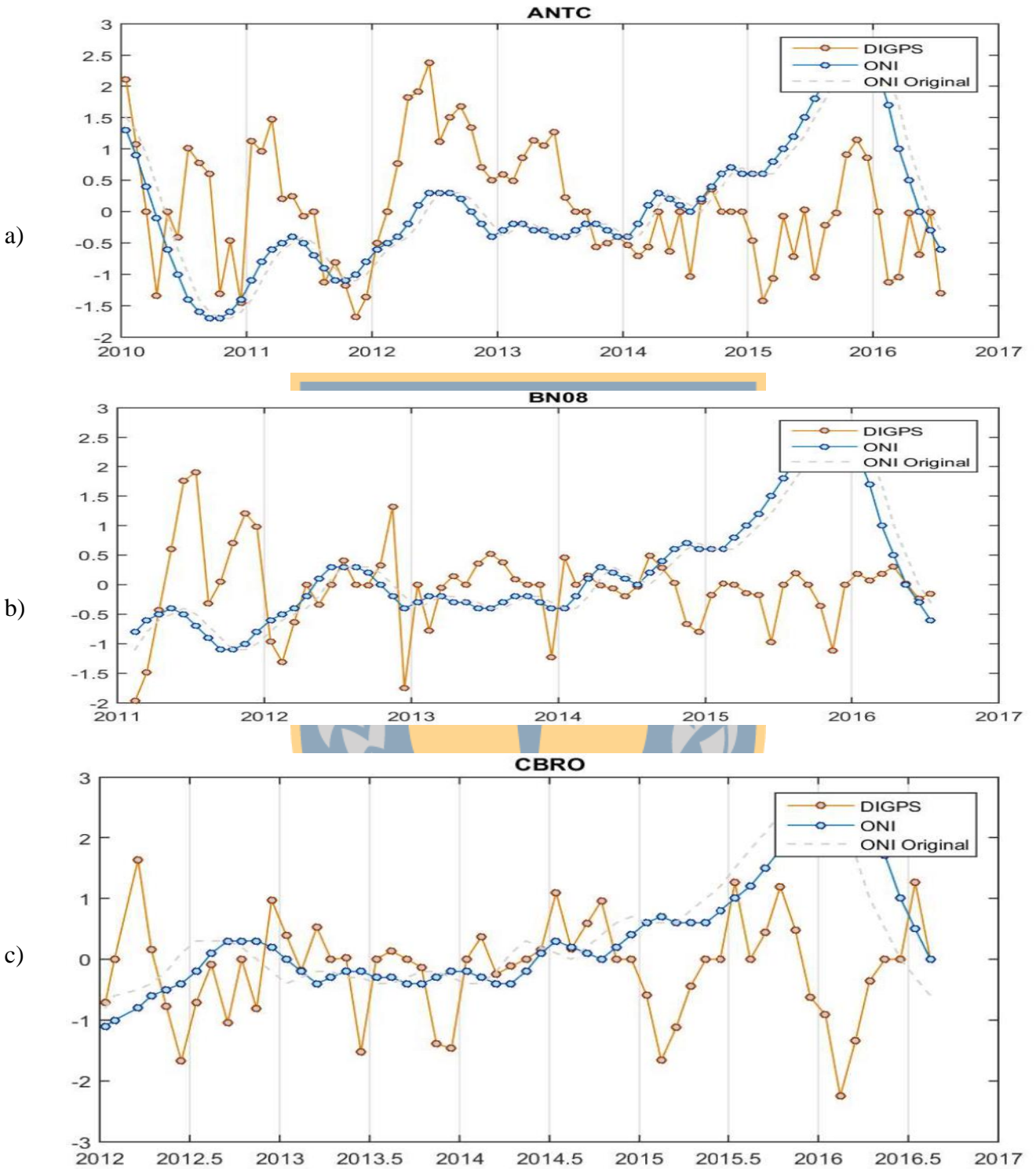
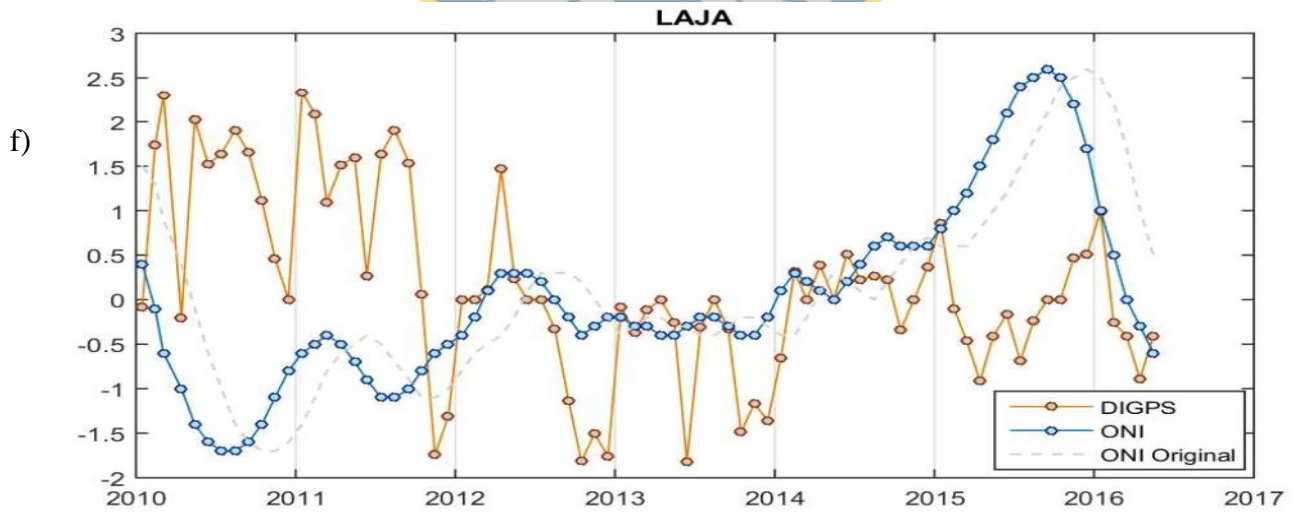
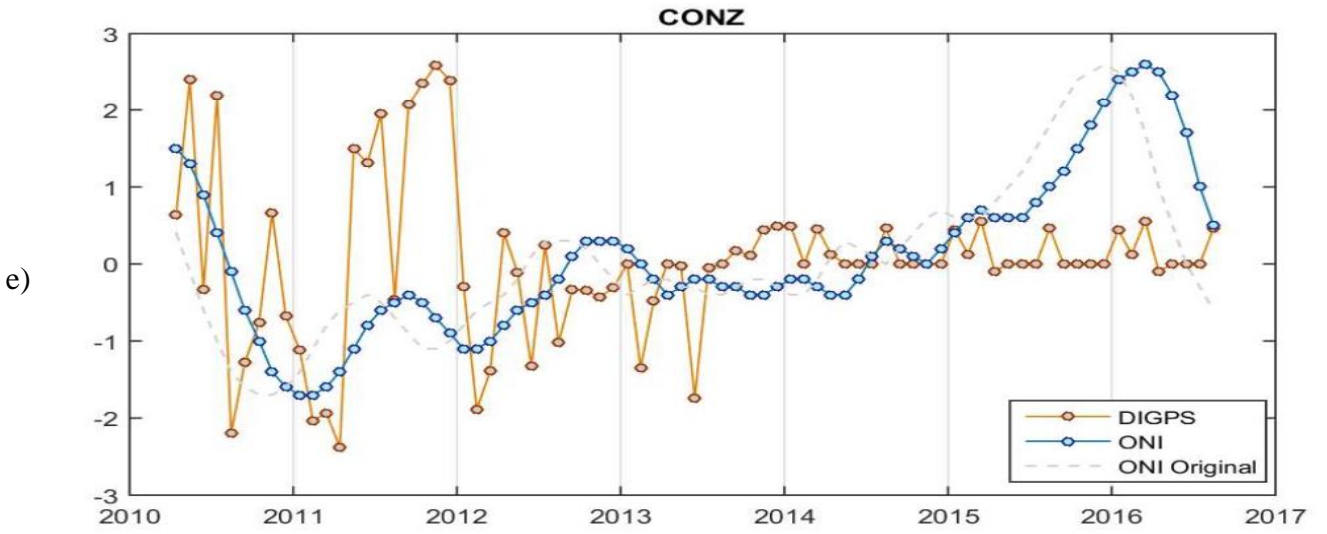
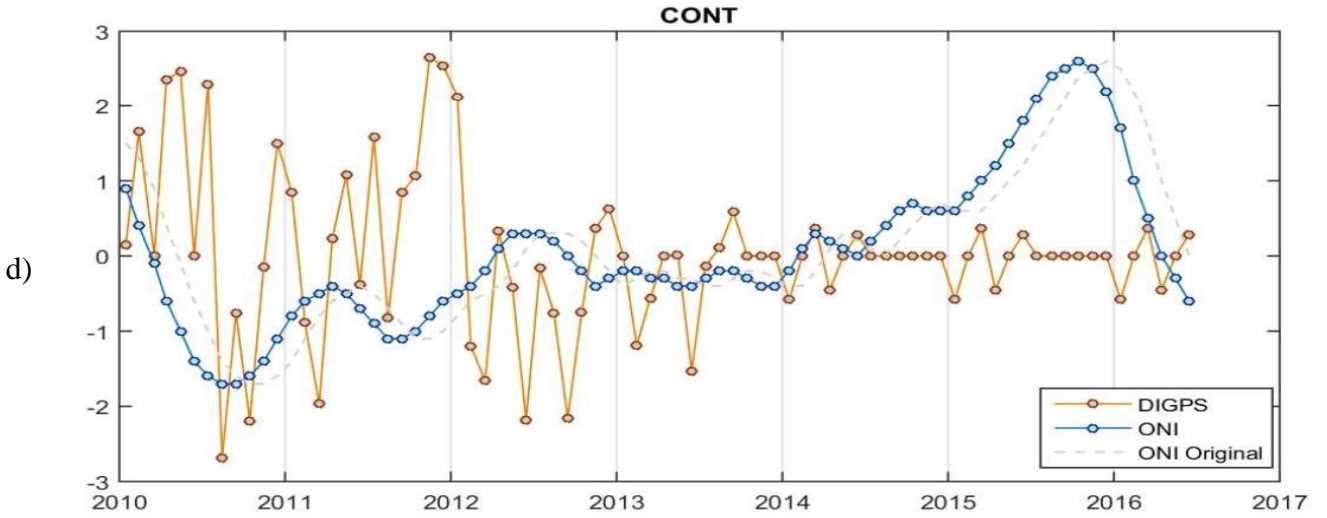


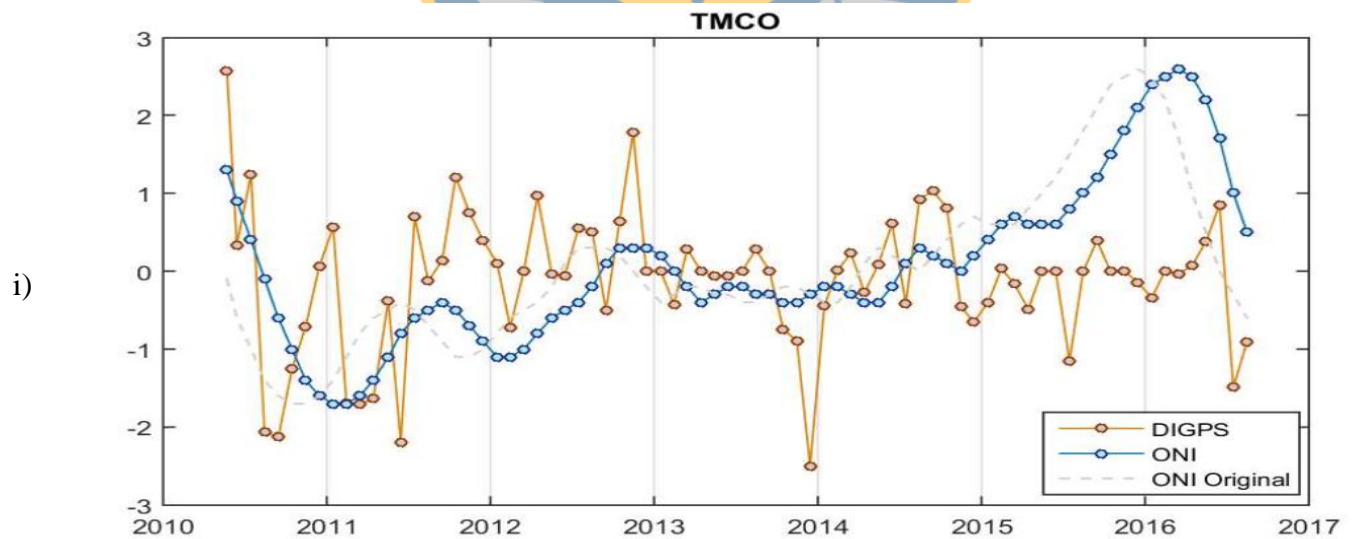
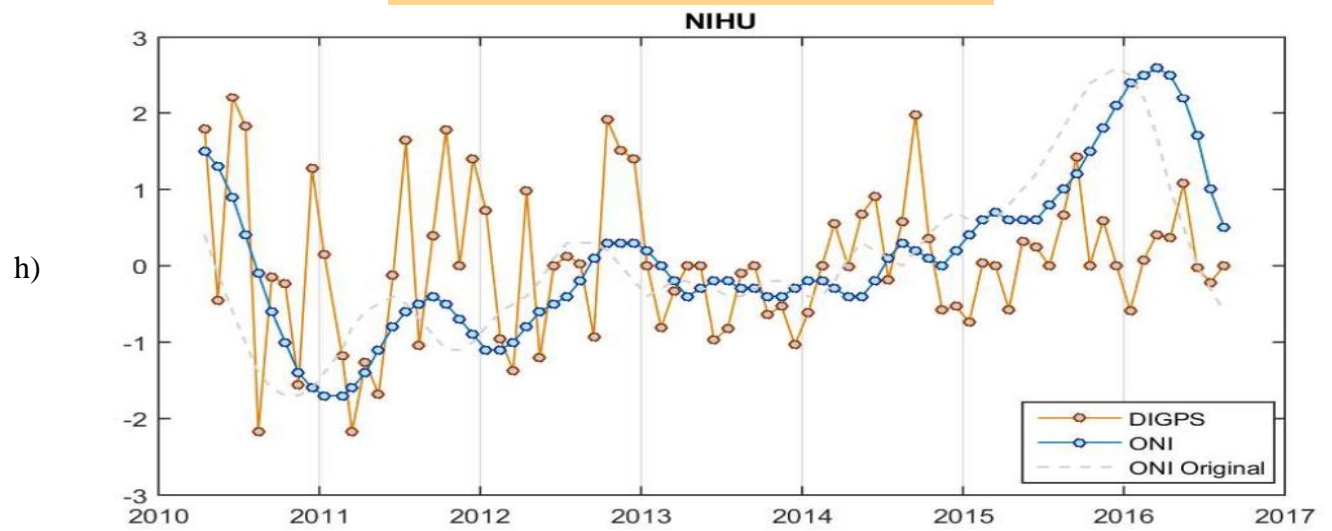
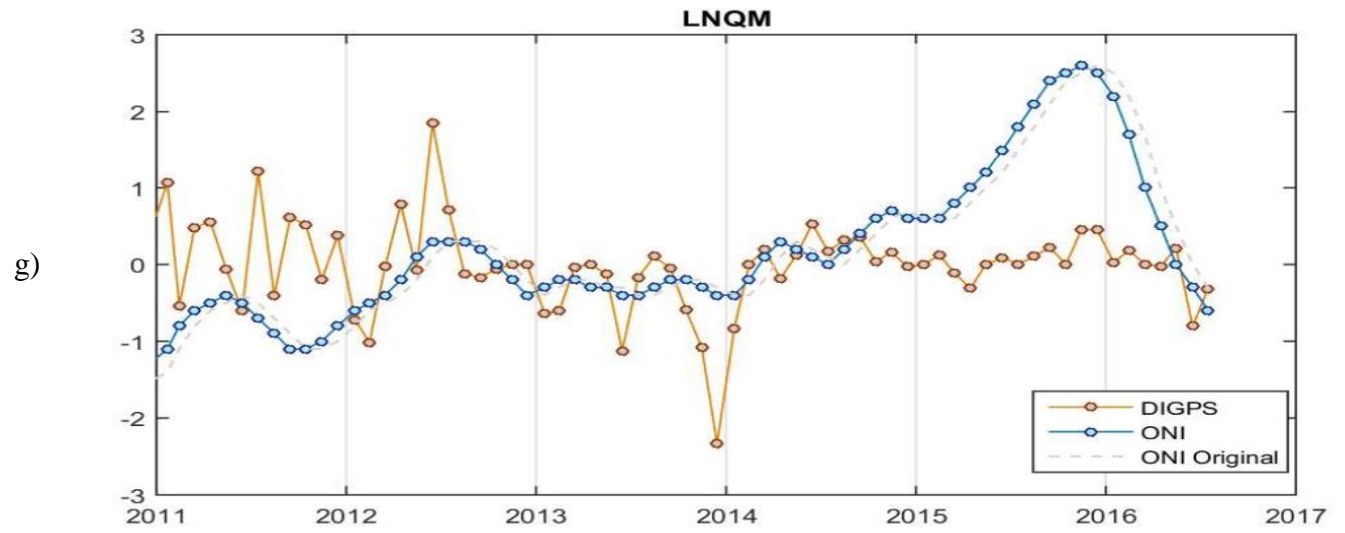
Figura 13: Mapa de Calor - Resultado Índice DIGPS.

Por otro lado, GPS (Figura 7) muestra una significativa reacción ante eventos estaciones, dentro del registro obtenido se observan eventos importantes de deficiencia de agua a comienzos del año 2011 y entre los años 2014-2015, dónde el verano es más prolongado e intenso que en otros años. El índice DI_{GPS} muestra un evento importante en el año 2011 y entre finales del año 2013 y comienzo del 2014, detectado por gran parte de las estaciones GPS, tales como UDEC, TMCO, NIHU y CONZ.

6.4. Correlación de variables







j)

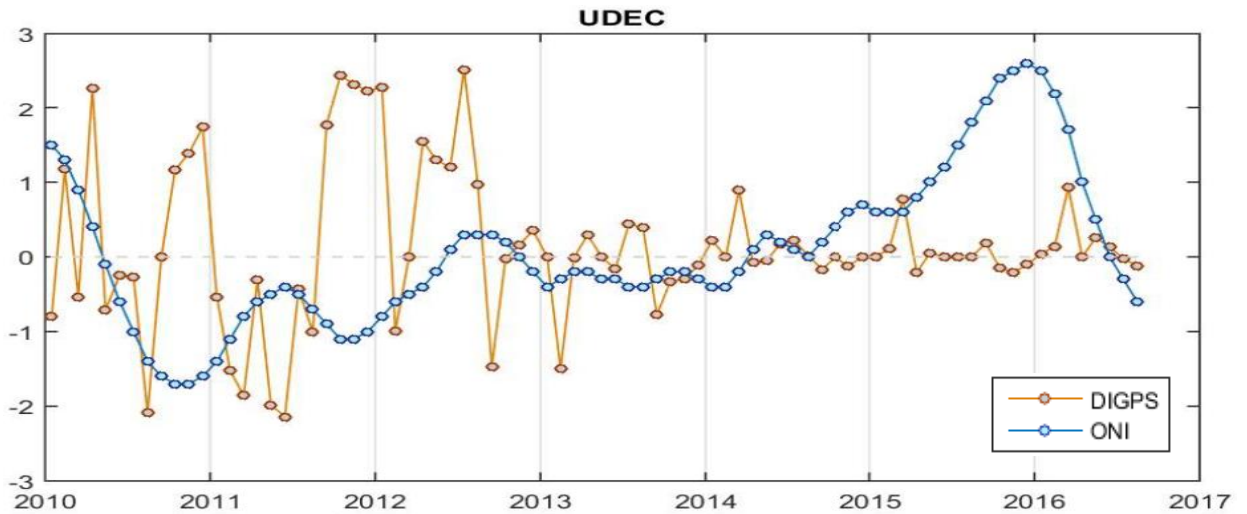


Figura 14: (a-f) Gráficos de DIGPS vs. ONI

La Figura 14 muestra las series temporales del Índice DIGPS y el Índice ONI, correlacionado de forma desfasada entre 0 a 3 meses, para conseguir una mejor correlación entre ambos índices. A continuación, se presenta una tabla resumen de los estadísticos obtenidos.

Letra	Variable	SD	RMS	ρ	Desfase (meses)	SD2	RMS2	ρ^2	Δ SD	Δ ARMS	$\Delta\rho$
A	ONI	1,008	0,000	1,000	0	1,0079	0	1	0,000	0,000	0,000
B	ANTC	0,942	1,312	0,096	-1	0,9843	1,3286	0,1148	-0,042	-0,017	-0,019
C	BN08	0,628	1,215	-0,053	1	0,816	1,3646	-0,1114	-0,188	-0,149	0,059
D	CRBO	0,721	1,265	-0,044	-2	0,7016	1,3053	-0,1442	0,020	-0,040	0,100
E	CONT	1,041	1,463	-0,020	2	1,044	1,5027	-0,0722	-0,003	-0,039	0,052
F	CONZ	1,035	1,430	0,020	3	1,0349	1,2942	0,2016	0,000	0,136	-0,182
G	LAJA	1,010	1,548	-0,177	-3	0,9884	1,6033	-0,2873	0,021	-0,055	0,110
H	LNQM	0,534	1,092	0,100	1	0,5829	1,0817	0,1513	-0,049	0,010	-0,051
I	NIHU	0,944	1,284	0,136	3	0,9627	1,1899	0,2833	-0,018	0,094	-0,147
J	TMCO	0,855	1,226	0,141	3	0,8687	1,2887	0,0709	-0,014	-0,062	0,070
K	UDEC	1,001	1,467	-0,066	0	1,0015	1,4672	0,0663	0,000	0,000	-0,133

Tabla 7: Resultados estadísticos para diagrama de Taylor.

En la Tabla 7 se presenta los resultados estadísticos obtenidos aplicando una correlación normal y la desfasada. Dónde A es el valor observado y el cual es contrastado con el índice calculado para cada una de las diferentes estaciones GPS. RMS es el error medio cuadrático, SD es la desviación estándar de los datos y ρ es el coeficiente de Pearson. Para el diagrama de Taylor se usaron los Valores SD2, RMS2 y ρ^2 .

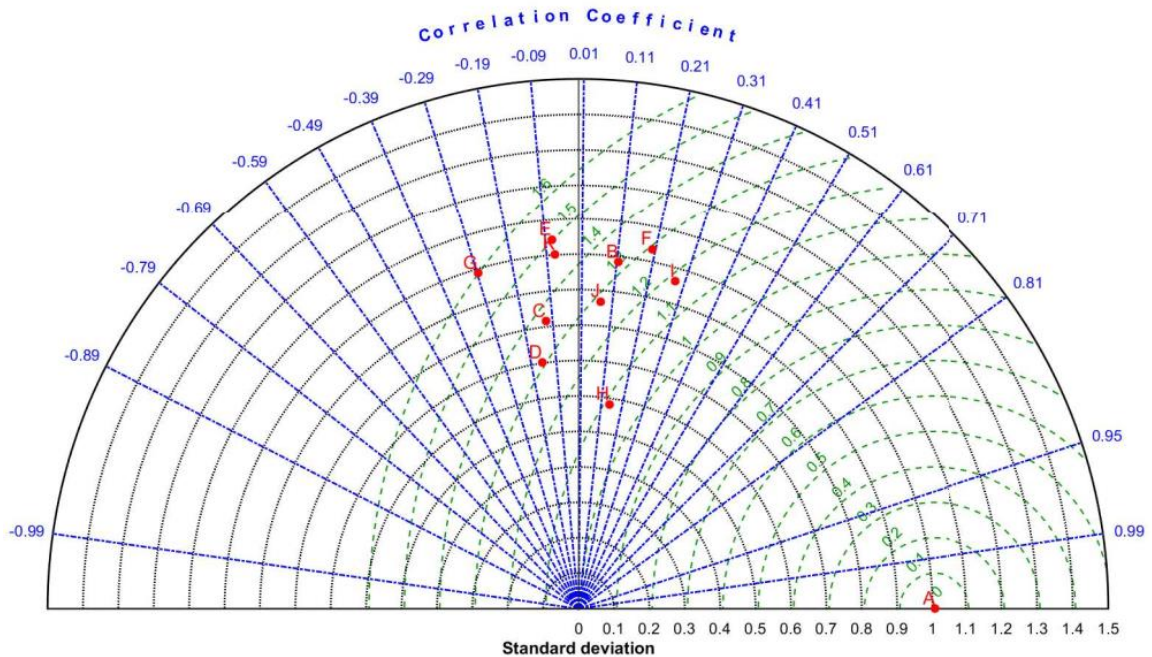


Figura 15: Diagrama de Taylor de las series GPS.

El Diagrama de Taylor muestra que la estación LNQM (I), CONZ(F) y NIHU (H) son las que mejor correlación presentan con relación al Índice ONI. Si bien las correlaciones no son altas, se puede apreciar una tendencia de GPS ante la ocurrencia del fenómeno del ENSO.

Los eventos de sequías registrados por estas técnicas en el periodo 2010-2015 se encuentran estrechamente relacionados con los eventos ENSO, representados por el índice ONI. Se puede observar que las sequías comienzan en un periodo del Niño, en el año 2010 (Tabla 6), para posteriormente dar paso a un lento fenómeno de la Niña y, a finales del año 2014, se reanuda el evento Niño. Si bien, todos los índices fueron afectados por ENSO, GPS muestra una alta sensibilidad frente a eventos climáticos estacionales, a pesar de no poseer una alta correlación con el índice ONI, sigue una tendencia similar (Figura 14), por lo cual es posible relacionar, mediante el índice DI_{GPS} , sequías de carácter hidrológico en la región de estudio a principios del año 2014, además de otros eventos aislados ocurridos entre los años 2010-2015, relacionados con la deficiencia de agua.

7. Conclusiones y discusiones

Las sequías son un fenómeno recurrente en Chile, se presentan diferentes escalas de éstas dentro del registro histórico del país. Este fenómeno influye negativamente en el desarrollo económico de la zona central del país, cuya producción se basa principalmente actividades agropecuarias. Una alerta temprana de sequía podría mejorar el manejo y respuesta de las comunidades afectadas frente a este fenómeno. La sequía meteorológica más extensa que ha sido registrada, tuvo lugar entre los años 2010-2015 detectada mediante estaciones pluviométricas, esta sequía dio paso a otros eventos importantes como la sequía agrícola de los años 2014-2015, detectada mediante percepción remota y, la sequía hidrológica detectada a principios del año 2014 mediante GPS.

Los resultados de este estudio indican que la componente Up de GPS es sensible a los cambios climáticos estacionales, y en parte, a la variabilidad climática producida por ENSO. GPS es capaz de detectar deficiencia en el almacenamiento de agua terrestre mediante el tratamiento apropiado de los datos derivados de ésta.

Las principales dificultades del uso de esta técnica basada en observaciones GPS es la complejidad del tratamiento de la serie temporal, ya que la componente Up detecta variaciones en la corteza de carácter milimétricas, es por esto que es indispensable hacer una amplia revisión de los posibles efectos que pudiesen perturbar la señal registrada y así, evitar alterar el resultado final. Esto se puede ver reflejado en la estación LAJA, la cual se encuentra perturbada por efectos del afluente cercano a ella, lo cual genera ruido en la señal y dificulta ver sequías en esa área.

Otra dificultad del uso de GPS es la disponibilidad de datos y cobertura espacial funcional, ya que muchas de estas estaciones no presentan series de tiempo completas o se encuentran inactivas, esto limita la temporalidad de los estudios.

Los índices utilizados generaron resultados consistentes con estudios anteriores, por lo que se concluye que utilizar multitécnicas para detectar sequías en conjunto con GPS podría ser de gran utilidad en el control y detección temprana de sequías. Dentro del estudio se consideraron datos hasta finales del año 2016, lo cual deja una ventana abierta para futuras generaciones, ya que en dicho año se aprecia una sequía particularmente intensa, detectada en toda el área de estudio.



8. Referencias

- AghaKouchak, A., Farahmand, A., Melton, F. S., Teixeira, J., Anderson, M. C., Wardlow, B. D., & Hain, C. R. (2015). Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities. *Reviews of Geophysics*.
<https://doi.org/10.1002/2014RG000456>. Received
- Alley, W. M. (1984). The Palmer Drought Severity Index: Limitations and Assumptions. *Journal of Climate and Applied Meteorology*. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<1100:TPDSIL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<1100:TPDSIL>2.0.CO;2)
- Báez, J. E., Fuchs, A., & Rodríguez-Castelán, C. (2017). ¿Desarrollo Económico Inestable? Choques Agregados en América Latina y el Caribe, 92.
- Bąk, B., & Kubiak-Wójcicka, K. (2014). Assessment of meteorological and hydrological drought in Torun (Central Poland town) in 1971-2010 based on standardized indicators. *3rd International Conference - Water Resources and Wetlands*, (2009), 164–170. Retrieved from <http://www.limnology.ro/wrw2016/proceedings.html>
- Barua, S., Muttill, N., Ng, A. W. M., & Perera, B. J. C. (2013). Rainfall trend and its implications for water resource management within the Yarra River catchment, Australia. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.9311>
- Bevis, M., & Brown, A. (2014). Trajectory models and reference frames for crustal motion geodesy. *Journal of Geodesy*, 88(3), 283–311.
<https://doi.org/10.1007/s00190-013-0685-5>
- Bishara, A. J., & Hittner, J. B. (2012). Testing the significance of a correlation with nonnormal data: Comparison of Pearson, Spearman, transformation, and resampling approaches. *Psychological Methods*. <https://doi.org/10.1037/a0028087>

- BNC. (2015). Clima y vegetación. Retrieved November 1, 2018, from <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/clima.htm>
- Borsa, A. A., Agnew, D. C., & Cayan, D. R. (2014). Ongoing drought-induced uplift in the western United States. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.1260279>
- Bos, M., Fernandes, R., William, S., & Bastos, L. (2013). Fast Error Analysis of Continuous GNSS Observations with Missing Data. *Journal of Geodesy*, 1–31. <https://doi.org/doi:10.1007/bf01227621>
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). (2015). *Informe a la Nación La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro*. Retrieved from www.cr2.cl/megasequia
- Chew, C. C., & Small, E. E. (2014). Terrestrial water storage response to the 2012 drought estimated from GPS vertical position anomalies. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1002/2014GL061206>
- Dai, A. (2011). Drought under global warming: A review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. <https://doi.org/10.1002/wcc.81>
- de Oliveira-Júnior, J. F., de Gois, G., de Bodas Terassi, P. M., da Silva Junior, C. A., Blanco, C. J. C., Sobral, B. S., & Gasparini, K. A. C. (2018). Drought severity based on the SPI index and its relation to the ENSO and PDO climatic variability modes in the regions North and Northwest of the State of Rio de Janeiro - Brazil. *Atmospheric Research*, 212(May), 91–105. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.04.022>
- FAO. (2017). Crop Prospects and Food Situation - No. 4 July 2007. *Global Cereal Production Brief, 2007*(September 18, 2007). <https://doi.org/I6903EN/1/03.17>
- Fernández, B. (1997). Identificación y caracterización de sequías hidrológicas en Chile

- central. *Ingeniería Del Agua*, 4(4). <https://doi.org/10.4995/ia.1997.2734>
- Ferreira, V. G., Montecino, H. C., Ndehedehe, C. E., Heck, B., Gong, Z., de Freitas, S. R. C., & Westerhaus, M. (2018). Space-based observations of crustal deflections for drought characterization in Brazil. *Science of the Total Environment*, 644, 256–273. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.277>
- Forkel, M., Carvalhais, N., Verbesselt, J., Mahecha, M. D., Neigh, C. S. R., & Reichstein, M. (2013). Trend Change detection in NDVI time series: Effects of inter-annual variability and methodology. *Remote Sensing*, 5(5), 2113–2144. <https://doi.org/10.3390/rs5052113>
- Frappart, F., & Ramillien, G. (2018). Monitoring groundwater storage changes using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite mission: A review. *Remote Sensing*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/rs10060829>
- Fu, Y., Argus, D. F., & Landerer, F. W. (2015). GPS as an independent measurement to estimate terrestrial water storage variations in Washington and Oregon. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. <https://doi.org/10.1002/2014JB011415>
- Garreaud, R., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., ... Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010-2015 mega drought in Central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. <https://doi.org/10.5194/hess-2017-191>
- Guttman, N. B. (1994). On the sensitivity of sample L moments to sample size. *Journal of Climate*. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1994\)007<1026:OTSOSL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1994)007<1026:OTSOSL>2.0.CO;2)
- Hazaymeh, K. (2016). Development of a Remote Sensing-Based Agriculture Monitoring Drought Index and Its Application Over Semi-Arid Region, 45–46.

- Karavitis, C. A., Alexandris, S., Tsesmelis, D. E., & Athanasopoulos, G. (2011). Application of the Standardized Precipitation Index (SPI) in Greece. *Water (Switzerland)*, 3(3), 787–805. <https://doi.org/10.3390/w3030787>
- Karnieli, A., Agam, N., Pinker, R. T., Anderson, M., Imhoff, M. L., Gutman, G. G., ... Goldberg, A. (2010). Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations. *Journal of Climate*. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2900.1>
- Ke, Y., Im, J., Lee, J., Gong, H., & Ryu, Y. (2015). Characteristics of Landsat 8 OLI-derived NDVI by comparison with multiple satellite sensors and in-situ observations. *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.04.004>
- Keyantash, J. A., & Dracup, J. A. (2004). An aggregate drought index: Assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/2003WR002610>
- Kogan, F. N. (1990). Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1080/01431169008955102>
- Liu, W. T., & Kogan, F. N. (1996). Monitoring regional drought using the vegetation condition index. *International Journal of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1080/01431169608949106>
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. <https://doi.org/citeulike-article-id:10490403>

- Meza, L., Corzo, S., & Soza, S. (2010). *Gestión del riesgo de sequía y otros eventos climatológicos extremos en Chile*. Retrieved from www.fao.org/docrep/019/as391s/as391s.pdf
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1–2), 202–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- Nalbantis, I. (2008). Evaluation of a Hydrological Drought Index. *European Water*. <https://doi.org/23/24>: 67-77, 2008
- NASA. (1987). *Space-Based Remote Sensing of the Earth A Report to the Congress*.
- NASA. (2010). 2010 Science Plan. *For NASA's Science Mission Directorate*, (July). Retrieved from <http://science.nasa.gov/about-us/science-strategy/>
- NOAA/CPC. (2015). National Oceanic and Atmospheric Administration/Climate Prediction Center.
- Organización Meteorológica Mundial. (2016). *Manual de indicadores e índices de sequía. Programa de gestión integrada de sequías*.
- Otun, J. A., & Adewumi, J. K. (2009). Using precipitation effectiveness variables in indexing drought in semi-arid regions. *Climate Research*, 5(14), 1784–1793. <https://doi.org/10.5897/AJAR09.076>
- Palmer, T. N., & C., W. (1965). Meteorological Drought. *U.S. Weather Bureau, Res. Pap. No. 45*. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9523.2006.00307.x>
- Peters, A. J., WalterShea, E. A., Lel JJ, A. V., Hayes, M., & Svoboda, M. D. (2002). Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. <https://doi.org/0099-1112/02/6800-07>

- Quiring, S. M., & Ganesh, S. (2010). Evaluating the utility of the Vegetation Condition Index (VCI) for monitoring meteorological drought in Texas. *Agricultural and Forest Meteorology*. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.11.015>
- Rhee, J., Im, J., & Carbone, G. J. (2010). Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.005>
- Shafer, B. A., & Dezman, L. E. (1982). Development of a surface water supply index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. *Western Snow Conference*. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.05.019>
- Terassi, P. M. de B., Oliveira-júnior, J. F. De, Góis, G. De, & Galvani, E. (2018). Variabilidade do Índice de Precipitação Padronizada na Região Norte do Estado do Paraná Associada aos Eventos de El Niño-Oscilação Sul Standardized Precipitation Index Variability in the Northern Region of Paraná State Associated with the El Niño - Southe. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 33, 11–25.
- Thomas, A., Reager, J., Famiglietti, J., & Rodell, M. (2014). A GRACE-based water storage deficit approach for hydrological drought characterization. *Kemppinen, J., P. Niittynen, H.K. Riihimäki & M. Luoto, (2017). Modelling Soil Moisture in a High-Latitude Landscape Using LiDAR and Soil Data. Earth Surface Processes and Landforms. Available at: Http://Doi.Wiley.Com/10.1002/Esp.4301. Le Roux, P.C., J. A, (May), 4068–4074. https://doi.org/10.1002/2014GL059980.*Received
- Thomas, B., Famiglietti, J., Landerer, F., Wiese, D., Molotch, N., & Argus, D. (2017). GRACE Groundwater Drought Index: Evaluation of California Central Valley groundwater drought. *Remote Sensing of Environment*.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.026>

Trenberth, K. E. (1984). Signal Versus Noise in the Southern Oscillation. *Monthly*

Weather Review. [https://doi.org/10.1175/1520-](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1984)112<0326:SVNITS>2.0.CO;2)

[0493\(1984\)112<0326:SVNITS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1984)112<0326:SVNITS>2.0.CO;2)

Trenberth, K. E., & Stepaniak, D. P. (2001). Indices of El Niño evolution. *Journal of*

Climate. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<1697:LIOENO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<1697:LIOENO>2.0.CO;2)

Wolter, K., & Timlin, M. S. (1993). Monitoring ENSO in COADS with a seasonally

adjusted principal component index. *Proceedings of the 17th Climate Diagnostics*

Workshop, Norman, OK, NOAA/NMC/CAC, NSSL, Oklahoma Clim. Survey, CIMMS and the School of Meteor., Univ. of Oklahoma.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.063>

Wu, H., Hayes, M. J., Weiss, A., & Hu, Q. (2001). An evolution of the standardized

precipitation index, the China-Z index and the statistical Z-score. *International Journal of Climatology*, 21(6), 745–758. <https://doi.org/10.1002/joc.658>

Zambrano, F., Lillo-Saavedra, M., Verbist, K., & Lagos, O. (2016). Sixteen years of

agricultural drought assessment of the biobío region in Chile using a 250 m resolution vegetation condition index (VCI). *Remote Sensing*, 8(6), 1–20.

<https://doi.org/10.3390/rs8060530>

Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B., & Khan, F. I. (2011). A review of drought indices.

Environmental Reviews. <https://doi.org/10.1139/a11-013>

9. Anexos

Códigos implementados en Matlab R2015a.

9.1. Códigos implementados para VCI

```
% Script para el cálculo y ploteo del índice VCI
% Autora: Madeleine Revillod
% Diciembre,2018

clear;clc
format longE
addpath('C:\Users\lenovo\Desktop\Udec, 2-2018\06_Proyecto de
título2\02_xls\03_Valores_NDVI_por_Estac')

% Abrir archivo
fid = fopen('Valores_NDVI_Estac.txt');
formato =
'%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f
%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f
%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f
%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f
%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f
[f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f
[f^\n\r]';
data = textscan(fid,formato,'headerlines', 5); %{}
fclose(fid);
nam1 =
{'01_San_Manuel_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'02_Caracol_SPI_M_01_03_06_12
_36.txt';'03_Caman_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'04_San_Fabian_SPI_M_01_03
_06_12_36.txt';'05_Coihueco_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'06_Trupan_SPI_M
_01_03_06_12_36.txt';'07_Tucapel_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'08_Atacoldo
SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'09_Las_trancas_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'10
_Diguillin_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'11_Cerro_el_padre_SPI_M_01_03_06
_12_36.txt';'12_Chillan_viejo_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'13_Cholguan_SPI
_M_01_03_06_12_36.txt';'14_Pemuco_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'15_Chillan
cito_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'16_Nueva_Aldea_SPI_M_01_03_06_12_36.txt
';'17_Coelemu_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'18_Dichato_SPI_M_01_03_06_12_3
6.txt';'19_Quilaco_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'20_San_Carlo_Puren_SPI_M
_01_03_06_12_36.txt';'21_Los_Angeles_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'21_Mulch
en_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'22_Las_Achiras_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';
'23_Laja_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'24_canete_SPI_M_01_03_06_12_36.txt'
;'25_Contulmo_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'40_Liucura_SPI_M_01_03_06_12_3
6.txt';'41_Lonquimay_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'42_Laguna_Malleco_SPI_M
_01_03_06_12_36.txt';'43_Malalcahuello_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'44_Cu
racautin_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'45_Tricauco_SPI_M_01_03_06_12_36.tx
t';'46_Curarrahue_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'47_Puesco_SPI_M_01_03_06_1
2_36.txt';'48_Llafenco_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'49_Pucon_SPI_M_01_03_
06_12_36.txt';'50_Encimar_Malleco_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'51_Tranama
n_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'52_Las_Mercedes_Victoria_SPI_M_01_03_06_12
_36.txt';'52_Lumaco_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'53_Traiguen_SPI_M_01_03_
06_12_36.txt';'54_Quillen_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'55_Galvarino_SPI_M
_01_03_06_12_36.txt';'56_La_Cabana_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'57_Lautar
o_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'58_Pueblo_Nuevo_Temuco_SPI_M_01_03_06_12_3
6.txt';'59_Cherquenco_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'60_Vilcun_SPI_M_01_03_
06_12_36.txt';'61_Freire_Sendos_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'62_Puerto_Sa
avedra_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'63_Cunco_SPI_M_01_03_06_12_36.txt';'6
```

```

4_Los_Laureles_SPI_M_01_03_06_12_36.txt'; '65_Villarrica_SPI_M_01_03_06_
12_36.txt'; '66_Chanelifu_SPI_M_01_03_06_12_36.txt'; '67_Quitratue_SPI_M_
01_03_06_12_36.txt'; '68_Teodoro_Schmitd_SPI_M_01_03_06_12_36.txt'};

name = regexp(nam1, '_SPI_M_01_03_06_12_36.txt','');

for j = 2:57
    % Recuperar datos
    f = data{1,1};
    v_1 = data{1,j};
    % tratar la fecha
    fstr = num2str(f);
    anio = fstr(:,1:4);
    rss = fstr(:,5:7);
    rest = str2num(rss);
    value = (rest./365.25);
    ani = str2num(anio);
    fecha = ani+value;

    % Calculo del índice
    mini = min(min(v_1));
    maxi = max(max(v_1));

    aux = zeros(length(v_1),1);
    for i = 1:length(v_1)
        aux(i,1) = 100*((v_1(i)-mini)/(maxi-mini));
    end
end

% Segundo Script, para cálculo de VCI para estaciones GPS
% Autora: Madeleine Revillod
% Diciembre, 2018.

clear;clc
format longG

namel =
{'ANTC_pre.txt'; 'BN08_pre.txt'; 'CBRO_pre.txt'; 'CONT_pre.txt'; 'CONZ_pre.
txt'; 'LAJA_pre.txt'; 'LNQM_pre.txt'; 'NIHU_pre.txt'; 'TMCO_pre.txt'; 'UDEC_
pre.txt'};
addpath('C:\Users\lenovo\Desktop\Udec, 2-2018\06_Proyecto de
título2\02_xls\05_Valores_NDVI_x_GPS\')

% Abrir Archivo
L = {'NDVI_GPS.txt'};
fid = fopen(char(L));
data = textscan(fid, '%f %f %f %f %f %f %f %f %f %f
%f', 'HeaderLines', 1);
fclose(fid);

```



```

for j = 2:11
    name = regexprep(name1(j-1), '_pre.txt', '');
    % Recuperar datos
    f = data{1,1};
    v_1 = data{1,j};
    % tratar la fecha
    fstr = num2str(f);
    anio = fstr(:,1:4);
    rss = fstr(:,5:7);
    rest = str2num(rss);
    value = (rest./365.25);
    ani = str2num(anio);
    fecha = ani+value;

    % Calculo del índice
    mini = min(min(v_1));
    maxi = max(max(v_1));

    aux = zeros(length(v_1),1);
    for i = 1:length(v_1)
        aux(i,1) = 100*((v_1(i)-mini)/(maxi-mini));
    end

    % valores cortados
    VCI_val = [fecha(119:198,1) aux(119:198,1)];
    fileIDD = fopen([char(name), '_VCI', '.txt'], 'w');
    forma = '%f %f\r\n';

    for i=1:size(VCI_val,1)
        fprintf(fileIDD, forma, VCI_val(i,:));
    end
    fclose(fileIDD);
end

```



9.2. Scripts para el cálculo del Índice DIGPS.

9.2.1. Script Principal

```
% Script principal para el cálculo del índice DIGPS
% Autora: Madeleine Revillod
% Diciembre, 2018.

clear;clc
format longG

L =
{'ANTC_pre.txt';'BN08_pre.txt';'CBRO_pre.txt';'CONT_pre.txt';'CONZ_pre.
txt';'LAJA_pre.txt';'LNQM_pre.txt';'NIHU_pre.txt';'TMCO_pre.txt';'UDEC_
pre.txt'};

addpath('C:\Users\lenovo\Desktop\Udec, 2-2018\06_Proyecto de
título2\02_xls\04_GPS\02_DATASNOUTLIERS\')

% Abrir archivo
for j = 1:10
    stac = regexp(L(j), '_pre.txt', '');
    fid = fopen(char(L(j)));
    data = textscan(fid, '%f %f', 'HeaderLines', 1);
    % dat = importdata(L(j).name, '');
    fclose(fid);

    % Fecha en Modified Julian Day (MJD)
    dup = detrend(data{1,2}); % DeltaU
    fecha_g = datestr(data{1,1} + 678942, 0); % Fecha en calendario
gregoriano
    [Y,M,D] = datevec(fecha_g); % Vector de año mes y día en
gregoriano

    n = length(Y);
    dfecha = zeros(n,1);
    for i = 1:n
        dfecha(i) = decyear(Y(i),M(i),D(i)); % Fechas en decimal
    end

    % Plot serie GPS
    c = stac; % Title
    plot_serieGPSsola(dfecha,-dup, c);

    TS00.ymd = [Y M D]; % Todo en una misma matriz
    TS00.dtime = dfecha;
    TS00.dup = dup;

% eneros
Eneros = climato(TS00,1);
Eneros_med = mes_medio(Eneros);
```

```

Enero_DIGPS = DIGPS_f(Eneros_med);

% febreros
Febreros = climato(TS00,2);
Febreros_med = mes_medio(Febreros);
Febrero_DIGPS = DIGPS_f(Febreros_med);

% Marzo
Marzos = climato(TS00,3);
Marzos_med = mes_medio(Marzos);
Marzo_DIGPS = DIGPS_f(Marzos_med);

% Abril
Abriles = climato(TS00,4);
Abriles_med = mes_medio(Abriles);
Abril_DIGPS = DIGPS_f(Abriles_med);

% Mayo
Mayos = climato(TS00,5);
Mayos_med = mes_medio(Mayos);
Mayo_DIGPS = DIGPS_f(Mayos_med);

% Junio
Junios = climato(TS00,6);
Junios_med = mes_medio(Junios);
Junio_DIGPS = DIGPS_f(Junios_med);

% Julio
Julios = climato(TS00,7);
Julios_med = mes_medio(Julios);
Julio_DIGPS = DIGPS_f(Julios_med);

% Agosto
Agostos = climato(TS00,8);
Agostos_med = mes_medio(Agostos);
Agosto_DIGPS = DIGPS_f(Agostos_med);

% Septiembre
Septiembres = climato(TS00,9);
Septiembres_med = mes_medio(Septiembres);
Septiembre_DIGPS = DIGPS_f(Septiembres_med);

% Octubre
Octubres = climato(TS00,10);
Octubres_med = mes_medio(Octubres);
Octubre_DIGPS = DIGPS_f(Octubres_med);

% Noviembre
Noviembres = climato(TS00,11);
Noviembres_med = mes_medio(Noviembres);
Noviembre_DIGPS = DIGPS_f(Noviembres_med);

% Diciembre
Diciembres = climato(TS00,12);
Diciembres_med = mes_medio(Diciembres);
Diciembre_DIGPS = DIGPS_f(Diciembres_med);

a = 1;
b = 12;
zz = 7; % años de estudio
DIGPS_T = zeros(zz*12,4);

for i = 1:zz %desde el 2010 hasta el 2016
    DIGPS_T(a:b,1:4) = [Enero_DIGPS(i,1:4);

```

```

    Febrero_DIGPS(i,1:4);
    Marzo_DIGPS(i,1:4);
    Abril_DIGPS(i,1:4);
    Mayo_DIGPS(i,1:4);
    Junio_DIGPS(i,1:4);
    Julio_DIGPS(i,1:4);
    Agosto_DIGPS(i,1:4);
    Septiembre_DIGPS(i,1:4);
    Octubre_DIGPS(i,1:4);
    Noviembre_DIGPS(i,1:4);
    Diciembre_DIGPS(i,1:4)];

    a = a+12;
    b = b+12;
end
% Fechas decimales
n = length(DIGPS_T(:,1));
dfecha2 = zeros(n,1);
for i = 1:n
    dfecha2(i,1) = decyear(DIGPS_T(i,1),DIGPS_T(i,2),DIGPS_T(i,3));
end

% poltear serie
diseño_grap(dfecha2, [DIGPS_T(:,4), ((dfecha2).^0)*0], [2012
2012], [min(DIGPS_T(:,4)) max(DIGPS_T(:,4))], [2015 2015], c);
end

```

9.2.2. Función Climato.m

```

% Climatología de los datos, todos los eneros, todos los febreros..
% de un arreglo.
% input: data - arreglo con los datos - .ymd .dtime .dup
%         mm     - mes buscado
% Autora: Madeleine Revillod
% Diciembre, 2018.

function [mesB] = climato(data,mm)
    mesB.ymd = [0 0 0]; % Todo en una misma matriz
    mesB.dtime = 0;
    mesB.dup = 0;
    n = length(data.ymd(:,1));
    k1 = 1;
    for i = 1:n
        if data.ymd(i,2) == mm % sacar todos los eneros
            mesB.ymd(k1,1:3) = data.ymd(i,1:3);
            mesB.dtime(k1,1) = data.dtime(i,1);
            mesB.dup(k1,1) = data.dup(i,1);
            k1 = k1+1;
        end
    end
end
end

```

9.2.3. Función mes_medio.m

```
% Media del mes y del valor up ingresado para los años registrados
% input: mes - mes a calcular
% Autora: Madeleine Revillod
% Diciembre, 2018.

function [mes_med] = mes_medio(mes)
    year_ini = 2010;
    n = length(mes.ymd(:,1));
    year_end = 2017;

    ny = abs(year_ini - year_end);
    almc = 0;
    count = 1;
    f_almc = 0;
    mes_med = zeros(6,4);

    for i = 1:ny
        for j = 1:n
            if mes.ymd(j,1) == year_ini
                almc = mes.dup(j) + almc;
                f_almc = mes.ymd(j,3) + f_almc;
                count = count + 1;
            end
        end
        dup_med = almc/count;
        f_med = f_almc/count;
        mes_med(i,1:4) = [year_ini mes.ymd(1,2) f_med dup_med]; % matiz
    end
end

resultante
year_ini = year_ini + 1;
end

end
```

9.2.4. Función DIGPS_f.m

```
% Cálculo del índice DIGPS
% input: data - Matriz de datos GPS [Y M D dUp]
% Autora: Madeleine Revillod
% Diciembre, 2018.

function [mat_DIGPS] = DIGPS_f(data)
    dup = -data(:,4);
    xmed = median(dup);
    D_T = dup-xmed; % este es la D asterisco
    STD = std(dup);

    DIGPS = D_T/STD;

    n = length(data(:,1));
    mat_DIGPS = zeros(n,4);
```

```

for i = 1:n
    if D_T(i) == -xmed
        mat_DIGPS(i,1:4) = [data(i,1),data(i,2),data(i,3),0];
    else
        mat_DIGPS(i,1:4) =
[data(i,1),data(i,2),data(i,3),DIGPS(i)];
    end
end
end
end

```

9.2.5. Función diseño_grap.m

```

% Diseño de los graficos de los resultados de DIGPS
% Autora: Madeleine Revillod.
% Diciembre, 2018.

function diseño_grap(X1, YMatrix1, XData1, YData1, XData2,c)
% Input:
% X1: vector de x data
% YMATRIX1: matrix de y data
% XDATA1: linea xdata
% YDATA1: linea ydata
% XDATA2: linea xdata

% Crear figura
figure1 = figure;

% Crear axes
axes1 = axes('Parent',figure1,'XMinorTick','on','FontSize',14);
box(axes1,'on');
hold(axes1,'on');

% Crear multiple lineas
plot1 = plot(X1,YMatrix1);
set(plot1(1),...
'MarkerFaceColor',[0.925490200519562 0.839215695858002
0.839215695858002],...
'MarkerEdgeColor',[0 0 0],...
'MarkerSize',4,...
'Marker','o',...
'LineStyle','--',...
'Color',[1 0 0]);
set(plot1(2),'Color',[0.831372559070587 0.815686285495758
0.7843137383461]);
% Crear linea
line(XData1,YData1,'Parent',axes1,'LineWidth',2,'LineStyle','--',...
'Color',[0.800000011920929 0.800000011920929 0.800000011920929]);
line(XData2,YData1,'Parent',axes1,'LineWidth',2,'LineStyle','--',...
'Color',[0.800000011920929 0.800000011920929 0.800000011920929]);

% Crear titulo
title(c);
end

```