



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES  
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales  
Facultad de Agronomía  
Maestría en Meteorología Agrícola

**Caracterización de sequías agrícolas a partir de datos  
de humedad de suelo obtenidos por la misión satelital  
SMOS**

Tesis presentada para optar al título de Magíster de la Universidad de  
Buenos Aires en Meteorología Agrícola

Maestrando: Lic. Gustavo J Almeira  
Director de Tesis: Dr. Juan A Rivera

Buenos Aires, 2019

Fecha de defensa:

## AGRADECIMIENTOS

A mi familia: a mi esposa Martina, hijos Azul y Tomas; por su constante apoyo, amor y por compartir nuestros días.

A toda la familia: padres, hermana, sobrinos y cuñado; por el aguante de siempre.

A Juan por sus consejos, enseñanzas y estar siempre.

A todo el personal y profesores de la Maestría, son lo mejor y sigan adelante.

A las Facultades de Ciencias Exactas y Agronomía, por éste emprendimiento conjunto.

A la Universidad de Buenos Aires, mejor establecimiento de educación pública, gratuita y de calidad.

Al Instituto Nacional del Agua, por brindar un excelente lugar de trabajo.

“Liberamos a uno de estos prisioneros (de la caverna). Le obligamos a levantarse, a volver la cabeza, a andar y a mirar hacia el lado de la luz..

..Sus ojos deberán acostumbrarse poco a poco a esta región superior. Lo que más fácilmente verá al principio serán las sombras, después las imágenes de los hombres y de los demás objetos reflejadas en las aguas, y por último los objetos mismos. De ahí dirigirá sus miradas al cielo, y soportará más fácilmente la vista del cielo durante la noche, cuando contemple la luna y las estrellas, que durante el día el sol y su resplandor”

Mito de la Caverna - Platon

“El período comprendido entre los años 1827 y 1832 se llama el “gran seco”, o la gran sequía. Durante ese tiempo fue tan escasa la lluvia caída, que no creció ninguna planta, ni siquiera cardos; los arroyos se secaron, y todo el país tomo el aspecto de un polvoriento camino carretero. Así ocurrió especialmente, en la parte septentrional de la provincia de Buenos Aires y meridional de Santa Fe. Pereció un gran número de aves, animales silvestres, ganado vacuno y caballar por falta de alimento y agua. ..El cálculo más bajo supone que se perdieron solo en la provincia de Buenos Aires un millón de cabezas. Un ganadero de San Pedro tenía 20000 reses con anterioridad a estos años, y al fin no le quedó ni una” (paginas 162-163).

**Diario del viaje de un naturalista alrededor del Mundo (1845) Charles R Darwin**

(El Elefante Blanco, 1998).

“Si se hiciera un cálculo de los millones de pérdidas que en los últimos 30 años han producido las inundaciones por una parte, y las secas por la otra, se vería indudablemente que los perjuicios ocasionados por las ultimas depasan en una cantidad asombrosa a los que han sido producidos por las primeras...”

“Los periodos de grandes secas son el resultado, por una parte, de la irregularidad de las lluvias y por la otra de que el agua que cae en los periodos de grandes lluvias se evapora con demasiada prontitud sin penetrar en el subsuelo en la cantidad que sería de desear”

**Las secas y las inundaciones en la Provincia de Buenos Aires (1884). Florentino Ameghino**

## **1. RESUMEN/ABSTRACT**

## **2. INTRODUCCIÓN**

- a) Sequías: Problemas y antecedentes
- b) Sequía y Humedad del Suelo
- c) Antecedentes en la Llanura Pampeana

## **3. OBJETIVOS**

- a) Objetivo general
- b) Objetivos específicos

## **4. MATERIALES-AREA DE ESTUDIO**

- a) Datos de Precipitación
- b) Datos de Humedad del Suelo
- c) Área de estudio: Llanura Pampeana

## **5. METODOLOGIA**

- a) Índice de Precipitación Estandarizado
- b) Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) - Humedad del Suelo
- c) Metodología de Cluster – Humedad del Suelo
- d) Coeficientes de Correlación (IPE-Humedad del Suelo/IPE-Anomalía de Humedad del Suelo)
- e) Prueba Piloto: Índice SWDI

## **6. RESULTADOS**

- a) Resultados de Cluster de HDS
- b) Evaluación de las relaciones entre la precipitación y la HDS
- c) Comparación de la categorización de sequías y excesos en base al IPE3 y aHDS
- d) Resultados prueba piloto: Índice SWDI

## **7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **8. BIBLIOGRAFÍA**

## 1. RESUMEN

La sequía es uno de los principales peligros naturales, siendo un fenómeno que ocasiona pérdidas millonarias en diversos sectores socio-económicos. Frecuentemente el sector agrícola es el primero en ser afectado por la sequía, debido a la dependencia al agua y a las reservas de humedad del suelo durante las diversas etapas del crecimiento de los cultivos. El objetivo de esta investigación de tesis se centra en el análisis del nexo entre la variabilidad de la Humedad del Suelo (HDS) y la ocurrencia de sequías meteorológicas y agrícolas, mediante el uso de las estimaciones de HDS de la misión Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) en gran parte de la Llanura Pampeana.

La respuesta de la HDS a la ocurrencia de sequías identificadas mediante el Índice de Precipitación Estandarizada (IPE) se obtiene en ventanas de tiempo de 3 a 5 meses. Esto permite adoptar la serie de IPE en ventana de 3 meses (IPE3), para el monitoreo de condiciones de exceso y déficit de HDS estimada a partir de sensores remotos. Las áreas afectadas por eventos de sequía, condiciones normales y excesos poseen una alta coherencia espacial entre el IPE3 y las anomalías de HDS. Esta coherencia también se observa a nivel temporal, con anomalías negativas de HDS respondiendo a condiciones de sequía severa y extrema ( $IPE \leq -1.5$ ). A partir de esta relación, se desarrolló un índice de sequías agrícolas que considera la HDS de la misión SMOS y la composición del suelo en los primeros centímetros.

Se destaca el uso de HDS estimada mediante la misión SMOS como una herramienta de rápida disponibilidad y adecuada precisión, que permite cuantificar y monitorear el balance hídrico en la Llanura Pampeana, teniendo en cuenta las precipitaciones y las pérdidas por evapotranspiración.

Palabras claves: Sequias agrícolas, misión SMOS, humedad del suelo, IPE, índice de sequias

## **Characterization of agricultural droughts from soil moisture data obtained by the SMOS satellite mission**

### **Abstract**

Drought is one of the main natural hazards, being a phenomenon that causes millions of losses in various socio-economic sectors. Frequently the agricultural sector is the first to be affected by drought, due to dependence on water and soil moisture reserves during the various stages of crop growth. The objective of this thesis focuses on the analysis of the link between the variability of Soil Moisture (SM) and the occurrence of meteorological and agricultural droughts, using the SM estimates of the Soil Moisture and Ocean Salinity mission (SMOS) in large part of Pampas Plains.

The response of the SM to the occurrence of droughts identified by the Standardized Precipitation Index (SPI) is obtained in time between of 3 to 5 months. This allows the 3-month SPI series (SPI3) to be taken for monitoring conditions of excess and deficit of SM estimated from remote sensing. The areas affected by drought events, normal conditions and excesses have a high spatial coherence between SPI3 and SM anomalies. This coherence is also observed at a temporal level, with negative SM anomalies responding to severe and extreme drought conditions ( $SPI \leq -1.5$ ). From this relationship, an index of agricultural droughts was developed that considers the SM of the SMOS mission and the composition of the soil in the first centimeters.

The use of SM estimated through the SMOS mission is a tool of rapid availability and adequate precision, which allows quantifying and monitoring the water balance in Pampas Plains, taking into account rainfall and losses due to evapotranspiration.

Keywords: Agricultural droughts, SMOS mission, soil moisture, SPI, drought index

## 2. INTRODUCCION

### a) Sequías: Problema y antecedentes

Se calcula que el número de personas del mundo afectadas por la subalimentación o carencia crónica de alimentos ha aumentado de 804 millones en 2016 a casi 821 millones en 2017 y la situación está empeorando en América del Sur y en la mayoría de las regiones de África; con graves crisis alimentarias favorecidas por la variabilidad y las condiciones extremas del clima (FAO, 2018a). Entre 2006 y 2016, el 30% de las pérdidas agrícolas mundiales causadas por desastres se debieron a la ocurrencia de sequías. En los países en desarrollo, hasta el 83 % de todos los daños y pérdidas causados por la sequía afectan directamente el sector agrícola, lo cual se espera que se intensifique bajo condiciones de cambio climático (FAO, 2018b). El desafío entonces es reactivar el crecimiento agrícola a nivel mundial y extenderlo en el tiempo. Una de las causas naturales que afecta este desafío está relacionado con fluctuaciones climáticas, especialmente las sequías (Sivakumar et al., 2011). De acuerdo con Bryant (1991), en base a una clasificación de eventos de peligros naturales según distintas características como su gravedad, duración, extensión espacial, pérdida de vidas, pérdidas económicas, efecto social e impacto a largo plazo, la sequía ocupa el primer lugar entre los peligros naturales. Esto se debe a que, en comparación con otros peligros naturales, como las inundaciones y los huracanes, que se desarrollan rápidamente y duran poco tiempo, la sequía es un fenómeno que se acumula o progresiva durante un período de tiempo en una vasta área, y su efecto persiste durante años incluso después del final de la sequía (Wilhite, 2000; Tannehill 1947). Las sequías, además de su lento desarrollo, la acumulación progresiva de impactos negativos (no estructurales), la posible amplificación por el accionar humano (exceso de cultivos y riego, deforestación, erosión, etc.) y las diferencias a nivel regional hacen de este fenómeno uno de los desastres naturales más costosos y menos entendidos (Mishra y Singh, 2010). Además, las proyecciones de cambio climático hacia fines del siglo XXI indican un aumento probable en la frecuencia e intensidad de la sequía a nivel global (IPCC, 2014).

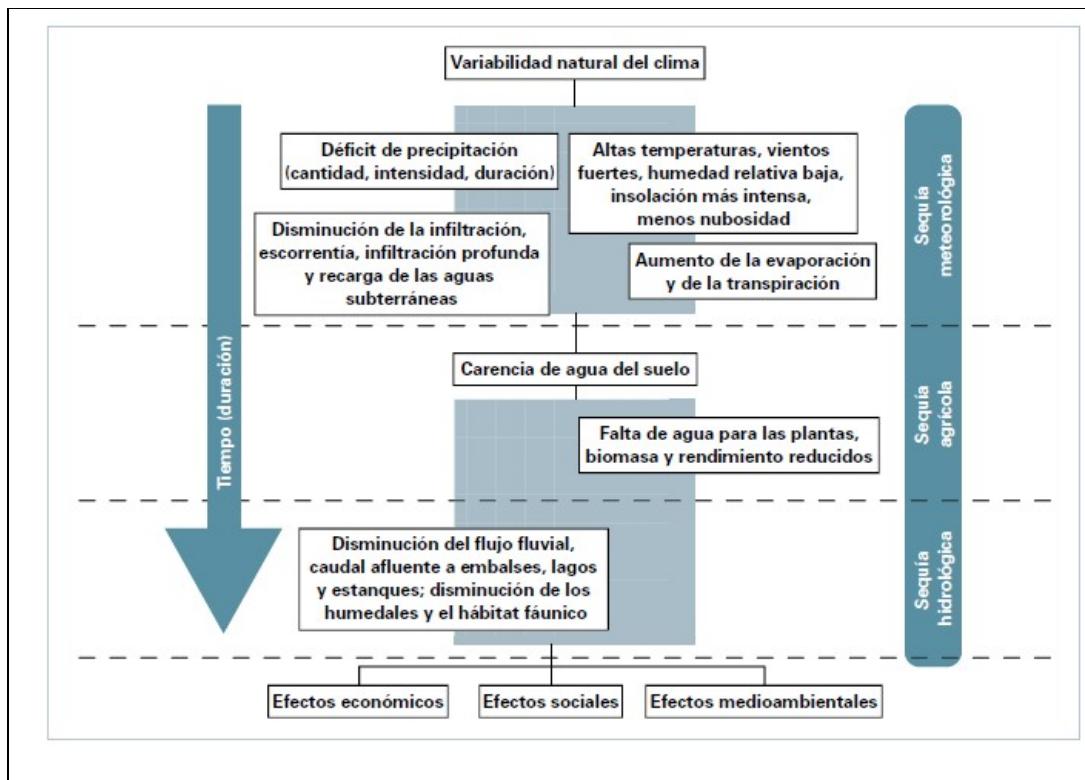
Las sequías son eventos climáticos extremos caracterizados por períodos prolongados de déficit de lluvias que pueden dar lugar a inseguridad alimentaria y malnutrición, principalmente mediante efectos negativos en cadena en la producción agrícola, los precios de los alimentos, las cadenas de valor, los suministros de agua y los medios de vida, lo cual afecta al acceso a los ingresos y los alimentos (FAO, 2018a). De todos los riesgos naturales, las inundaciones, las sequías y las tormentas tropicales son los que más afectan más a la producción alimentaria. En particular, más del 80% del daño y las pérdidas causadas por la sequía son para la agricultura, especialmente la producción de ganado y cultivos (FAO, 2018d). Si una sequía es severa y lo suficientemente extendida, puede afectar la disponibilidad y el acceso de alimentos a nivel nacional, así como la nutrición, aumentando la prevalencia de la subalimentación. Casi el 36% de los países que experimentaron un aumento de la subalimentación desde el año 2005 registraron la ocurrencia de una sequía severa (FAO, 2018a).

La sequía no posee una definición universal, con lo cual existe una dificultad para definir su comienzo y fin (Agnew, 2000). La sequía se considera como un déficit anormal de agua en al menos una parte del ciclo hidrológico; pero la sequía como consecuencia de la variabilidad

natural puede verse agravada por la presión que ejerce la comunidad sobre el recurso agua. Entonces, si se dice que una sequía es un período en el cual no hay suficiente agua, ¿qué significa "suficiente"? ¿Y suficiente para qué o para quién? La gravedad de la sequía depende no sólo de la duración, la intensidad y la extensión geográfica de un episodio específico de sequía, sino también de las demandas de las actividades humanas y la vegetación en los suministros de agua de una región (Wilhite, 2000). Las sequías ocurren en prácticamente todas las zonas climáticas, con precipitaciones elevadas o bajas, y se relacionan principalmente con la reducción de la cantidad de precipitación recibida durante un período prolongado de tiempo (Mishra y Singh, 2010).

Las sequías generalmente se clasifican en cuatro categorías: meteorológica, agrícola, hidrológica y socio-económica (Wilhite y Glantz, 1985) (ver Figura 1); aunque están íntimamente relacionadas:

- La sequía meteorológica se define como una desviación de las condiciones normales de precipitación durante un período de tiempo para una región específica.
- La sequía agrícola se produce después de una sequía meteorológica y es la falta de humedad adecuada del suelo necesaria para que un cultivo determinado crezca y prospere durante un tiempo determinado; afectando el rendimiento del cultivo.
- Se produce una sequía hidrológica cuando la precipitación se ha reducido durante un período prolongado de tiempo y los suministros de agua que se encuentran en arroyos, lagos, ríos y embalses son deficientes. La demanda supera la oferta.
- Una sequía socioeconómica es una condición cuando los suministros físicos de agua son tan bajos que afectan negativamente a la comunidad donde se produce la sequía.



**Figura 1.** Secuencia típica, efectos y tipos de sequías (Tomado de OMM, 2006).

En particular, la sequía agrícola vincula diversas características de la sequía meteorológica, con énfasis en la escasez de lluvias, diferencias entre la evapotranspiración real y potencial, los déficits hídricos del suelo, etc. La demanda de agua de una planta depende, entre otros factores, de las condiciones climáticas prevalecientes, las características biológicas de la planta, su etapa de crecimiento y las propiedades físicas y biológicas del suelo. Los impactos de la sequía son específicos del cultivo en cuestión, porque las etapas fenológicas más sensibles al clima varían entre los diferentes cultivos. Asimismo, se registran variaciones en las fechas de siembra y los períodos de maduración entre los cultivos y las ubicaciones. Un período de estrés por alta temperatura que se produce en asociación con condiciones secas puede coincidir con una etapa crítica de crecimiento para un determinado cultivo, mientras que para el caso de otro cultivo podría no haber daños (Wilhite, 2000). Además, la época de ocurrencia de precipitaciones durante la temporada de crecimiento es crítica en la determinación de los impactos. Por ejemplo, los rendimientos de los cultivos o forrajes no se ven afectados por una sequía si la lluvia es oportuna (es decir, coincide con las etapas fenológicas críticas) y efectiva (es decir, de baja intensidad y alta tasa de infiltración del suelo). La planificación agrícola a menudo puede reducir el riesgo de impacto de la sequía en los cultivos al alterar el cultivo, el genotipo, la fecha de siembra y las prácticas de cultivo.

Al registrarse precipitaciones nuevamente, podrían aumentar rápidamente los niveles de humedad del suelo y culminar la sequía agrícola, especialmente en las tierras de cultivo de secano. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, dependiendo del momento de estas lluvias, los impactos pueden persistir debido a que los rendimientos potenciales de los cultivos ya pueden haber sido afectados. White y Walcott (2009) sugieren que en algunas regiones de Australia, una deficiencia menor de lluvia podría tener consecuencias importantes en la producción agrícola, mientras que una deficiencia moderada de lluvia no siempre reduce seriamente el crecimiento de cultivos y pastos. La disminución de la precipitación y el aumento de las temperaturas, que promueven la evapotranspiración y reducen la humedad del suelo, son factores importantes que han contribuido a que más regiones experimenten sequías (Dai et al., 2004). Por ejemplo, muchos estudios de simulación agronómica en Australia sugirieron que las sequías agrícolas suelen coincidir con la ocurrencia de sequías meteorológicas, identificadas a través de déficits de lluvia, pero la gravedad y duración de la sequía agrícola dependía en gran medida del momento y la distribución de los eventos de lluvia y otros factores climáticos (Stone, 2014).

El agua es el principal constituyente de todos los seres vivos, las plantas poseen entre un 75% y 90% del tejido vegetal, según la especie. A su vez, es indispensable para llevar adelante procesos vitales como la fotosíntesis, transporte de nutrientes y regulación de su temperatura a través de la transpiración, entre otras funciones esenciales.

La humedad del suelo (HDS) es un componente clave del ciclo hidrológico, que determina la generación de escorrentía y la recarga de agua subterránea (Western et al., 2002). También afecta en gran medida el funcionamiento del ecosistema (Sitch et al., 2003), así como la actividad y el crecimiento de los bosques (Pastor y Post, 1986). En el contexto de la agricultura, **la HDS influye en la producción del rendimiento**. Las reducciones de rendimiento de grano de

maíz en experimentos llevadas a cabo en la sede de INTA Balcarce (Buenos Aires) con distintos grados de deficiencias de agua e híbridos considerados, arrojaron reducciones del rendimiento de grano entre 59% y 22% (Nagore et al., 2017). Por estas razones, la estimación precisa de la variabilidad de la HDS en función del tiempo y el espacio es muy relevante para varias aplicaciones hidrológicas, ecológicas y agrícolas (Scaini et al., 2015).

Las sequías tienen un impacto económico en los países productores de alimentos. Por ejemplo, en el África subsahariana, se informa que las sequías de principios a mediados de la década de 1980 afectaron negativamente a más de 40 millones de personas (Oficina de Asistencia para Desastres en el Extranjero, 1990) y la sequía de los años 1991–92 en el sur de África afectó a 20 millones de personas y provocó un déficit de suministros de cereales de más de 6,7 millones de toneladas (SADCC 1992). En Australia se estimó que la sequía de 2006 redujo la cosecha nacional de cereales de invierno en un 36% y costó a éste alrededor de AUD \$ 3,5 mil millones, dejando a muchos agricultores en crisis financiera (Wong et al., 2009). En tanto que la sequía más grave en la Península Ibérica en 60 años ocurrió en 2005, redujo el rendimiento total de cereales en la Unión Europea en un 10% aproximadamente (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2006). Finalmente en la última sequía en nuestro país, ocurrida en el campaña 2017/18, produjo reducciones en la producción de maíz del 22% y de la soja del 33%; con una disminución cercana al 1% del Producto Bruto Interno (Bolsa de Cereales, 2018); lo cual generó efectos negativos directos de la sequía sobre cada uno de los eslabones de las cadenas de valor de la soja y el maíz.

### b) Sequía y Humedad del Suelo

En agricultura, la **HDS influye directamente en el rendimiento de la producción**, ya que un exceso o déficit de agua afecta a las plantas, mediante deficiencias de oxígeno o estrés por sequías. Nuestro país tiene una importante actividad agrícola, siendo el sexto exportador de productos agrícolas en 2016, aportando casi el 3% del porcentaje mundial (FAO, 2018c). En la Llanura Pampeana se practica agricultura de secano, donde se obtiene la mayor parte de la producción mundial de cereales (con una extensión mundial de 516 millones de hectáreas entre cultivos de trigo, maíz y soja en 2013 según la FAO, <http://faostat3.fao.org/>). Entonces es necesario el seguimiento de la variabilidad espacial y temporal de la **HDS, esencial para estimar el rendimiento del cultivo** (Panu et al., 2002), planificar la siembra y evaluar los balances regionales de agua y energía, siendo la HDS una variable de entrada clave en los modelos de balance hídrico (Champagne et al., 2014).

La HDS es la principal variable para monitorear la sequía agrícola. Usualmente, se considera que una sequía agrícola comienza cuando la disponibilidad de HDS para las plantas cae a tal nivel que afecta desfavorablemente el rendimiento del cultivo y, por lo tanto, la producción agrícola. La evaluación de la sequía agrícola posee una gran importancia para la planificación y gestión de la agricultura de secano.

Las mediciones de HDS in situ son precisas, pero tienen una representatividad limitada por tratarse de una medición puntual. Esta problemática se traduce a un monitoreo que tiene una extensión espacial reducida, lo cual influye además en la alta variabilidad de los suelos de la

región y además no tienen una continuidad temporal durante largos períodos de tiempo; especialmente en Sudamérica (Seneviratne et al., 2010). Las estimaciones de HDS en base a distintas misiones satelitales (con sensores activos y pasivos) apuntan a colaborar en este aspecto, a conocer y extender las HDS. Las estimaciones de HDS se utilizan para detectar y monitorear las regiones afectadas por la sequía y tienen la ventaja de su amplia cobertura y distribución espacial y temporal. También están disponibles las simulaciones de modelos de superficie terrestre, que son alternativas útiles para analizar la variabilidad de la HDS, como por ejemplo Global Land Data Assimilation System (GLDAS).

Las nuevas misiones dedicadas al monitoreo global de la HDS están encabezadas por el satélite Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) lanzado a principios de noviembre de 2009 por la Agencia Espacial Europea (ESA), y el satélite Soil Moisture Active Passive (SMAP) lanzado en enero de 2015 por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA). El satélite SMOS está dedicado a la recuperación de la humedad del suelo a una profundidad aproximada de 5 cm, utilizando la temperatura de brillo medida en la banda L (microondas pasivo, resolución espacial de  $\sim 25$  km). Tiene una frecuencia de observación única (1,4 GHz), pero usa observaciones en múltiples ángulos de incidencia.

Numerosos estudios recientes han propuesto nuevos índices basados en las estimaciones de la HDS derivadas de SMOS para evaluar la sequía agrícola. Scaini et al. (2015) demostraron la viabilidad de anomalías de HDS derivadas de SMOS para determinar las condiciones de sequía en un sector semiárido central de la cuenca del Duero en España. En esta misma región, Martínez-Fernández et al. (2016) compararon series de índice Soil Water Deficit Index (SWDI en inglés) calculadas con datos de SMOS con las obtenidas a partir de datos de HDS in situ, y sus resultados mostraron que el SWDI derivado de SMOS reproduce bien la dinámica del balance hídrico del suelo. Más recientemente, Sánchez et al. (2016) introdujo un nuevo índice, denominado Índice de Sequía Agrícola de Suelos (SMADI), que es una fusión sinérgica de la HDS estimada a partir de SMOS con el espectroradiómetro de imágenes de media resolución (MODIS) y la temperatura de la superficie terrestre (LST), junto con varios índices de agua y vegetación para el monitoreo de la sequía agrícola. Estos autores demostraron que el SMADI podría proporcionar una alerta temprana de los impactos incipientes de la sequía en los sistemas de cultivo de secano. En tanto que en Canadá se encontró una razonable correlación en distintas localidades entre la precipitación y la HDS por SMOS, con un coeficiente de correlación de  $R = 0.6$  (Champagne et al., 2014).

Al relacionar las estimaciones de HDS de SMOS con índices de sequías en el norte de España, Scaini et al. (2015) encontraron que la escala de tiempo entre 20 y 40 días es la de mayor correlación entre las estimaciones entre SMOS, el índice de precipitación estandarizado (IPE, McKee et al. 1993) y el índice de precipitación y evapotranspiración estandarizado (IPEE, Vicente-Serrano et al., 2011). Además, los autores destacan que el uso del IPEE no mejora los coeficientes de correlación con SMOS, obteniendo el mejor desempeño con el IPE.

*Las estimaciones de HDS en base a datos satelitales son potencialmente útiles en varias aplicaciones ambientales, especialmente en Agrometeorología, como el monitoreo de excesos y déficits hídricos. Este tipo de información de HDS provista por los satélites es de importancia en*

*la Llanura Pampeana; debido a su extensión, intensa actividad agrícola y la información meteorológica dispersa.*

### **c) Antecedentes en la Llanura Pampeana**

Scarpatti y Capriolo (2016) realizaron una climatología de eventos de sequía agrícola en la Llanura Pampeana de la Argentina en el período 1950-2010, utilizando un índice agroclimático como es el déficit de agua en el suelo. A partir de esta investigación se encontró que los mayores valores de ocurrencia de sequía pertenecen a las dos estaciones más occidentales (Río Cuarto y General Pico), mientras que la menor cantidad de sequías se obtuvo en Dolores, que es la estación meteorológica más oriental. Estos resultados se corresponden con las variaciones climáticas regionales, pues la región occidental representa la pampa subhúmeda seca y la región oriental la pampa húmeda (Scarpatti y Capriolo, 2016). Además, los autores cuantificaron una tendencia hacia una menor cantidad de eventos de sequía en el período de estudio en casi todas las estaciones analizadas.

El programa “Excesos y deficiencias de agua en la República Argentina” del Centro de Investigaciones Biometeorológicas (CIBIOM - CONICET) surgió de la comprensión de la magnitud que este problema tenía a mediados del siglo pasado, para lo cual se propuso la aplicación de nuevas técnicas (Burgos, 1982). Desde la introducción en el país del primer modelo de balance de agua del suelo en 1948 (Thornthwaite, 1948; Burgos y Vidal, 1951) resultó evidente que, con el perfeccionamiento de esta metodología, se podría tender hacia una adecuada evaluación de las condiciones de humedad y aridez del clima. Esto permite además cuantificar los episodios extremos como las sequías y excesos de agua y disponer de un elemento eficaz como predictor de la productividad natural y agrícola.

Pántano et al. (2014) implementó un Balance Hídrico seriado en la Llanura Pampeana y encontró que las condiciones de exceso hídrico predominan al este de la región mencionada en el semestre frío (abril-septiembre) y las condiciones de déficit hídrico al oeste en el semestre cálido (octubre-marzo); con una zona de transición con una alta estacionalidad. Este comportamiento pone de manifiesto el grado de vulnerabilidad para las actividades agrícolas que allí se desarrollan; pero se deben adoptar tecnologías que minimicen este riesgo y permita la expansión de la frontera agrícola (Murphy y Hurtado, 2006).

Durante el verano, se presentaron precipitaciones más altas y más frecuentes (menor probabilidad de largas secuencias secas y menor período de retorno de 15 días y severidad) mientras que en el invierno se encontró lo contrario. No obstante, el impacto es mayor en verano por los altos valores de evapotranspiración y es más bajo durante el invierno, a pesar de la mayor probabilidad de largas secuencias secas (Pántano et al., 2017).

Por las escasas lluvias en el invierno, los cultivos invernales dependen en gran medida de la recarga de agua de las precipitaciones otoñales y en menor medida por las condiciones estivales. Por ejemplo, si abril es muy seco, las condiciones de humedad pueden impactar severamente los cultivos invernales (Cavalcanti et al., 2015).

La capacidad de GLDAS fue evaluada en el sur de Sudamérica a través de una comparación con el Índice de Precipitación Estandarizado (IPE) y un producto de humedad del suelo multisatélite (Spennemann et al., 2015). Los autores encontraron como utilidad potencial de los resultados el uso de GLDAS como indicador de los estados de humedad de suelo y para el análisis de sequías y sus características principales (distribución espacial, frecuencia e intensidad) en dicha región. También se encontró que las interacciones tierra-atmósfera son más intensas y extendidas para eventos secos, en particular en la Llanura Pampeana (Spennemann et al., 2018). Fernández Long et al. (2018) evaluaron el desempeño de HDS de modelos de balance hídrico y observaciones en la Llanura Pampeana, mostrando que hay una muy buena la correlación entre la HDS observada y la del Modelo Hídrico Operativo para el Agro (BOHA) en distintas profundidades en 4 localidades de la Llanura Pampeana. Esto es debido a que BOHA está forzado con datos observados, lo que le permite una mejor representación de la variabilidad de la HDS (Fernández Long et al., 2018). La correlación entre la HDS observada y la estimada a partir de GLDAS presenta valores más bajos, debido a la baja resolución de este producto y la calidad de los datos de lluvia utilizada.

Se encontró que el índice IPE trimestral es apto para evaluar las variaciones de lluvias y de rendimientos de maíz en condiciones de sequías agrícolas en la Llanura Pampeana; principalmente en la época de floración, etapa crítica de este cultivo (Sosa et al, 2018).

Otro índice utilizado en la Llanura Pampeana es el TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index), el cual indica el estado hídrico del sistema agua-suelo-planta y también el aporte de agua subterránea a la vegetación. Este índice ha sido evaluada a través de medidas a campo de contenido de humedad en el suelo (Holzman et al., 2014a, Holzman et al., 2014b), obteniendo una estrecha relación ( $R^2 > 0,69$ ) entre el TVDI y el contenido de humedad del suelo a distintas profundidades del suelo (de 5-10 a 120 cm). Actualmente está siendo utilizado por la Oficina de Riesgo Agropecuario (ORA) para complementar las estimaciones de humedad del suelo realizadas con balance hídrico en nuestro país (Carrasco Galleguillos et al., 2018).

Grings et al. (2014) utilizaron las anomalías de HDS obtenidas a partir de GLDAS, SMOS y ASCAT en la Llanura Pampeana. Los autores utilizaron la base de datos de GLDAS como serie de referencia. Se encontró que la HDS a partir de datos de SMOS comparado con HDS observados en Sol Negro, sitio agrícola cerca de la ciudad de Córdoba, presentan una alta correlación puntual ( $R = 0.7$ ) y rangos de variabilidad similares. Luego se propone trabajar con la técnica de análisis Triple Colocación (TC), técnica que permite estimar el error entre las estimaciones de HDS reales y las de origen satelital (Stoffelen, 1998) y se evidencia que los mayores errores de SMOS se localizan en áreas costeras, no en las zonas de cultivos. Además las anomalías espaciales derivadas de satélites presentan el típico gradiente este-oeste de HDS en el área de estudio, que está relacionado con los patrones de precipitación y evapotranspiración. Esto indica que los productos satelitales llevan información valiosa sobre el patrón espacial general de la HDS en la Llanura Pampeana (Grings et al, 2014).

En tanto que el trabajo de Niclòs et al. (2015) muestra que a partir de una comparación de estimaciones de HDS de SMOS y mediciones in situ se identificó un sesgo negativo de  $-0.02 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , lo que significa también una subestimación leve de SMOS. La campaña experimental se realizó en el verano de 2013, con zonas relativamente secas y húmedas en la Llanura

Pampeana. Durante la campaña, se llevaron a cabo mediciones portátiles de HDS a lo largo de transectas, que se utilizaron por primera vez para probar el producto SMOS. Luego, los datos HDS continuos registrados por las estaciones permanentemente instaladas en la región de estudio se utilizaron adicionalmente para extender el período de evaluación a dos años y medio (2012-2014), analizando las recuperaciones SMOS ascendentes y descendentes por separado. Los datos de HDS en campo con cultivos de maíz no se desvían notablemente en comparación con los cultivos de soja, lo que implica que no tienen un efecto importante en los valores de HDS en los nodos. Tampoco se observó una tendencia general con el tipo de suelo, tal vez debido a la similitud de las clases de texturas parcelarias (Niclòs et al., 2015).

*La evaluación realizada en función de la literatura reciente muestra que las estimaciones de HDS a partir del producto SMOS presentan resultados prometedores en la Llanura Pampeana, con un buen acuerdo entre diversas bases de datos aunque con un sesgo hacia una subestimación de la HDS.*

*En función de los resultados descriptos anteriormente obtenidos para diversas regiones del mundo, es posible establecer como hipótesis de trabajo de la presente tesis que las estimaciones de humedad de suelo obtenidas a partir de SMOS en la Llanura Pampeana se relacionan con las fluctuaciones de la precipitación estimadas a partir de las series de IPE.*

### **3. OBJETIVOS**

#### **a) Objetivo general**

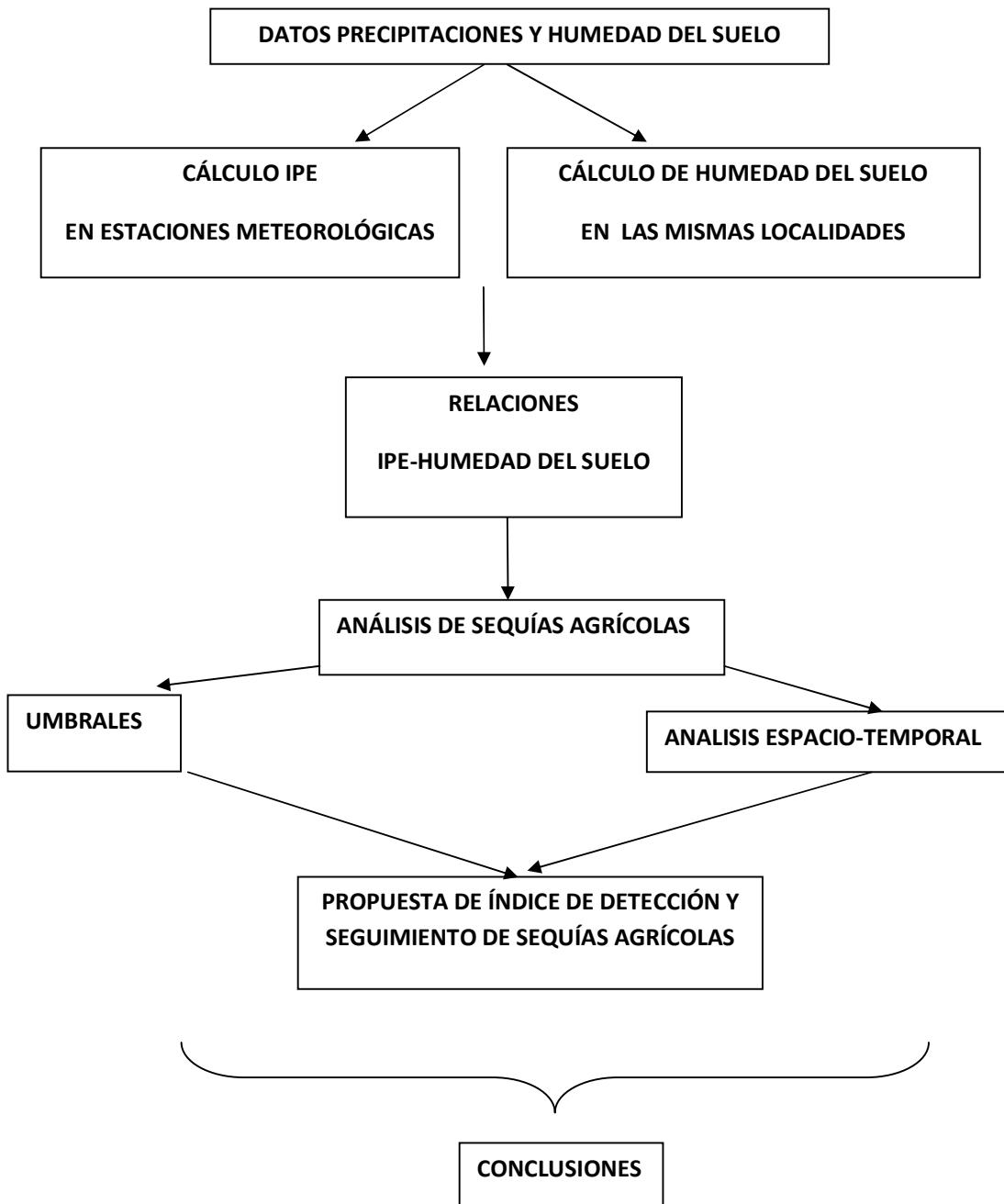
El objetivo de este trabajo de tesis es utilizar las estimaciones de HDS de la misión satelital SMOS (centrados en microondas pasivas) para el estudio y monitoreo de las sequías agrícolas en gran parte de la Llanura Pampeana.

#### **b) Objetivos específicos**

Los objetivos específicos son:

- 1- Comparación del Índice de Precipitación Estandarizado (IPE) en distintas escalas temporales y la humedad de suelo estimada a partir de los datos de SMOS en la Llanura Pampeana.
- 2- Establecer los umbrales de ocurrencia de sequías agrícolas en la Llanura Pampeana.
- 3- Identificar el patrón espacial de las sequías más importantes de los últimos 10 años y su propagación temporal

El esquema de la Tesis de Maestría se muestra en la Figura 2



**Figura 2.** Esquema de la tesis

#### **4. MATERIALES-ÁREA DE ESTUDIO**

##### **a) Datos de Precipitación**

Se contaron con datos de precipitaciones mensuales obtenidas de 48 estaciones meteorológicas de la Llanura Pampeana pertenecientes a la red oficial del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina, cuyos datos abarcan el período 1981 al 2017. El hecho de considerar un período continuo de más de 30 años para la estimación de los parámetros de cualquier distribución de probabilidades reduce la influencia de fluctuaciones climáticas naturales (Lamb y Changnon, 1988).

Los datos mensuales de precipitaciones fueron consistidos, buscando datos erróneos, dudosos o faltantes; contando una alta fidelidad final en los datos de lluvias. Se descartaron 16 series de lluvias por el comienzo de las series luego de la década del 80s o 90s y 2 estaciones por estar muy al norte de la zona de estudio (Reconquista y Villa María del Río Seco). Dentro de las 18 estaciones descartadas, hay 6 estaciones muy cercanas ubicadas en el Gran Buenos Aires, para alcanzar una distribución espacial lo más uniforme posible y que no exista información redundante y que no aporte nuevos rasgos a la estructura de los datos. Además se analizaron los períodos de datos faltantes, admitiendo un máximo del 5% del total de los datos.

Luego de estas consideraciones, se utilizaron las series temporales de precipitación de 30 estaciones meteorológicas que comprenden el período 1981-2017, que se presentan en el cuadro 1, junto a su denominación y coordenadas geográficas.

ESTACIONES METEOROLOGICAS	LATITUD (°S)	LONGITUD (°O)
AZUL AERO	-36,45	-59,50
BAHIA BLANCA AERO	-38,44	-62,10
BENITO JUAREZ AERO	-37,43	-59,47
BOLIVAR AERO	-36,15	-61,06
CORONEL SUAREZ AERO	-37,26	-61,53
DOLORES AERO	-36,21	-57,44
EZEIZA AERO	-34,49	-58,32
JUNIN AERO	-34,33	-60,55
LA PLATA AERO	-34,58	-57,54
MAR DEL PLATA AERO	-37,56	-57,35
NUEVE DE JULIO AERO	-35,27	-60,53
PEHUAIJO AERO	-35,52	-61,54
PIGUE AERO	-37,36	-62,23
PUNTA INDIO B.A.	-35,22	-57,17
TANDIL AERO	-37,14	-59,15
TRES ARROYOS AERO	-38,20	-60,15
CONCORDIA AERO	-31,18	-58,01
GUALEGUAYCHU AERO	-33,00	-58,37
PARANA AERO	-31,47	-60,29
CERES AERO	-29,53	-61,57
ROSARIO AERO	-32,55	-60,47
SAUCE VIEJO AERO	-31,42	-60,49
GENERAL PICO AERO	-35,42	-63,45
SANTA ROSA AERO	-36,34	-64,16
CORDOBA AERO	-31,18	-64,12
LABOULAYE AERO	-34,08	-63,22
MARCOS JUAREZ AERO	-32,42	-62,09
PILAR OBS.	-31,40	-63,53
RIO CUARTO AERO	-33,07	-64,14
VILLA DOLORES AERO	-31,57	-65,08

**Tabla 1.** Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.

#### b) Datos de Humedad de Suelo

En este estudio, se utilizó el producto SMOS Soil Moisture Level 3, obtenido a partir de la página francesa de distribución Centre Aval de Traitement des Données SMOS (CATDS, <https://www.catds.fr/>). A partir de este producto se obtuvieron las estimaciones de humedad en la capa superior del suelo en la Llanura Pampeana (~5 cm), las cuales están disponibles desde enero de 2010 hasta la actualidad. Este producto se disemina a través de la Agencia Espacial Europea (ESA), a través de la cuadrícula de Tierra Icosahedral Snyder Equal Area con nodos igualmente espaciados a aproximadamente 15 km, conocida como Grid Global Discrete (DGG) (Kerr et al, 2013). Se obtuvo el producto L3, que ofrece las estimaciones mensuales de humedad en las pasadas ascendentes y descendentes del satélite; compuesto a partir de información diaria. De cada imagen mensual de humedad se obtuvo la estimación de humedad

puntual de las estaciones de la tabla 1, correspondientes al centro del pixel más cercano a cada localidad de la Llanura Pampeana, utilizando la pasada ascendente. Se considera esta pasada ya que no se encontraron diferencias significativas en nuestra región entre las pasadas ascendentes y descendentes (Niclòs et al., 2015).

La cadena de procesamiento entrega productos en cuadrícula de 25 km en formato netCDF. Además, el nuevo producto L3SM MO muestra, en promedio, recuperaciones de humedad del suelo más húmedas que el producto L2SM SO. Este dato es positivo ya que resultados previos identificaron un sesgo negativo en las estimaciones de SMOS a partir del producto L2SM SO (Nicolòs et al., 2015). La comparación con los sitios locales mostró que la calidad de las recuperaciones es comparable entre L2SM SO y L3SM MO, aunque la distribución posee un mayor retraso en la disponibilidad del producto de 6 horas a 3.5 días, lo que puede ser una limitación para aplicaciones como pronóstico de inundaciones pero razonable para monitoreo de sequía y estudios de cambio climático.

En síntesis, en este estudio, se utilizó la humedad de suelo estimada mediante el producto SMOS Soil Moisture Level 3, correspondientes a la capa superior del suelo (~5cm) en la Llanura Pampeana, con paso de tiempo mensual durante el período 2010-2017. A partir de estos datos, se obtuvieron las anomalías de humedad de suelo respecto al promedio 2010-2017 para cada punto de grilla. Los fundamentos teóricos para la obtención de HDS a partir del producto SMOS se describen en la sección Metodología.

### c) Área de Estudio: Llanura Pampeana

La Llanura Pampeana comprende la totalidad de la provincia de Buenos Aires, sur de Santa Fe, sur de Entre Ríos, sur de Córdoba y este de La Pampa, con una extensión aproximada de 52,3 millones de hectáreas, siendo unas 51,4 millones de hectáreas consideradas tierras con aptitud para usos agrarios (Gómez et al., 1991). Esta región constituye el área núcleo de nuestro país por las condiciones naturales y el desarrollo que facilitó el aprovechamiento de la misma. Según el Censo Poblacional de 2010, la Llanura Pampeana alberga a 26.573.593 habitantes, lo que representa un 66,2% de la población total del país (INDEC, 2010). Pero más de un tercio se concentra en la ciudad de Buenos Aires y su conurbano, luego en ciudades de la ribera del río Paraná y Uruguay, zona costera bonaerense y cabecera de partidos y finalmente en menor proporción en el área rural.

La Llanura Pampeana abarca una vasta área de llanuras, con pendientes muy suaves (inferiores al 1%), sin grandes efectos topográficos, interrumpidos por los sistemas de sierras de Tandil y Ventana (500 a 1000 m.s.n.m. respectivamente) y en el oeste de la región en la provincia de Córdoba (Sierras Pampeanas, ~ 1668 msnm). El clima se puede caracterizar como templado-húmedo a subhúmedo, con veranos cálidos. Las temperaturas medias anuales oscilan entre 15°C en el sur a 18°C en el norte; en tanto que las lluvias varían de 600 mm en el suroeste a 1100 mm en el noreste (Burkart et al., 1999). En el noreste de la región de estudio las precipitaciones alcanzan los mayores valores en los meses de octubre/noviembre y marzo/abril; mientras que en el sector oeste y noroeste presenta un gradiente este-oeste con mayores valores de precipitación en los meses cálidos. En el centro se presentan las mayores

precipitaciones en marzo y máximos secundarios de octubre a febrero. Por último, el ciclo anual de precipitaciones es similar hacia el sur pero más pronunciado (Penalba y Vargas, 2008; Pántano et al., 2014).

Es frecuente la ocurrencia de extensos períodos de sequía y excesos hídricos que afectan la disponibilidad de agua e impactan sobre diversas actividades humanas, en especial sobre la productividad de los sistemas agropecuarios (Labraga et al., 2011).

En cuanto a los valores de evapotranspiración potencial mensual se observa un gradiente este-oeste con una disposición de las isolíneas en forma longitudinal de diciembre a marzo, mientras que de abril a junio se presenta un gradiente norte-sur que se va inclinando nuevamente en los meses de agosto a noviembre. Los valores más elevados de evapotranspiración se dan en el semestre cálido, asociados a una mayor amplitud térmica (Pántano, 2011).

El clima húmedo, junto a las características geoquímicas de los materiales sedimentarios y a los ciclos vegetativos del pastizal, han favorecido la formación de suelos con abundante materia orgánica y nutrientes con horizontes subsuperficiales arcillosos; dando suelos molisoles con gran aptitud agrícola (Burkart et al., 1999). En consecuencia las principales clases de textura del suelo en la región son franco, franco arcilloso y muestras de limo limoso, y el orden principal del suelo es molisol.

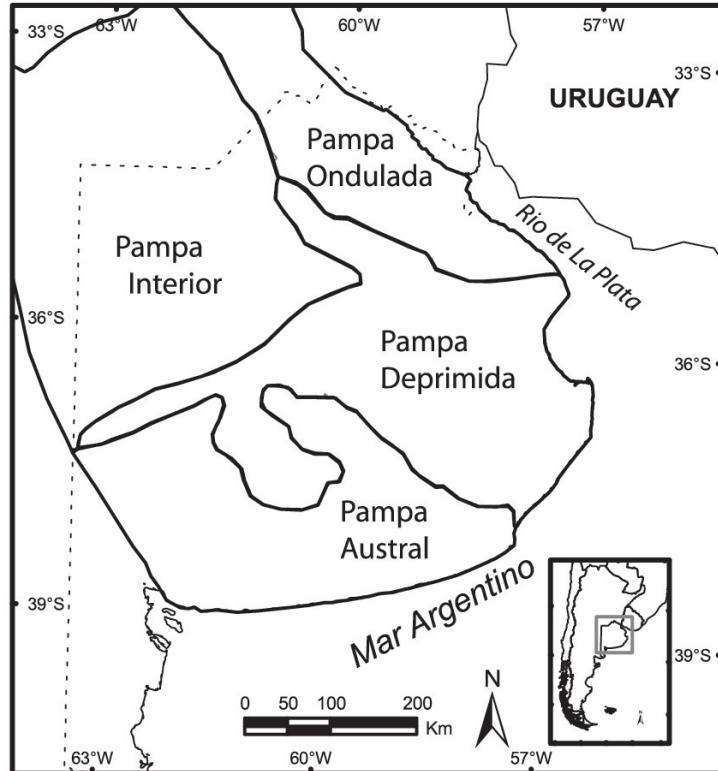
La Llanura Pampeana abarca cuatro áreas ecológicas, las que se diferencian principalmente sobre la base de características de relieve, suelo, patrón de drenaje y vegetación (Soriano et al., 1992): Pampa Ondulada, P. Interior, P. Deprimida y P. Austral (Fig. 3). También se realizaron diferentes clasificaciones climáticas en la región, basadas solamente en precipitaciones, precipitación y temperatura en conjunto y con velocidad del viento, humedad relativa y altitud con distintos número de subregiones (Aliaga, 2018).

La mayor parte de los suelos de la Llanura Pampeana son aptos para el desarrollo de la agricultura y la ganadería (Viglizzo et al., 2001). En la Llanura Pampeana se realiza una agricultura de secano de tipo extensiva, la cual ha sufrido una serie de importantes cambios en las últimas décadas. Ha variado la extensión de la superficie sembrada, los cultivos seleccionados, los niveles tecnológicos usados y la intensidad en el uso de insumos de diferente tipo (Ghida Daza, 2017). Este cambio permitió que la Argentina sea en la actualidad el principal exportador de aceite y harina de soja y ocupe lugares relevantes en el comercio de grano de soja, maíz y trigo (WASDE, 2016).

La superficie sembrada entre la década del 1980-90 correspondía a los cultivos de cereales (trigo y maíz) y a partir del 2000 aparece un cambio con el cultivo de soja. Este cultivo desplazó claramente a los cereales y al girasol. De este modo, en el período 2015/16 pasaron a sembrarse 32 millones de hectáreas, es decir un 128 % más que en la década de 1980, ocupando la soja un 62 % del total (Ghida Daza, 2017). Pero también hubo una variación en la producción. Las estimación del mismo autor muestra que en la década de 1980 predominaba la producción de cereales y las oleaginosas las menores, totalizando en 1980/81 una oferta global de 25,7 millones de toneladas, de los cuales el 50% corresponde a maíz y un 30% a trigo, siendo solo un 15% del total la producción de soja. En tanto que en el último ciclo considerado

(2015/16) la oferta total fue 109,1 millones de toneladas, o sea un 324 % mayor al inicio de la serie siendo soja el principal componente con 54 % del total mientras que maíz tiene un 33 % de la oferta y trigo sólo un 10 %.

En resumen, la Llanura Pampeana contiene cultivos de soja principalmente homogéneos, con cultivos de maíz dispersos. La cobertura terrestre de esta área corresponde principalmente a las tierras de cultivo de secano, y la altura de la vegetación varía de 1 a 2 m; por lo tanto, la cobertura terrestre se puede considerar cubierta terrestre nominal (vegetación baja), para lo cual los productos SMOS proporcionan datos confiables (Niclos et al., 2015).



**Figura 3.** La Llanura pampeana y sus sub-regiones en la provincia de Buenos Aires (Tomado de Soriano y otros, 1992).

## 5. METODOLOGÍA

### a) Índice de Precipitación Estandarizado

El Índice de Precipitación Estandarizado (IPE) fue propuesto por McKee et al. (1993) y se ha utilizado ampliamente en todo el mundo, por su desarrollo teórico, robustez y versatilidad en el estudio de las sequías (Redmont, 2002). El IPE muestra que la precipitación acumulada puede estar simultáneamente en exceso y en déficit según las diferentes escalas de tiempo consideradas y da información detallada de la precipitación acumulada y su desvío normalizado. El IPE se puede calcular para series mayores a 30 años de registros continuos. Se obtienen nuevas series con los valores acumulados en  $t$  meses, donde  $t$  es un parámetro que debe fijarse y toma valores de 1, 2, 3, ..., 12, ... 18, ...  $t$  meses, dependiendo de la escala temporal de interés. Estas nuevas series actúan como un promedio móvil, ya que el dato mensual es reemplazado por el total de los  $t$  meses anteriores, que incluye el presente, y la serie comienza en la posición  $t$ .

Se reconoce que la precipitación no se distribuye normalmente para períodos menores al año, por esta razón los datos mensuales son ajustados por una función Gamma Incompleta (Thom, 1966) y se definen las relaciones entre precipitación y probabilidad. Para cada valor de precipitación se calcula la probabilidad teórica y haciendo uso de una transformación de equiprobabilidad con la distribución acumulada normal inversa se obtiene el IPE. De este modo, se calcula la desviación de la precipitación respecto a una distribución Normal estándar, con promedio cero y varianza uno. En la Figura 4 se presenta esta transformación desde la distribución acumulada Gamma Incompleta aplicada a la variable precipitación (panel izquierdo) a la anomalía de la precipitación expresada como el IPE en unidades de desvío estándar para la misma probabilidad acumulada (sobre el panel de la derecha).

Entre las ventajas del IPE se destacan:

- 1) El IPE está relacionado directamente con la probabilidad de la precipitación acumulada
- 2) La precipitación utilizada en la escala temporal del cálculo del IPE puede ser utilizada para calcular el déficit o exceso de precipitación en dicho período.
- 3) El IPE puede ser calculado para otras variables hidrológicas, como por ejemplo caudales y agua subterránea.

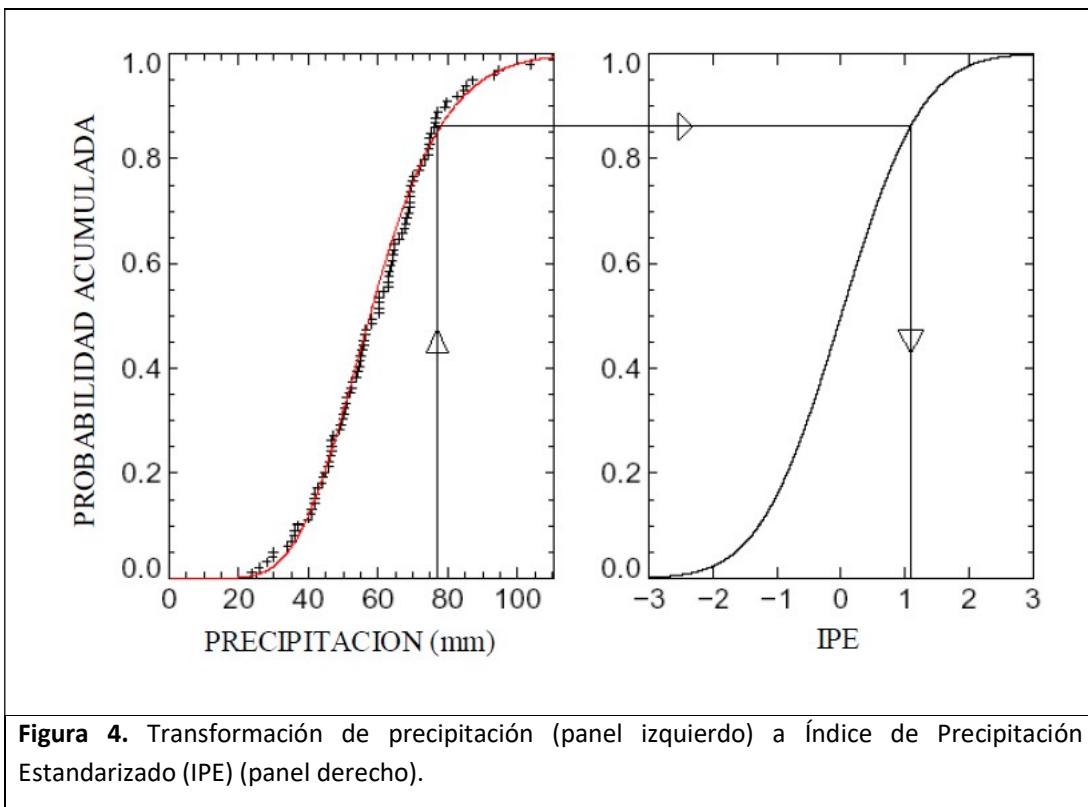
Por la característica de tener escala temporal variable, el IPE es apto para distintas aplicaciones: la escala mensual para fenómenos meteorológicos, el caudal de un río es representado mejor por escalas entre 2-6 meses, las sequías agrícolas son replicadas por el IPE de 2-3 meses y aplicaciones climáticas y movimientos de agua subterránea con escalas de 12-48 meses (Lloyd-Hughes y Saunders, 2002). Estos valores de escala temporal son indicativos, en general, para las problemáticas indicadas, pero deben ser utilizadas como una orientación ante un problema físico de la realidad.

El IPE sólo se basa en los datos de lluvias y ha sido aceptado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) como un índice de referencia de sequía en todo el mundo, porque puede identificar diferentes tipos de sequía que se calculan en diferentes escalas de tiempo (Hayes et al., 2011). La estandarización permite al IPE determinar la severidad de un evento de sequía,

así como la probabilidad de la precipitación necesaria para poner fin a la sequía actual. También permite que el IPE se calcule en cualquier ubicación y en cualquier escala de tiempo, dependiendo de los impactos de interés para el usuario.

Se puede utilizar el valor del IPE como un indicador de los períodos de sequías y excesos hídricos, y sus correspondientes probabilidades de ocurrencia de cada categoría, que provienen de la función de densidad de probabilidad normal (ver Tabla 2). Por ejemplo en una localidad en un dado mes, la condición de déficit moderado ( $IPE \leq -1.0$ ) posee una probabilidad de ocurrencia de 15.9%; mientras que un extremo seco ( $IPE \leq -2.0$ ) tiene una probabilidad de 2.3%.

En este trabajo se calcularon las series de IPE en escalas de 1 a 12 meses para la serie temporal de precipitación de cada localidad; con el objetivo de disponer de una variedad de series de IPE para relacionarlos con las estimaciones de humedad obtenidas de la misión SMOS.



**Figura 4.** Transformación de precipitación (panel izquierdo) a Índice de Precipitación Estandarizado (IPE) (panel derecho).

Valor de IPE	CATEGORIA	PROBABILIDAD
2.00 o mas	Extremadamente Húmedo	2.3%
1.50 a 1.99	Severamente Húmedo	4.4%
1.00 a 1.49	Moderadamente Húmedo	9.2%
0 a 0.99	Suavemente Húmedo	34.1%
0 a -0.99	Suavemente Seco	34.1%
-1.00 a -1.49	Moderadamente Seco	9.2%
-1.50 a -1.99	Severamente Seco	4.4%
-2 o menos	Extremadamente Seco	2.3%

**Tabla 2.** Valores del IPE, su categorización y probabilidad asociada.

### b) Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS)-Humedad del Suelo

En la actualidad se están realizando grandes esfuerzos para estimar la HDS y, debido a las dificultades inherentes a las mediciones *in situ*, el enfoque de su recuperación con sensores remotos se ha convertido en una fuerte alternativa, debido a su cobertura espacial y temporal. La idea rectora consiste en desarrollar nuevos productos de HDS basados en sensores remotos para mejorar el monitoreo de la sequía en el futuro. Debido a la dificultad de extender las observaciones de HDS basadas en puntos a áreas más grandes, la detección remota por microondas representa un enfoque alternativo para describir de forma espacial continua el contenido de agua del suelo (Schmugge et al., 2002). La detección remota no pretende reemplazar los métodos de medición *in situ*, los cuales proporcionan datos de alta calidad en un perfil de suelo en una determinada ubicación. La ventaja de los sensores remotos está en el mapeo de las condiciones a escala regional, continental e incluso global y repetitiva.

En las frecuencias de las microondas, la característica más llamativa de la emisión de la superficie de la Tierra es el gran contraste entre el agua y el suelo, medida por las diferencias en sus constantes dieléctricas. La constante dieléctrica es una propiedad macroscópica y define la polaridad de una sustancia, y tiene estrecha relación con el momento dipolar total de la sustancia. En este valor influyen varios factores, como el peso molecular, la forma de la molécula, la dirección de sus enlaces -geometría de la molécula- (Angella et al., 2016). Dado que la constante dieléctrica del suelo es baja (entre 2 y 4) y la del agua es muy alta (alrededor de 80), la constante dieléctrica de un suelo húmedo aumentará y estará muy condicionada por el contenido de agua de dicho suelo (Dobson et al., 1985). Por lo tanto, a medida que el contenido hídrico del suelo aumenta, la constante dieléctrica también lo hace, por lo que ofrece un mecanismo para la detección remota del contenido de humedad de los suelos mediante la observación de su emisividad en las frecuencias de microondas (Moran et al., 2004). En consecuencia, la medición en microondas depende en gran medida de las propiedades dieléctricas del objetivo, que para el suelo es una función de la cantidad de agua

presente. Los resultados sugieren que es posible determinar el contenido de humedad de la capa superficial del suelo aproximadamente  $\frac{1}{4}$  de una longitud de onda de espesor, es decir, aproximadamente una capa de 0–5 cm utilizando una longitud de onda de 21 cm (Schmugge et al., 2002). Los principales factores que afectan la precisión de la determinación de la HDS incluyen principalmente la cobertura vegetal y luego las propiedades del suelo y la rugosidad de la superficie. En general, se ha encontrado que las longitudes de onda más largas son mejores para aumentar la profundidad de muestreo y reducir los efectos del ruido.

En consecuencia, los métodos en las microondas pasivos miden la emisión térmica natural de la superficie terrestre utilizando detectores sensibles, mientras que la intensidad de esta emisión se expresa como una temperatura de brillo (TB). Luego, es necesario desarrollar algoritmos para convertir las observaciones de la TB en información cuantitativa sobre la HDS en grandes áreas heterogéneas de manera regular, mediante la ejecución de grandes experimentos internacionales (Wang and Qu, 2009).

La HDS se puede estimar utilizando un radiómetro pasivo o mediciones de radar activo. Se ha demostrado que tanto la temperatura de brillo del radiómetro como las mediciones de retrodispersión del radar son sensibles a la HDS. El microondas pasivo tiene más posibilidades de monitorear la HDS a gran escala, pero tiene una resolución espacial baja. El microondas activo puede proporcionar una alta resolución espacial pero tiene una baja frecuencia de revisión y es más sensible a la rugosidad del suelo y la vegetación.

Las misiones satelitales que se centran en las observaciones de la HDS basadas en la longitud de onda de banda L, más adecuada para la recuperación de la humedad del suelo, están actualmente en curso en microondas pasivas en las misiones Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) de la Agencia Espacial Europea (ESA) y Soil Moisture Active Passive (SMAP) de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA). La Comisión de Actividades Espaciales (CONAE) de Argentina puso recientemente en órbita el primer satélite de la misión SAOCOM. El instrumento principal del SAOCOM 1 es un sensor activo que consiste en un Radar de Apertura Sintética (SAR, por sus siglas en inglés Synthetic Aperture Radar) polarimétrico, que opera en el rango de las microondas en banda L ([www.conae.gov.ar](http://www.conae.gov.ar)). Uno de los objetivos centrales de los satélites SAOCOM es la medición de la HDS y la banda L empleada tiene la capacidad de penetrar a través de la superficie hasta 2 metros de profundidad dependiendo del tipo de suelo. Los mapas de HDS serán obtenidos principalmente sobre un área de interés de alrededor de 83 millones de hectáreas de la Llanura Pampeana argentina ([www.invap.com.ar](http://www.invap.com.ar)).

El satélite SMOS se lanzó en noviembre de 2009, y es la primera misión específicamente diseñada para recuperar HDS del espacio (Kerr et al., 2001). SMOS es un satélite de microondas pasivo de banda L que mide las TB con un radiómetro Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis (MIRAS en inglés) (Mecklenburg et al., 2015). MIRAS es un radiómetro interferométrico que mide la emisión térmica de la Tierra en el rango de frecuencia protegido de 1.4 GHz en polarización total y para ángulos de incidencia desde 0° a unos 60°. Las emisiones de microondas de la superficie de la Tierra en la banda L se atenúan con materiales dieléctricos, por lo tanto, estos patrones de atenuación se utilizan para estimar la HDS para los primeros 5 cm de suelo. SMOS tiene un tiempo de revisión de 3 días en

Ecuador, una precisión deseada de  $0.04 \text{ m}^3 / \text{m}^3$  y una resolución espacial nativa de aproximadamente 35–50 km (Parrens et al., 2011; Rodriguez-Fernández et al., 2016).

#### **c) Metodología de Clúster – Humedad del Suelo**

Con el fin de resumir la información de HDS y detectar la existencia de patrones espaciales de igual comportamiento temporal, se procedió a la aplicación de la metodología de Clúster. El análisis de Clúster es un método útil para determinar subregiones o grupos homogéneos y coherentes de una variable. Mediante la aplicación de este método se ordenan las observaciones en grupos tales que el grado de asociación natural sea el más elevado entre miembros de un mismo grupo y el más bajo entre miembros de grupos diferentes.

El método de  $k$ -means (MacQueen, 1967) que emplea el término “ $k$ -medio” para indicar el proceso de asociar cada dato a un determinado clúster (entre  $k$  clústers) con el centroide más cercano (media). La bondad de este método es que el centroide o media del clúster se calcula con los elementos reales del clúster, y no por su ubicación o membresía al final del ciclo de reubicación.

Los pasos del método de  $k$ -means para elegir los  $m$  datos para el clúster  $k$  se pueden resumir como:

1. Selecciona los primeros  $k$  datos del conjunto de datos como clústers de un solo elemento cada uno.
2. Asigna cada uno de los restantes  $m-k$  datos a un clúster con el centroide o media más cercano, y posteriormente recalcula la media del clúster obtenido.
3. Una vez que todos los datos han sido asignados a algún clúster  $k$  mediante el paso 2), toma los centroides existentes en cada clúster como “puntos semillas” y realiza una pasada más de los datos, asignando cada uno de ellos a la semilla puntual más cercana. Ya que se realiza un recálculo de los “puntos semillas” una vez que han sido distribuidos todos los datos, no interesa el orden de ingreso de los mismos.

Se obtiene una convergencia del método hasta que ningún dato cambie su lugar en el clúster al comparar con la  $k$  media, esto se logra aproximadamente con no más de 5 iteraciones.

Otra cuestión paralela es la determinación del número de clústers a utilizar, que es una limitante de este método. No es importante por sí mismo el número de clústers, pero esta elección está íntimamente relacionada con las inferencias acerca de la estructura de los datos. Por ese motivo se debe ensayar con diversos números de clústers y obtener de esta manera una variedad de posibilidades o alternativas de clasificación y evaluar adecuadamente el número de los mismos.

#### **d) Correlación de Pearson**

Con el fin de evaluar la relación entre los índices de precipitaciones y las variables de humedad del suelo, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson.

Para tal fin, en cada localidad se extrajo el valor de HDS de cada nodo más cercano a las coordenadas de las localidades de Tabla 1 y se relacionó a) éstas estimaciones puntuales de la HDS mensuales y b) las anomalías de humedad del suelo (aHDS) mensuales con las 12 series de IPE (de acumulación mensual a 12 meses), o sea IPE1, IPE2, IPE3, ..., IPE12; mediante el cálculo de los coeficientes de correlación de Pearson.

La ecuación para el coeficiente de correlación es:

$$r_{xy} = \frac{\text{cov}(x, y)}{S_x S_y}$$

donde  $\text{cov}(x, y)$  es la covarianza de  $x$  e  $y$ ,  $S_x$  es la desviación estándar de  $x$ ,  $S_y$  es la desviación estándar de  $y$ .

En consecuencia en cada localidad se obtuvieron 12 valores de coeficientes de correlación entre las distintas series de IPE y HDS y otros 12 coeficientes entre las series de IPE y aHDS. La significancia de las correlaciones se evaluó para un nivel del 5%.

Para caracterizar las relaciones encontradas en las localidades se procedió a realizar un compuesto de las mismas, obteniendo un patrón común de relaciones. De esta manera se puede identificar a nivel regional de las relaciones entre los índices de precipitaciones y a) las humedades del suelo y b) anomalías de humedades del suelo, obtenidas en la Llanura Pampeana.

Además se identifica del compuesto de las relaciones entre todas las estaciones del año, las series de IPE que poseen mayores valores de los coeficientes de correlación; identificando de esta manera las series temporales de lluvias que mejor se relacionan con la HDS y aHDS a nivel regional.

#### e) Prueba Piloto: Índice SWDI

Teniendo en cuenta que la mayoría de los índices o métodos de evaluación de las sequías se basan en las variaciones de las precipitaciones y temperaturas, pero generalmente no consideran las propiedades específicas del suelo del sitio (Torres et al., 2013) este trabajo propone realizar una primera aproximación al cálculo del SWDI Soil Water Deficit Index en inglés), considerando la humedad del suelo como variable para su cálculo. El SWDI resulta de una adaptación del WDI (Martinez-Fernandez et al., 2005), y se define de la siguiente manera:

$$\text{SWDI} = 10 * (\Theta - \Theta_{CC}) / \Theta_{\text{Contenido de Agua Disponible}} \quad \text{con} \quad \Theta_{\text{Contenido de Agua Disponible}} = \Theta_{CC} - \Theta_{PM}$$

Donde

$\Theta$  = Humedad del suelo

$\Theta_{CC}$  = Capacidad de campo

$\Theta_{PM}$  = Punto de Marchitez

El SWDI es un cociente que es multiplicado por 10, y de esta manera se obtiene un rango de valores fácilmente interpretables, relacionado con la disponibilidad de agua en el suelo.

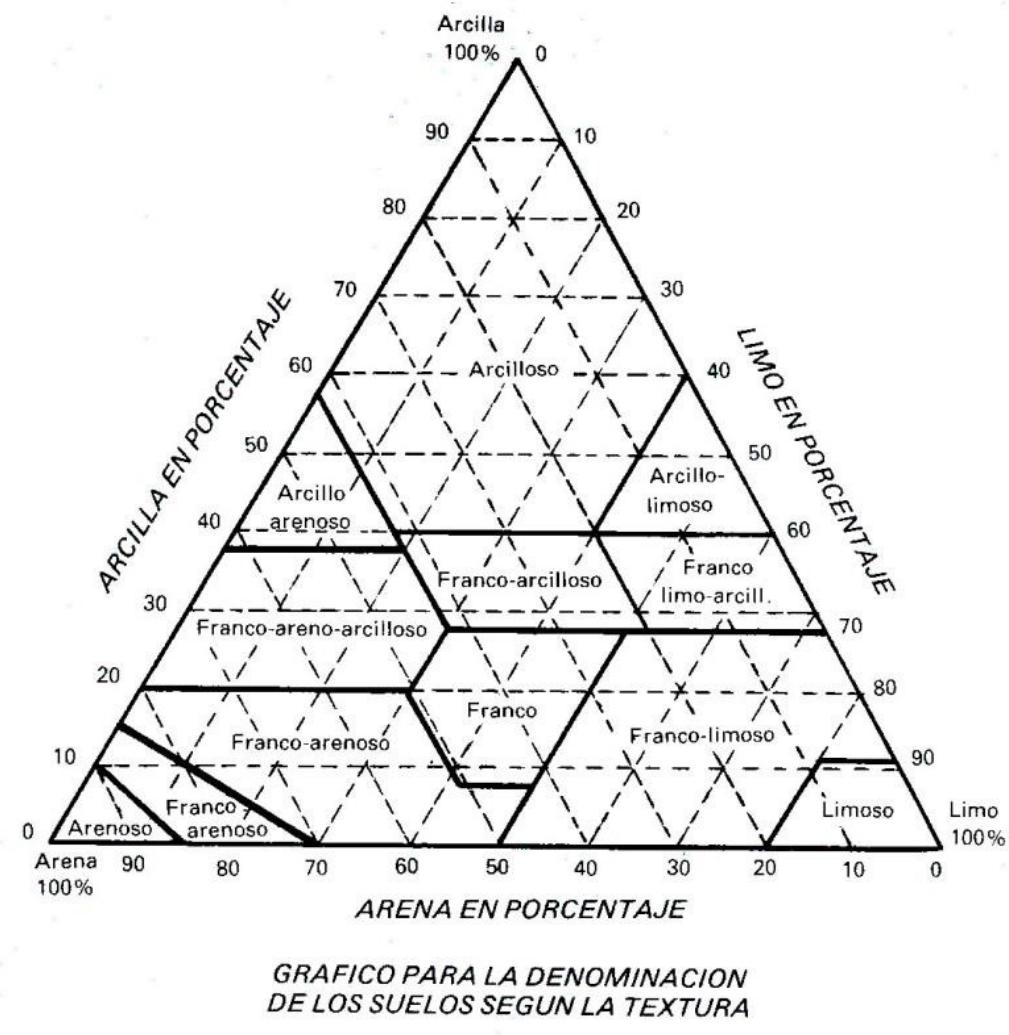
Cuando el SWDI es positivo, los suelos tienen exceso de agua; cuando es igual a cero, el suelo está en la capacidad de campo del contenido de agua (es decir, sin déficit hídrico). Finalmente cuando alcanza valores negativos indica una sequía en el suelo, y finalmente el déficit hídrico es absoluto (Punto de Marchitez) cuando el SWDI alcanza un valor  $\leq -10$ . En este punto, el contenido de agua del suelo está por debajo del límite inferior de agua disponible para las plantas (Savage et al., 1996). En el denominador se utiliza  $\Theta_{\text{Contenido de Agua Disponible}}$  para caracterizar y normalizar el déficit hídrico en el suelo.

Se adopta la Tabla 3 para clasificar la severidad de la sequía con SWDI, tomado de (Martínez-Fernández et al., 2015).

Los valores de  $\Theta_{CC}$  y  $\Theta_{PM}$  fueron calculados por dos metodologías. Una metodología es la de los Percentiles (Hunt et al., 2009), definidos como el Percentil 5 para el Punto de Marchitez y Percentil 95 para la Capacidad de Campo, de la serie de HDS que se disponga. La segunda metodología fue la utilización de los modelos de pedotransferencia (Piedallu et al., 2011; Schaap et al., 2001) para obtener dichos parámetros, con la ingesta de los porcentajes de **limo, arcilla y arena de la primera capa del suelo del INTA** (<http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/index.htm#Series>); con la ayuda de la clasificación del triángulo textural del departamento de agricultura de los EEUU (Figura 5), **datos disponibles en 6 sitios puntuales en la provincia de Buenos Aires**. Con esta información se procedió al cálculo de ambos parámetros hídricos en los primeros centímetros del suelo; no en todo el perfil. Esta decisión de estimar la  $\Theta_{CC}$  y  $\Theta_{PM}$  en la primera capa de suelo fue debido a la penetración de la onda de la misión SMOS, en los primeros 5 cm de suelo aproximadamente.

CATEGORIA DE SEQUÍA	SWDI
SIN SEQUÍA	$>0$
LEVE	$0 \text{ a } -2$
MODERADA	$-2 \text{ a } -5$
SEVERA	$-5 \text{ a } -10$
EXTREMA	$< -10$

**Tabla 3.** Categorías de severidad de SWDI (tomado de Martínez-Fernández et al., 2015)



**Figura 5.** Clasificación del triángulo textural del departamento de agricultura de los EEUU (USDA).

## 6. RESULTADOS

### a) Resultados de Clúster de HDS

Los datos mensuales de estimación de HDS de la misión SMOS en puntos discretos coincidentes o más cercanos a las estaciones meteorológicas utilizadas fueron utilizados para determinar áreas con similitudes en la variable HDS.

Para aplicar el método de *k*-means (MacQueen, 1967) se construyó la matriz con las 30 series de la estimación de HDS por mes en el período que abarca desde enero de 2010 hasta diciembre de 2017. Se empleó un valor de *k* variable entre 2 y 5 y se compararon los resultados de la clasificación para cada caso. Finalmente, para un valor de *k* = 4 se obtuvo una configuración de subregiones homogéneas de HDS que representa las características hidroclimáticas regionales de la Llanura Pampeana. Aunque son poco diferenciadas entre sí en su estructura interna, cada subregión muestra facetas de diferentes regímenes de la HDS. En la Figura 6 se presenta la región de estudio y sus subregiones obtenidas por este método de regionalización.

Las 4 regiones obtenidas corresponden al centro-norte de la provincia de Buenos Aires (C2), centro-sur de Santa Fe y Entre Ríos (C1), sur de la provincia de Buenos Aires y sudeste de La Pampa (C3) y límite oeste de la Llanura Pampeana (C4) (Figura 6), que concuerdan en grandes rasgos con las grandes áreas ecológicas ya mencionadas en la sección Llanura Pampeana (ver Figura 3). La región C2 presenta los mayores valores de HDS (Tabla 4), que concuerda con la región de grandes zonas de la Pampa Inundable, con escasa o nula pendiente que favorecen la permanencia de los excesos hídricos, y la Pampa Interior, caracterizada por la presencia de lagunas semipermanente (Damiano y Taboada, 2000). Los menores valores de HDS al norte de esta zona (región C1) se deben a las mayores pérdidas por evapotranspiración (Figura 7 B de Damario y Pascale, 1988). Hay una zona que abarca la diagonal desde el noroeste de La Pampa hacia el sur de Santa Fe y oeste de Entre Ríos (C4), que limita al sur con mayores valores de HDS de la región C2, que muestran distintos comportamientos frente a otros tipos de suelos principalmente. Las diferencias entre los clústers 3 y 4 muestran un mayor contenido de HDS en C3 en invierno y principios de la primavera respecto a lo observado en C4; en tanto que esta relación se invierte a fines de la primavera-principios del verano con mayores contenidos de HDS en C4 respecto a C3 (Figura 7 a).

Los resultados aquí obtenidos se relacionan con la clasificación realizada por Aliaga et al. (2017, Figura 4.8), donde C1 corresponde al clima subtropical allí encontrado, el C2 al clima templado húmedo y oceánico, el C3 al templado semiárido y continental y finalmente el C4 a una transición entre el templado continental y húmedo a subtropical. También los clústers de HDS poseen cierta similitud con las áreas obtenidas en otros trabajos con las precipitaciones mensuales (Scian, 1999; Penalba y Vargas, 2004) o las series de IPE3 (Penalba y Rivera, 2016).

En las 4 regiones se observa una onda anual definida, con máximos valores de humedad del suelo en los meses invernales y mínimos en la época cálida (Figura 7 a). Este resultado reflejaría el dominio de las pérdidas por evaporación y evapotranspiración en los meses cálidos, dando menores valores de HDS; y lo inverso en invierno; con mayores disponibilidades de HDS (ver Figura 7 b). Las pérdidas por evapotranspiración son tan importantes que

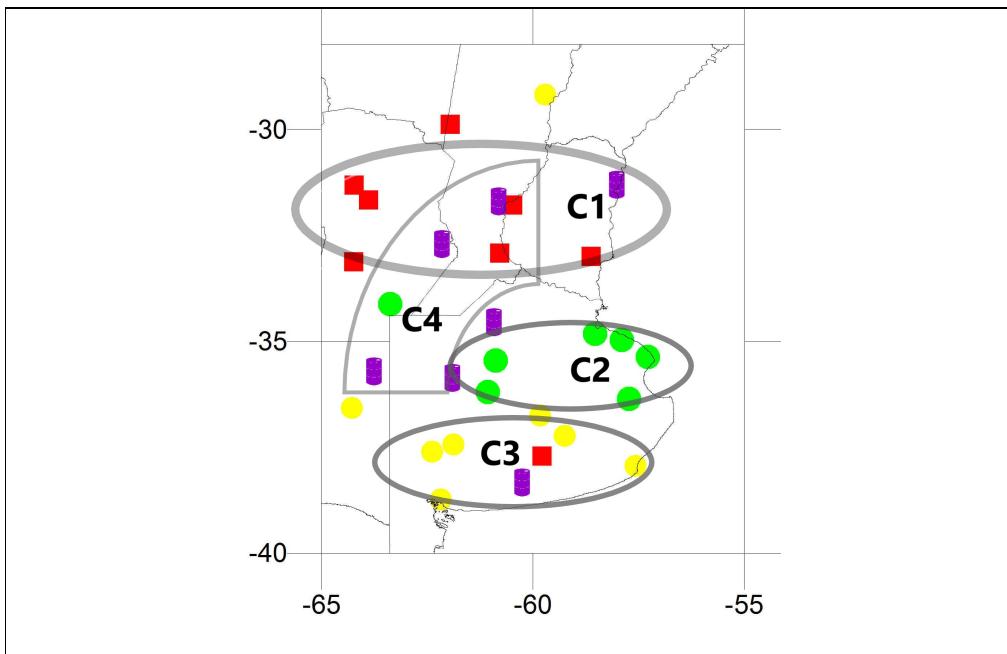
contrarrestan la estacionalidad de las lluvias, con máximos principales en otoño/primavera y luego en el verano y mínimos en el invierno (ver Figura 8). No hay diferencias significativas en la HDS de los meses cálidos entre los cuatro clústers; pero en los meses fríos se observa un incremento marcado de la HDS correspondiente al clúster 2, siendo mayor que el observado en las otras subregiones. Los mayores valores de HDS en los meses invernales en C2 es debido a la conjunción de los montos de lluvias, tasa de evapotranspiración y fundamentalmente escasas pendientes con áreas de encarcamiento semipermanente (Damiano y Taboada, 2000).

Los resultados del balance hídrico BOHA muestran que, en varias estaciones de la provincia de Buenos Aires, las mayores cantidades de almacenaje de agua en el suelo ocurren en los meses invernales (Antelo y Fernández Long, 2012), en concordancia con la HDS obtenida aquí por SMOS. Este fenómeno de altos almacenajes estaría asociado a la disminución de los valores de evapotranspiración y por lo tanto una mayor disponibilidad de agua para las plantas. En tanto que en los meses estivales se observan los mínimos valores de almacenaje, debidos al aumento de la temperatura y por lo tanto una mayor evapotranspiración. En consecuencia, los resultados de la HDS del suelo (figura 7 a) se tienen que considerar como una contribución al balance hídrico y no como una consecuencia de las precipitaciones solamente (figura 8), siendo esa una parte importante, pero no la única de un balance hídrico. Es más, las distribuciones mensuales de HDS son inversas a las de lluvias, con mínimos y máximos desfasados en aproximadamente 6 meses. *Entonces los valores de HDS son una herramienta rápida y aproximada de conocer el balance hídrico en una región, teniendo en cuenta las precipitaciones y las pérdidas por evapotranspiración.*

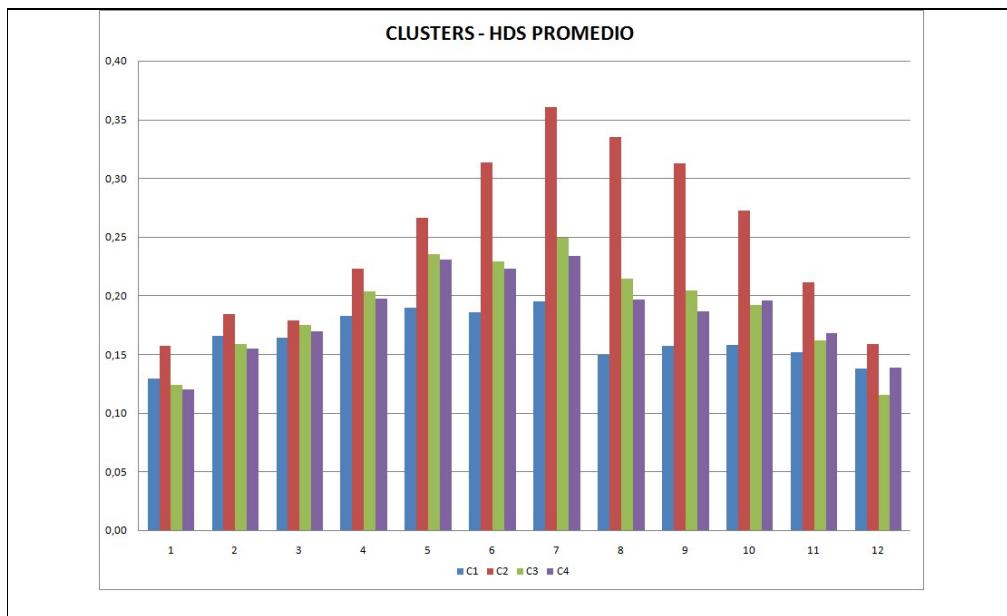
Con precipitaciones por encima de lo normal en otoño e invierno ocurren excesos invernales importantes y perjudiciales, que pueden suceder cada 15 a 20 años, excediendo la capacidad de saturación e infiltración de los suelos. Estos excesos producen acumulaciones de agua superficiales, que sumada a la escasa pendientes e insuficiente desague de la llanura, inundan los campos, afectando la producción agrícola-ganadera. Un ejemplo de esta problemática es el evento ocurrido en invierno de 1980 en el centro y sudeste de la provincia de Buenos Aires (Damario y Pascale, 1988).

CLÚSTER	VALOR MEDIO HDS (M3/M3)
1	<b>0.16</b>
2	<b>0.25</b>
3	<b>0.19</b>
4	<b>0.18</b>

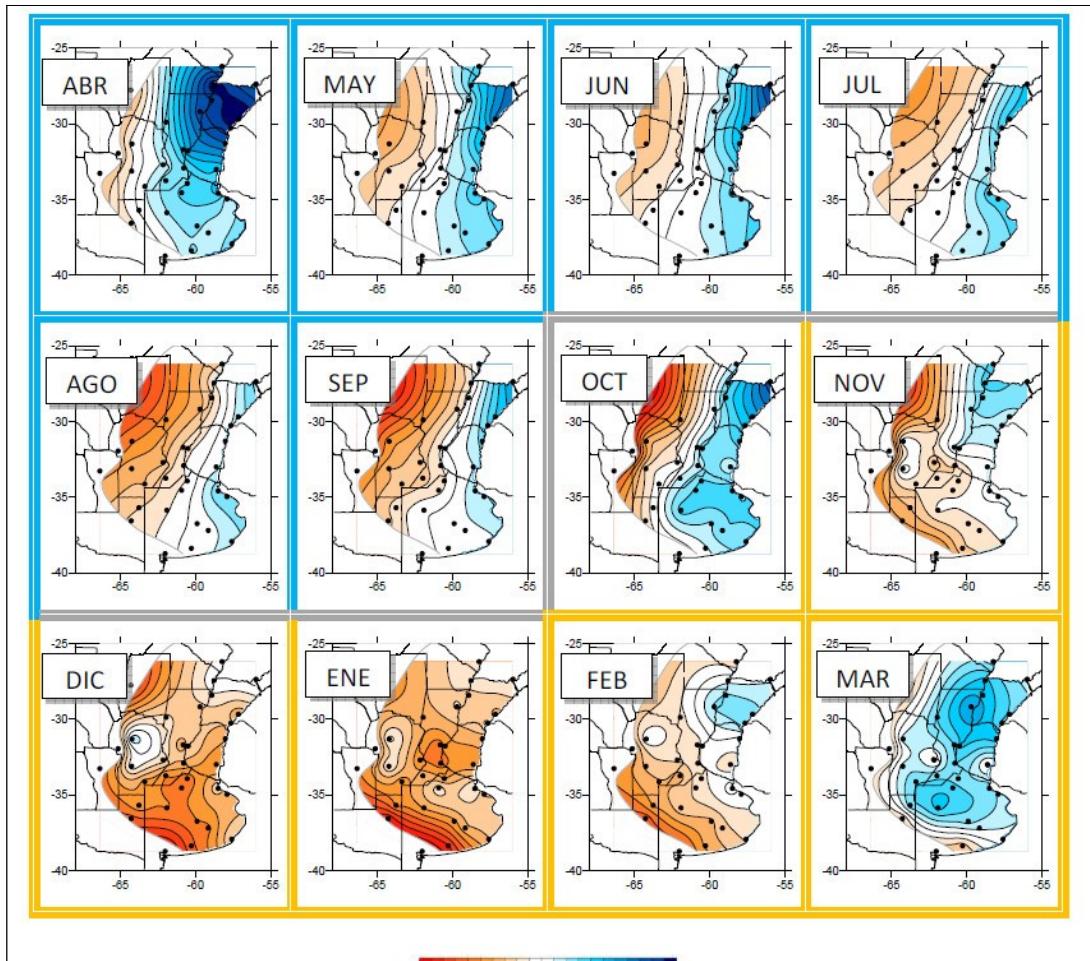
**Tabla 4.** Características de la humedad del suelo estimada a partir de SMOS para cada subregión en la Llanura Pampeana.



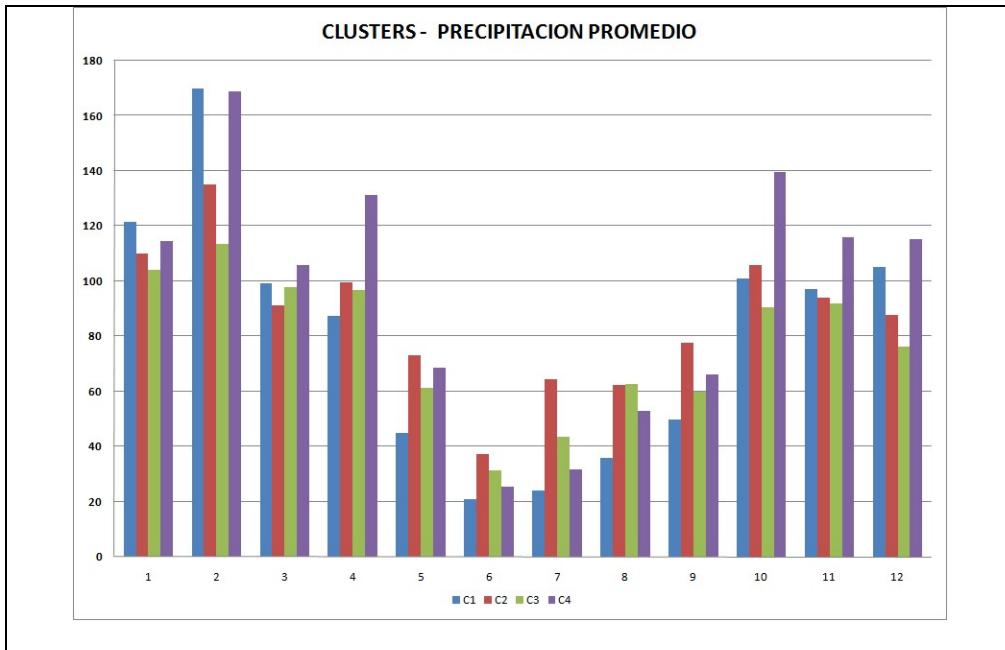
**Figura 6.** Regionalización de los valores temporales de Humedad del Suelo.



**Figura 7 a)** Humedad del Suelo mensual promedio en cada clúster.



**Fig 7 b)** Distribución espacial de la P-EP media (mm) en contornos para el período 1970-2006 (extraída de Pántano et al., 2014).



**Figura 8.** Precipitaciones mensuales en cada clúster.

**b) Evaluación de las relaciones entre la precipitación y la HDS.**

Para evaluar las relaciones entre las precipitaciones y la HDS se evalúo el índice de precipitación estandarizado IPE( $t$ ), para  $t = 1, 2, \dots, 6, \dots, 12$  meses y la HDS obtenida de la misión SMOS en 30 estaciones meteorológicas en la Llanura Pampeana.

Se decidió examinar en forma exploratoria las series de IPE con

- los valores absolutos de HDS y
- las anomalías mensuales de HDS (aHDS) (tomando en cuenta la climatología de los 8 años de datos SMOS).

Se calcularon los coeficientes de correlación entre IPE y HDS e IPE y aHDS, exhibiendo los resultados en las Tablas 5 y 6 respectivamente.

La Figura 9 presenta para los coeficientes de correlación promedio, considerando todas las estaciones, entre las series de IPE y la HDS e IPE y aHDS. Los valores más significativos se obtienen para las series de IPE2 e IPE5 (CC cercanos a 0.5) y luego decae lentamente para IPE en ventanas de tiempo mayores a 6.

De las tablas 5 y 6 y la figura 9 se desprende que la variable aHDS se relaciona más fuertemente con las diferentes series de IPE respecto a la variable HDS. En consecuencia se adopta trabajar con las aHDS de ahora en adelante por su mejor desempeño.

Los coeficientes de correlación entre aHDS e IPE3 a IP5 adquieren prácticamente el mismo valor (0.55), permitiendo tomar a cualquiera de estas series de IPE como la más sensitiva con las anomalías de HDS en los primeros centímetros del suelo en la Llanura Pampeana. Se adopta la serie de IPE3 como representativa de las condiciones de sequía agrícola, por ser una serie de

fácil cálculo y disponibilidad, ya que numerosos centros de investigación y operativos, entre ellos el Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur (<http://www.crc-sas.org/es/>) cuentan con un monitoreo de sequías basado en este índice. Similares resultados fueron obtenidos por Spennemann et al. (2015) considerando la comparación de la precipitación en el Sudeste de Sudamérica y las estimaciones de humedad de suelo de GLDAS en distintos horizontes de suelo.

La figura 10 muestra los coeficientes de correlación (CC) entre las series de IPE y aHDS. Las correlaciones más altas se observan en Laboulaye, Bolívar, Dolores y 9 de Julio, mientras que los valores más bajos se dan en Villa Dolores, Rosario, La Plata y Paraná. El CC promedio (línea roja punteada) muestran valores significativos entre  $r = 0,4$  y  $r = 0,5$  ( $r_{crítico} = 0,2$  al 95% de significancia). Lo mismo se observa con la relación entre el IPE y los valores absolutos de HDS (no se muestra). Los coeficientes de correlación más bajos se obtuvieron en las series temporales de Villa Dolores ( $r \sim 0.2$ ) mientras que los mejores resultados en promedio se observaron en Laboulaye y Bolívar, con valores superiores a  $r = 0,7$  (Figura 10).

Los bajos valores de CC para Villa Dolores en todas las ventanas temporales de IPE se deben a la mala estimación de humedad por SMOS por la presencia de un moderado efecto topográfico, como sierras y serranías (Kerr et al, 2012; Mialon et al, 2008; Paredes y Barbosa, 2017). Las correlaciones de las series temporales correspondientes a la estación La Plata también presentaron valores bajos, lo cual podría estar asociado a que las estimaciones SMOS poseen un error en cercanía a cuerpos de agua (Kerr et al, 2012; Grings et al, 2015). En consecuencia, se excluyen estas 2 estaciones en los futuros cálculos.

El comportamiento de los coeficientes de correlación en los clústers definidos anteriormente (Figura 11) permite establecer que en el Clúster 1 las relaciones entre la aHDS y las series de IPE decaen al aumentar la ventana temporal de acumulación de lluvias mensuales (IPE 3 o mayor). En tanto que en C2 las relaciones son mayores para IPE1 e IPE2 y luego se mantienen en valores de correlación mayores a 0.6, sin grandes variaciones, entre IPE3 e IPE10. Finalmente en C3 y C4 estas relaciones se mantienen casi constantes entre IPE1 e IPE12, del orden de  $r = 0.5$  en promedio, exhibiendo más variabilidad en C3 y luego decaen (a partir del IPE7/IPE8). En C4 las series de General Pico y Pehuajó presentan coeficientes de correlación que se incrementan a medida que aumenta la acumulación de precipitaciones en el tiempo. Como resumen, los coeficientes de correlación muestran una estrecha asociación entre la aHDS y las series de IPE; en general las relaciones son significativas entre la aHDS y las series de IPE1 a IP6 y luego estas relaciones disminuyen, siendo en algunos casos no significativas (de IPE7 a IPE12).

Con el fin de estudiar la estacionalidad de las relaciones entre IPE3 y aHDS se calcularon los coeficientes de correlación estacionales; agrupando los datos en las cuatro estaciones: verano (diciembre-enero-febrero), otoño (marzo-abril-mayo), invierno (junio-julio-agosto) y primavera (septiembre-octubre-noviembre). El promedio de todos los sitios estudiados, se observa que los coeficientes de correlación son mínimos en verano y máximos en la primavera (ver Figura 12). Esto indicaría que en los meses más cálidos la aHDS no responde tan directamente a la precipitación, por el peso de otros factores de balance hídrico; principalmente por los altos requerimientos de la evapotranspiración. En tanto que en la época primaveral la aHDS y las

lluvias están más relacionadas, siendo una consecuencia de la recarga de la humedad del suelo en las primeras capas.

MES	AZUL	B BLANCA	BENITO JUAREZ	BOUVAR	C SUAREZ	CERES	CONCORDIA	CORDOBA	DOLORES	EZEIZA	G PICO	GUALEGUAYCHU	JUNIN	LA PLATA	LABOULAYE
1	0.56	0.42	0.50	0.40	0.59	0.45	0.46	0.40	0.42	0.35	0.33	0.47	0.37	0.28	0.46
2	0.66	0.40	0.61	0.59	0.63	0.59	0.46	0.52	0.56	0.36	0.45	0.41	0.45	0.34	0.60
3	0.68	0.43	0.58	0.66	0.62	0.55	0.43	0.50	0.62	0.38	0.54	0.37	0.50	0.37	0.66
4	0.65	0.47	0.63	0.68	0.57	0.62	0.38	0.47	0.64	0.28	0.59	0.30	0.49	0.33	0.70
5	0.61	0.50	0.62	0.70	0.56	0.59	0.30	0.42	0.64	0.22	0.60	0.30	0.47	0.31	0.71
6	0.56	0.49	0.56	0.70	0.52	0.60	0.29	0.38	0.63	0.19	0.61	0.27	0.42	0.25	0.73
7	0.47	0.46	0.50	0.66	0.47	0.61	0.30	0.35	0.61	0.16	0.66	0.31	0.43	0.24	0.75
8	0.43	0.43	0.43	0.66	0.44	0.56	0.30	0.33	0.58	0.18	0.68	0.30	0.41	0.24	0.79
9	0.38	0.41	0.37	0.62	0.39	0.49	0.30	0.31	0.54	0.17	0.69	0.29	0.43	0.24	0.80
10	0.33	0.42	0.35	0.61	0.34	0.48	0.29	0.31	0.50	0.17	0.70	0.27	0.44	0.21	0.81
11	0.33	0.39	0.31	0.61	0.32	0.43	0.27	0.32	0.47	0.19	0.71	0.23	0.44	0.21	0.80
12	0.33	0.40	0.27	0.59	0.32	0.41	0.26	0.33	0.44	0.21	0.72	0.21	0.39	0.20	0.77

MES	M D PLATA	M JUAREZ	NUEVE DE JULIO	P INDIO	PARANA	PEHUAIJO	PIGUE	PILAR	RIO CUARTO	ROSARIO	S VIEJO	SANTA ROSA	TANDIL	TRES ARROYOS	V DOLORES
1	0.36	0.32	0.44	0.26	0.50	0.24	0.58	0.39	0.39	0.32	0.34	0.55	0.42	0.44	0.18
2	0.50	0.41	0.60	0.35	0.40	0.44	0.55	0.50	0.51	0.30	0.40	0.64	0.46	0.55	0.32
3	0.47	0.39	0.62	0.34	0.31	0.55	0.58	0.45	0.48	0.30	0.43	0.58	0.44	0.50	0.23
4	0.46	0.39	0.63	0.30	0.26	0.61	0.58	0.34	0.39	0.29	0.43	0.51	0.48	0.48	0.19
5	0.42	0.39	0.59	0.26	0.20	0.64	0.60	0.27	0.29	0.31	0.47	0.55	0.49	0.46	0.19
6	0.42	0.39	0.57	0.25	0.15	0.66	0.58	0.26	0.27	0.30	0.47	0.50	0.46	0.44	0.15
7	0.39	0.32	0.56	0.24	0.12	0.68	0.55	0.21	0.26	0.29	0.45	0.54	0.42	0.39	0.16
8	0.36	0.29	0.56	0.25	0.11	0.69	0.57	0.17	0.23	0.30	0.40	0.56	0.41	0.33	0.14
9	0.37	0.32	0.57	0.24	0.11	0.70	0.54	0.17	0.22	0.27	0.37	0.54	0.35	0.28	0.13
10	0.35	0.32	0.60	0.25	0.10	0.73	0.52	0.20	0.19	0.23	0.37	0.51	0.35	0.29	0.15
11	0.36	0.23	0.62	0.24	0.11	0.75	0.53	0.16	0.14	0.16	0.38	0.52	0.35	0.23	0.15
12	0.40	0.16	0.62	0.25	0.06	0.77	0.52	0.15	0.08	0.14	0.34	0.50	0.35	0.21	0.16

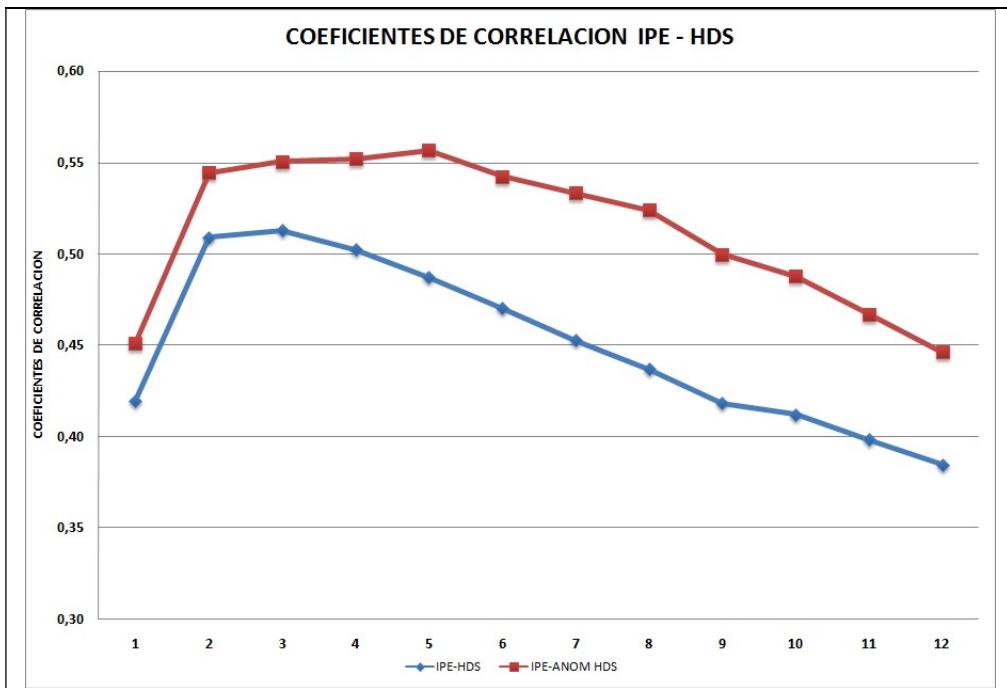
Tabla 5 Coeficientes de Correlación entre IPE y HDS (en negro 95% confianza)

MES	AZUL	B BLANCA	BENITO JUAREZ	BOUVAR	C SUAREZ	CERES	CONCORDIA	CORDOBA	DOLORES	EZEIZA	G PICO	GUALEGUAYCHU	JUNIN	LA PLATA	LABOULAYE
1	0.55	0.44	0.61	0.37	0.61	0.48	0.51	0.38	0.48	0.35	0.29	0.58	0.39	0.23	0.46
2	0.63	0.42	0.72	0.57	0.65	0.61	0.59	0.51	0.59	0.32	0.41	0.54	0.52	0.26	0.61
3	0.61	0.43	0.61	0.65	0.63	0.54	0.59	0.53	0.66	0.40	0.51	0.52	0.60	0.30	0.71
4	0.59	0.44	0.63	0.69	0.61	0.58	0.56	0.55	0.70	0.36	0.58	0.47	0.62	0.30	0.74
5	0.60	0.46	0.63	0.73	0.65	0.54	0.50	0.51	0.73	0.36	0.62	0.48	0.62	0.33	0.74
6	0.59	0.45	0.57	0.74	0.61	0.55	0.47	0.49	0.75	0.37	0.64	0.39	0.55	0.27	0.75
7	0.56	0.41	0.53	0.73	0.58	0.57	0.48	0.50	0.75	0.35	0.67	0.40	0.56	0.26	0.77
8	0.57	0.40	0.46	0.74	0.56	0.55	0.46	0.50	0.73	0.39	0.68	0.36	0.55	0.28	0.81
9	0.56	0.39	0.41	0.72	0.51	0.50	0.41	0.44	0.70	0.35	0.71	0.32	0.55	0.30	0.82
10	0.50	0.42	0.41	0.70	0.45	0.52	0.37	0.41	0.65	0.33	0.72	0.29	0.55	0.26	0.82
11	0.48	0.41	0.35	0.68	0.42	0.48	0.31	0.42	0.60	0.33	0.73	0.24	0.52	0.25	0.81
12	0.44	0.43	0.29	0.64	0.38	0.48	0.30	0.43	0.55	0.31	0.74	0.22	0.46	0.23	0.79

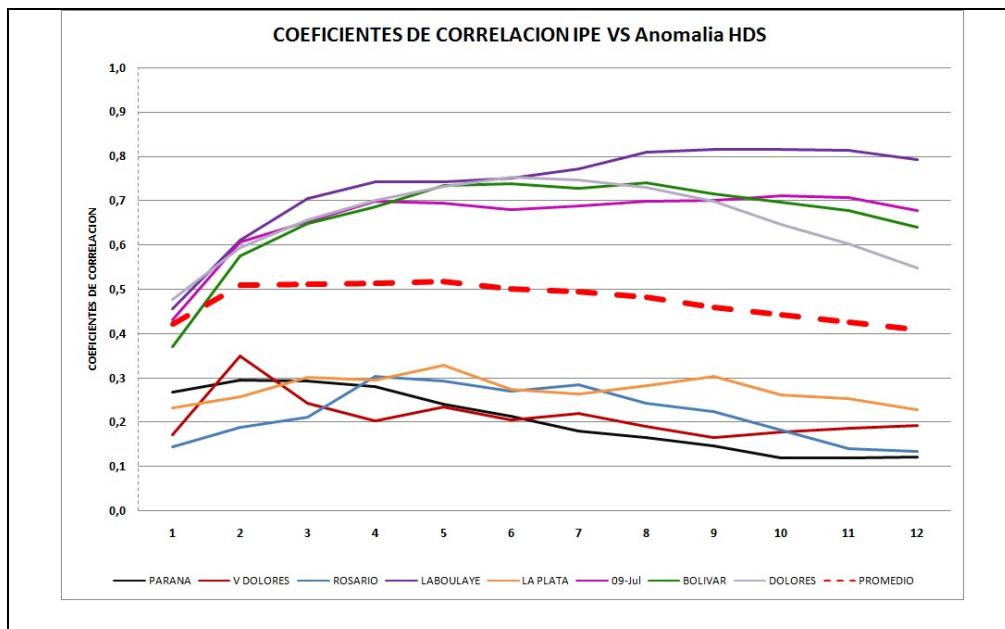
  

MES	M D PLATA	M JUAREZ	NUEVE DE JULIO	P INDIO	PARANA	PEHUAIJO	PIGUE	PILAR	RIO CUARTO	ROSARIO	S VIEJO	SANTA ROSA	TANDIL	TRES ARROYOS	V DOLORES
1	0.44	0.43	0.43	0.34	0.55	0.21	0.56	0.44	0.40	0.41	0.47	0.53	0.49	0.51	0.17
2	0.60	0.49	0.61	0.42	0.44	0.43	0.51	0.55	0.43	0.40	0.55	0.61	0.59	0.68	0.35
3	0.56	0.43	0.65	0.45	0.33	0.55	0.51	0.53	0.40	0.46	0.55	0.57	0.53	0.61	0.24
4	0.58	0.44	0.70	0.45	0.25	0.62	0.51	0.42	0.32	0.42	0.51	0.52	0.57	0.60	0.20
5	0.58	0.45	0.69	0.46	0.18	0.67	0.56	0.38	0.24	0.42	0.53	0.57	0.60	0.56	0.23
6	0.63	0.43	0.68	0.45	0.11	0.69	0.55	0.35	0.23	0.38	0.50	0.53	0.57	0.54	0.21
7	0.63	0.36	0.69	0.46	0.07	0.71	0.54	0.31	0.26	0.33	0.47	0.56	0.55	0.48	0.22
8	0.61	0.33	0.70	0.46	0.06	0.72	0.59	0.27	0.24	0.33	0.42	0.57	0.54	0.41	0.19
9	0.63	0.35	0.70	0.43	0.07	0.74	0.57	0.24	0.19	0.27	0.40	0.56	0.47	0.35	0.17
10	0.61	0.34	0.71	0.41	0.07	0.76	0.57	0.23	0.16	0.23	0.40	0.54	0.47	0.36	0.18
11	0.58	0.24	0.71	0.38	0.11	0.78	0.59	0.21	0.13	0.14	0.43	0.57	0.44	0.30	0.19
12	0.59	0.20	0.68	0.37	0.08	0.79	0.58	0.21	0.09	0.14	0.42	0.56	0.41	0.25	0.19

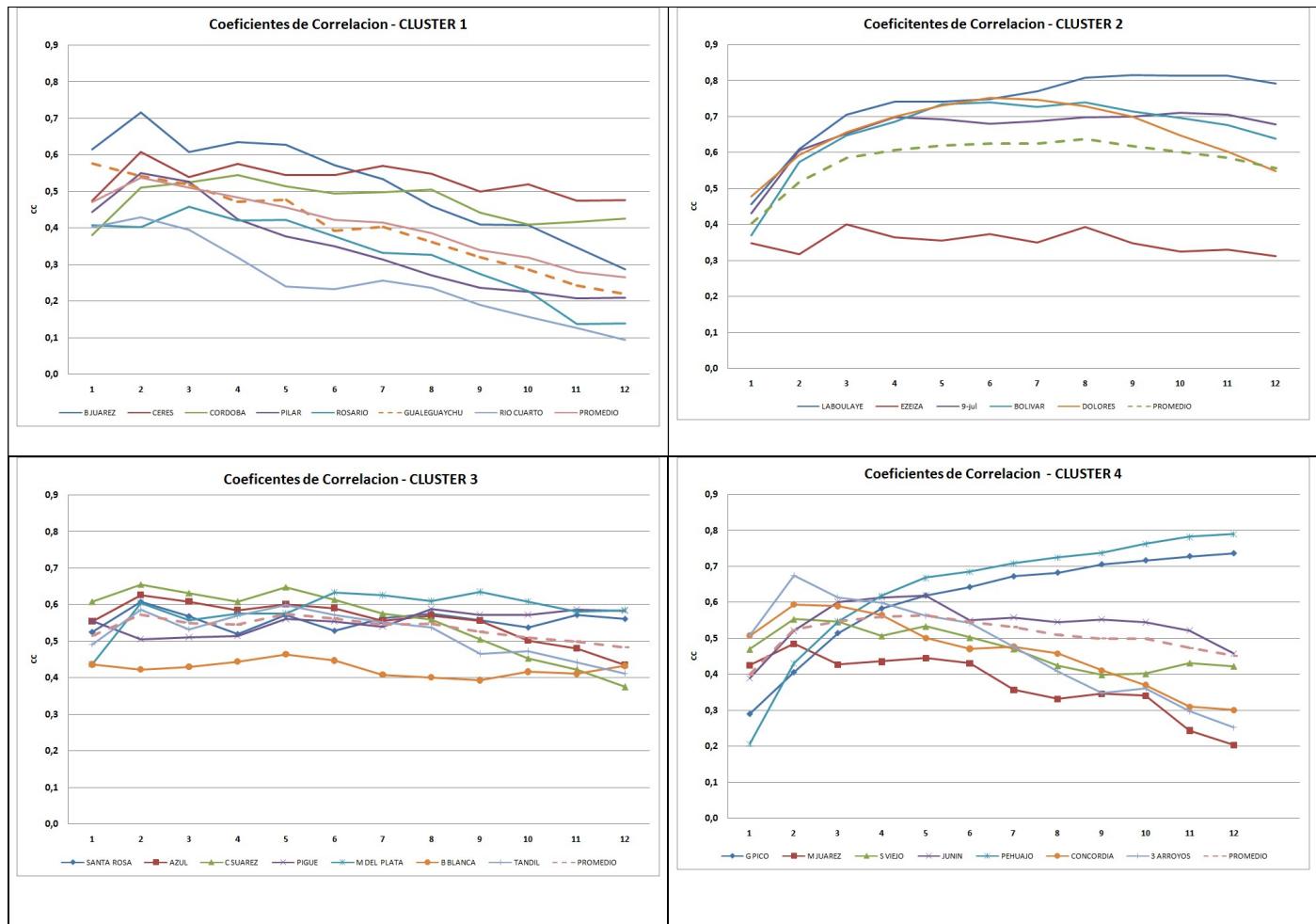
Tabla 6 Coeficientes de Correlación entre IPE y Anomalía de HDS (en negro 95% confianza)



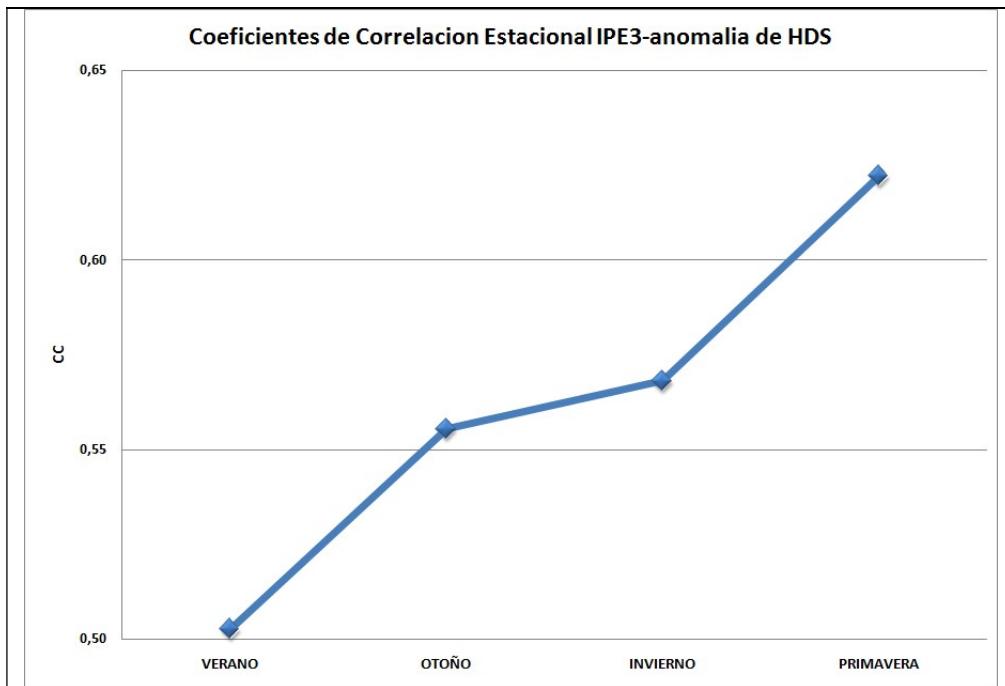
**Figura 9.** Coeficientes de correlación promedio entre las series de IPE en distintas escalas temporales (de 1 a 12 meses) y las series de HDS y Anomalía de HDS.



**Figura 10.** Coeficientes de correlación entre IPE-Anomalía de HDS.



**Figura 11.** Coeficientes de correlación entre las series de IPE en distintas escalas temporales (de 1 a 12 meses) y las Anomalías de HDS.



**Figura 12.** Coeficientes de correlación estacional entre IPE3-Anomalía HDS.

**c) Comparación de la categorización de sequías y excesos en base al IPE3 y aHDS**

Con el fin de calcular las distintas categorías de sequía agrícola utilizando la variable aHDS se realizaron los siguientes pasos:

- 1) Se seleccionaron y compararon de todos los eventos de sequía en las estaciones de estudio mediante los índices IPE3 y aHDS.
- 2) Se realizaron promedios de los valores de aHDS considerando los distintos umbrales de IPE3, mediante inspección y comparación visual a fin de establecer umbrales de sequía agrícola (ver Tabla 2).
- 3) En función de los resultados de 2) se establecieron las categorías y umbrales para las sequías agrícolas mediante el uso de aHDS.

Luego de aplicar los pasos anteriores se obtiene la siguiente clasificación de sequías a partir de los datos aHDS de SMOS (Tabla 7):

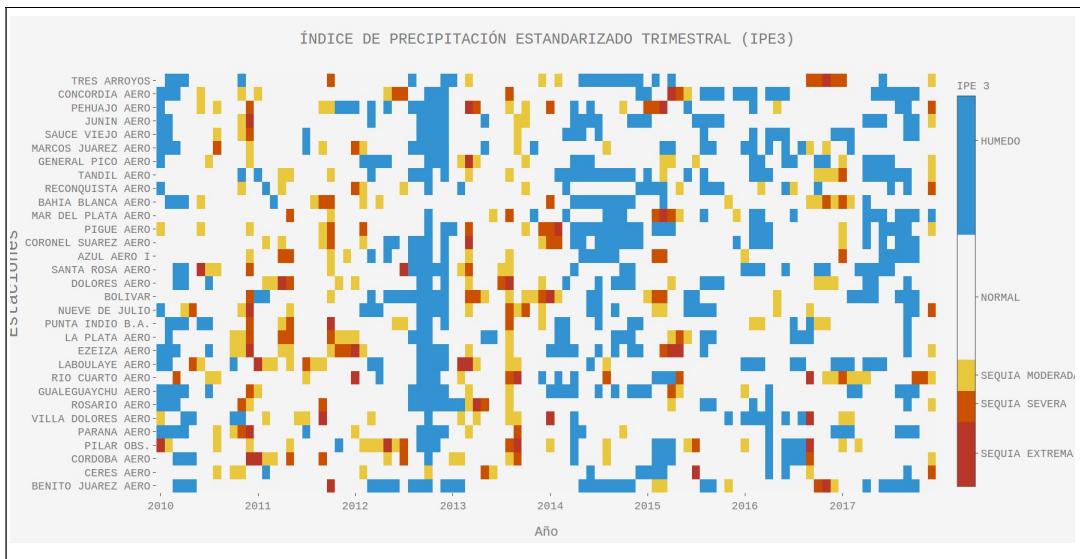
CATEGORÍA	IPE3	ANOMALÍA HUMEDAD
EXCESO	$\geq 1$	$\geq 0.050$
NORMAL	-0.99 a 0.99	-0.049 a 0.049
SEQUÍA MODERADA	-1.49 a -1.00	-0.099 a -0.050
SEQUÍA SEVERA	-1.99 a -1.50	-0.149 a -0.100
SEQUÍA EXTREMA	$\leq -2.00$	$\leq -0.150$

**Tabla 7.** Categorías obtenidas para la clasificación de sequías agrícolas mediante las estimaciones de aHDS en función de la comparación con el IPE3.

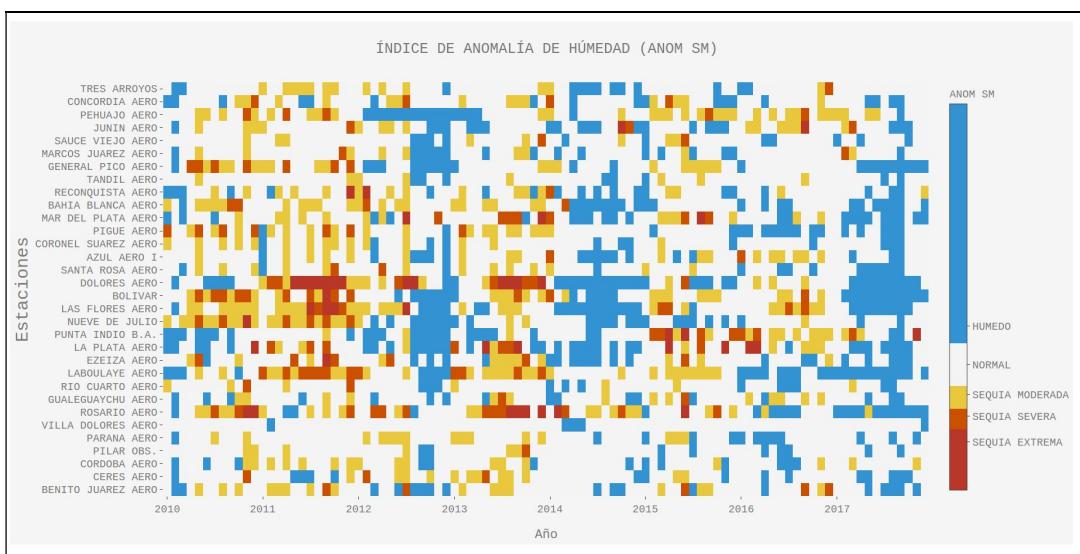
Los diferentes estadios hídricos identificados con el IPE3 (figura 13) en las diferentes localidades marcan claramente períodos normales, de excesos y de diferentes categorías de sequías. Lo mismo se observa en los mismos estadios hídricos mediante las series de aHDS estimada por SMOS (figura 14).

Se observan períodos de sequías generalizadas durante la segunda mitad de 2010 y durante todo el año 2011, otro evento de alcance regional durante el año 2013 y eventos de extensión espacial y temporal más limitada durante los años 2015 y 2016 (Figuras 13 y 14).

Al realizar una comparación de las clasificaciones definidas por ambas variables, se observa una alternancia entre eventos de sequías y excesos más marcada en la aHDS que en el IPE3, con lapsos temporales clasificados en la categoría normal más cortos. En especial los períodos de sequía y sus categorías (moderada, severa y extrema) presentan coherencia espacial y temporal entre la aHDS y el IPE3. Asimismo, esta coherencia se observa en casos de excesos hídricos (Figuras 13 y 14). Otro aspecto a destacar en la detección de sequías y excesos con ambas series es la sincronización de las mismas, ocurren simultáneamente con las series de IPE3 y aHDS; aunque con un sesgo a una mayor extensión de los episodios con aHDS.

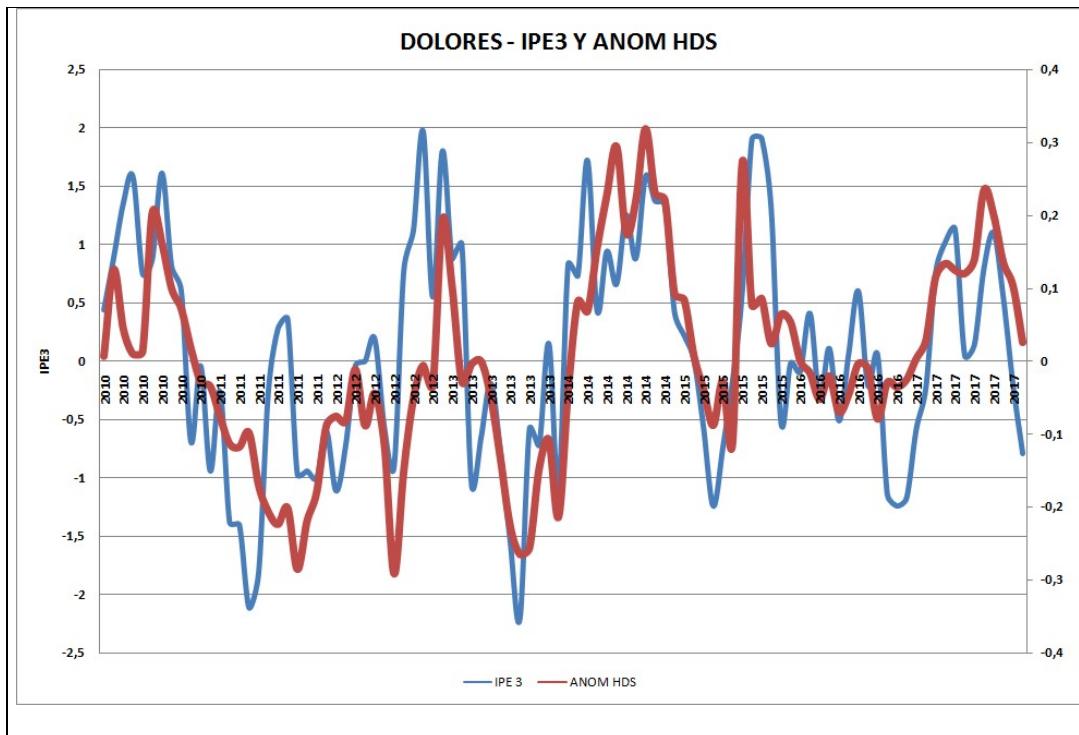


**Figura 13.** Categorización de sequías y excesos basada en las series temporales de IPE3 en todas las estaciones utilizadas.



**Figura 14.** Categorización de sequías y excesos basada de aHDS para todas las estaciones utilizadas.

A modo de ejemplo, la Figura 15 muestra las series temporales de IPE3 (línea azul) y aHDS (línea roja) para la estación Dolores Aero en el período 2010-2017. En la gráfica se identificaron 4 eventos de sequías en el período de comparación: dos eventos que alcanzan categoría de sequía extrema según la clasificación del IPE en los años 2010-11 y 2013; y 2 eventos de categoría moderada en los años 2015 y 2016-17 (Figura 15). En esta estación se puede apreciar que los períodos secos y húmedos se alternan y están sincronizados (precipitación y HDS), la severidad de las sequías se acompañan muy adecuadamente y los períodos secos o húmedos son más estables en aHDS, no oscilan tanto como en IPE3.



**Figura 15.** IPE3 y aHDS en la localidad de Dolores, provincia de Buenos Aires.

Las relaciones entre IPE3 y aHDS en las estaciones utilizadas muestran una heterogeneidad en los resultados, pero puede resumirse lo siguiente:

-las estaciones que presentan los coeficientes de correlación más altos hay una mejor sincronización entre los períodos de sequías, excesos y normales. Están ubicadas en el centro de la región de estudio y son más de la mitad de las mismas (ver figura 16).

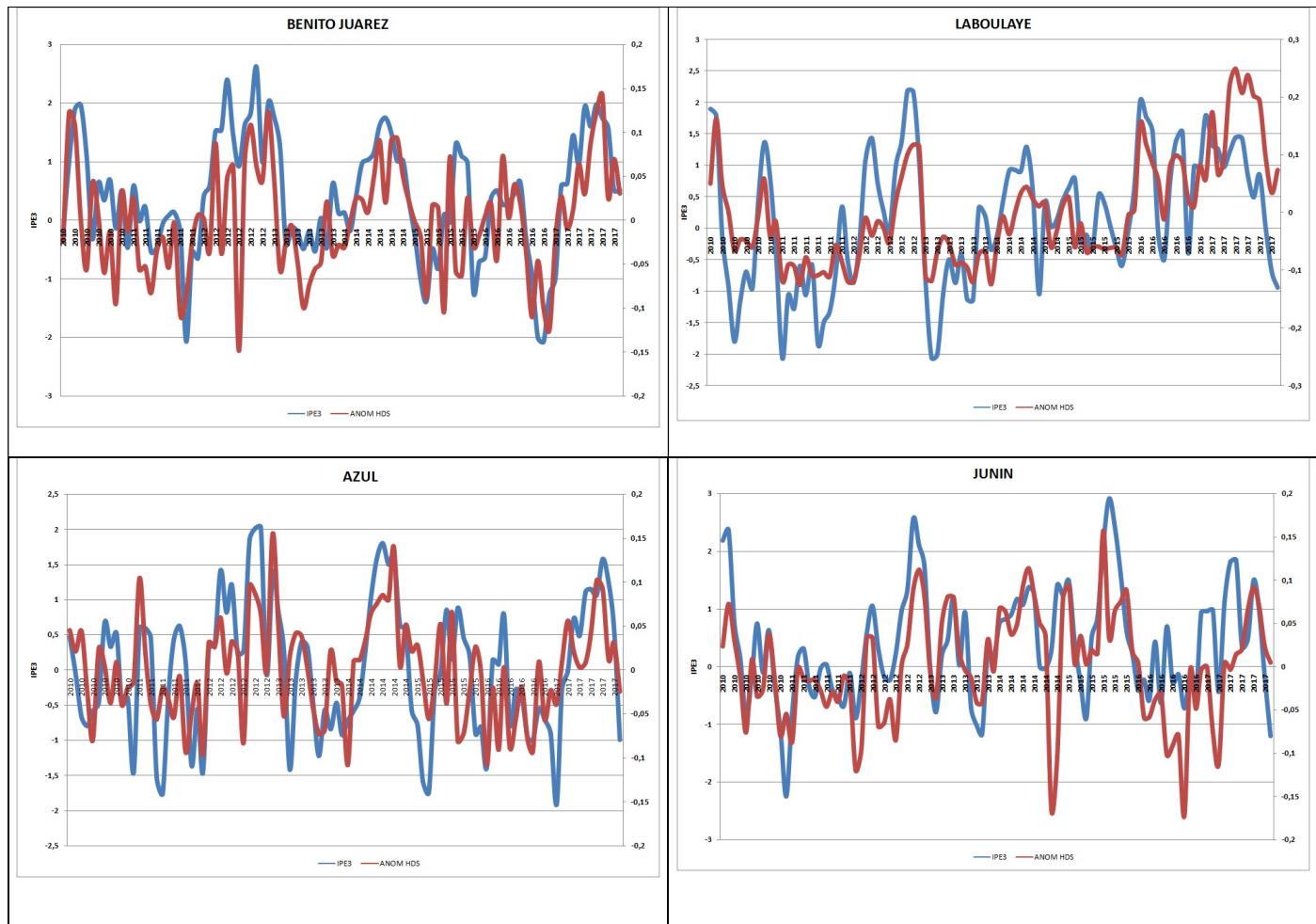
-el resto de las estaciones presentan coeficientes de correlación más bajos, con una menor sincronicidad de los eventos secos y húmedos, más variabilidad de las series y distintas amplitudes; ubicadas en zonas semidesérticas (como General Pico), cercanas a cuerpos de agua (Punta Indio y Paraná), serranías (Tandil y Córdoba) o conglomerados urbanos (Ezeiza) (ver Figura 17).

Se graficaron conjuntamente los campos mensuales de IPE3 y anomalías de humedad estimada por SMOS en los 4 eventos de sequías seleccionados en las Figuras 13 y 14, los cuales se muestran en la figura 18 a) b) c) y d). No deben considerarse áreas sobre el Océano Atlántico y Uruguay, ya que es producto de un mero artificio de la interpolación.

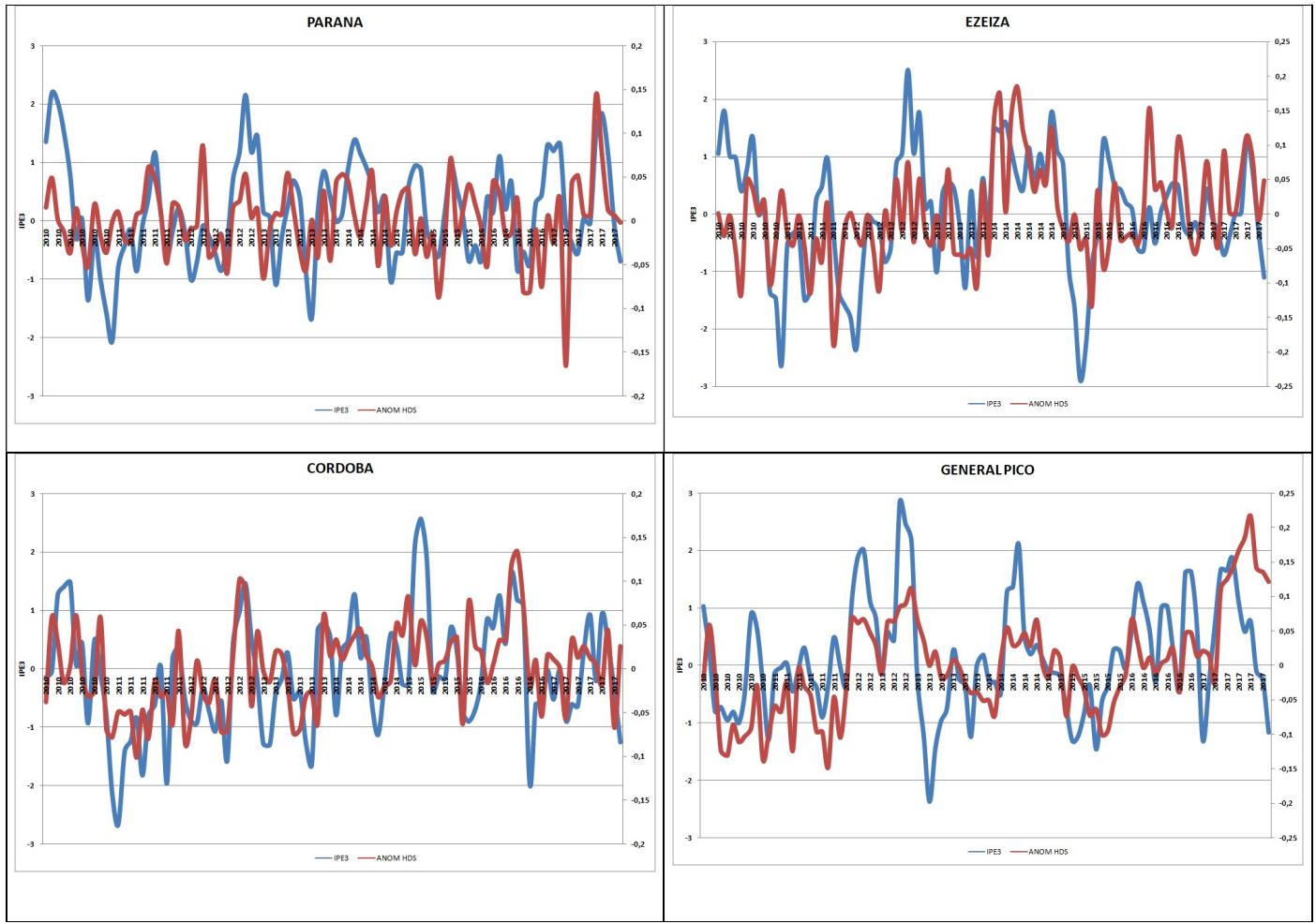
En las mismas se puede resumir las siguientes características:

- Existe una coherencia espacial en las áreas afectadas por eventos de sequía, condiciones normales y excesos identificados por el IPE3 y la aHDS.
- Las regiones afectadas por eventos de sequía severa y extrema identificadas a partir del IPE3 son representadas por las anomalías negativas de aHDS más importantes, observándose una coherencia en la progresión mes a mes de estos eventos.

- En pocos casos, como por ejemplo durante el mes de septiembre de 2013, la región correspondiente a la máxima severidad de sequía identificada mediante el IPE3 no coincide espacialmente con la identificada a partir de la anomalía de HDS (Figura 18 b). Debe tenerse en cuenta que al trabajar con el IPE3, las series de lluvias representan acumulados trimestrales, mientras que la estimación de humedad de suelo es mensual. Con lo cual la señal de la anomalía de humedad estimada podría estar contenida en otras escalas temporales del IPE (por ejemplo IPE2, IPE4, IPE5).

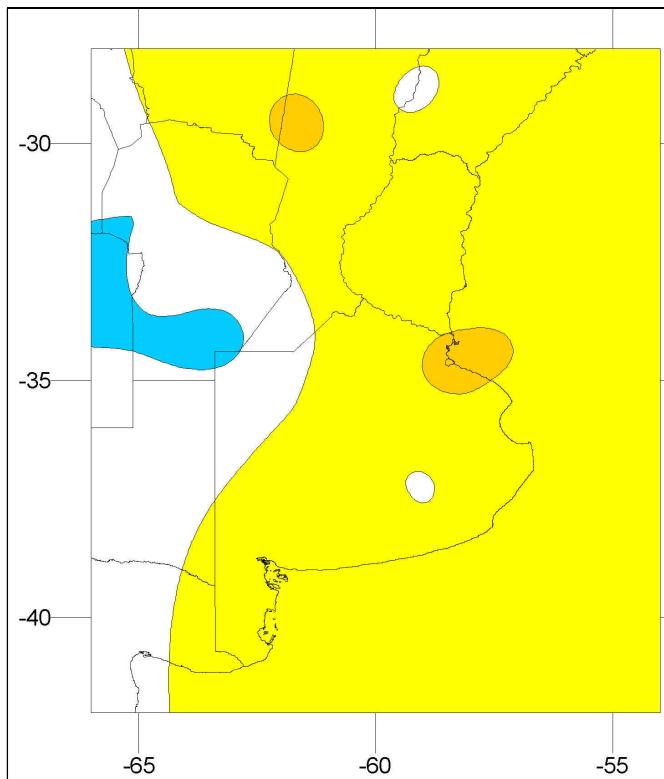


**Figura 16.** Estaciones con coeficientes de correlación entre IPE3-aHDS más elevados.

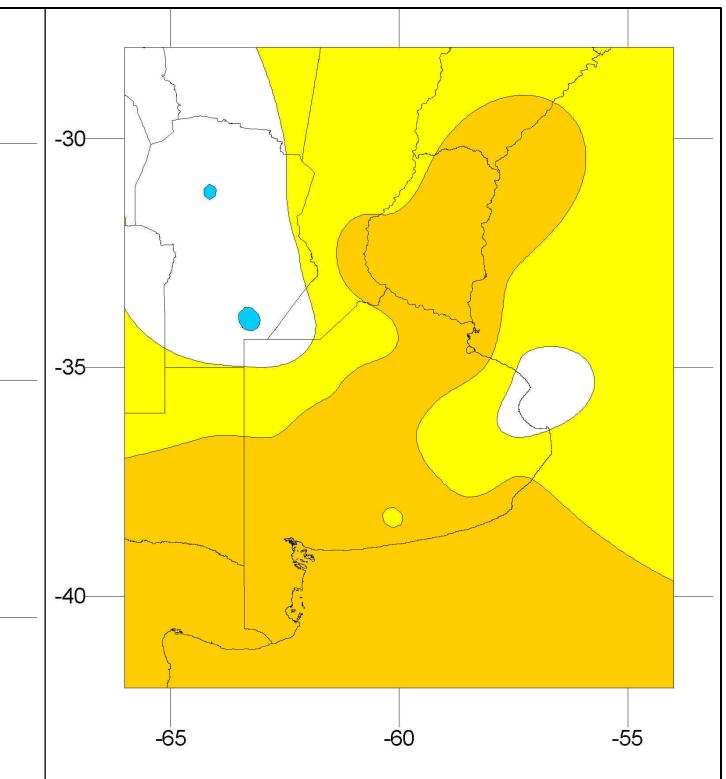


**Figura 17.** Estaciones con coeficientes de correlación entre IPE3-aHDS más bajos.

Anomalía HDS

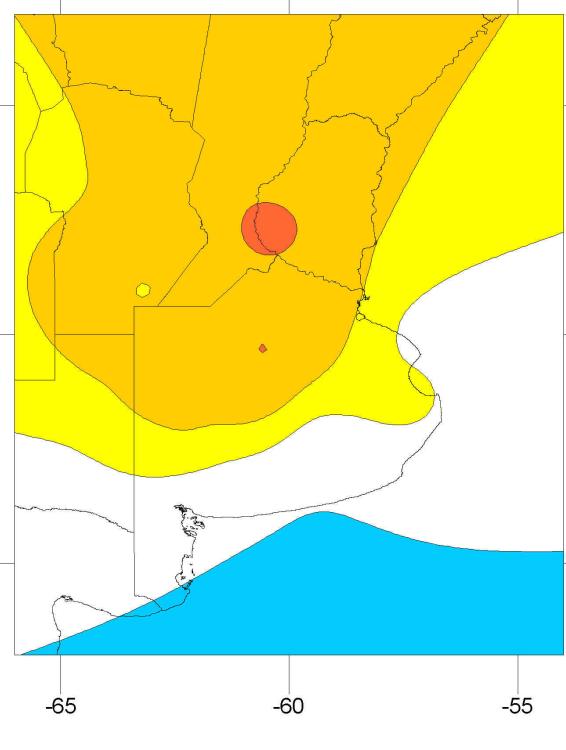
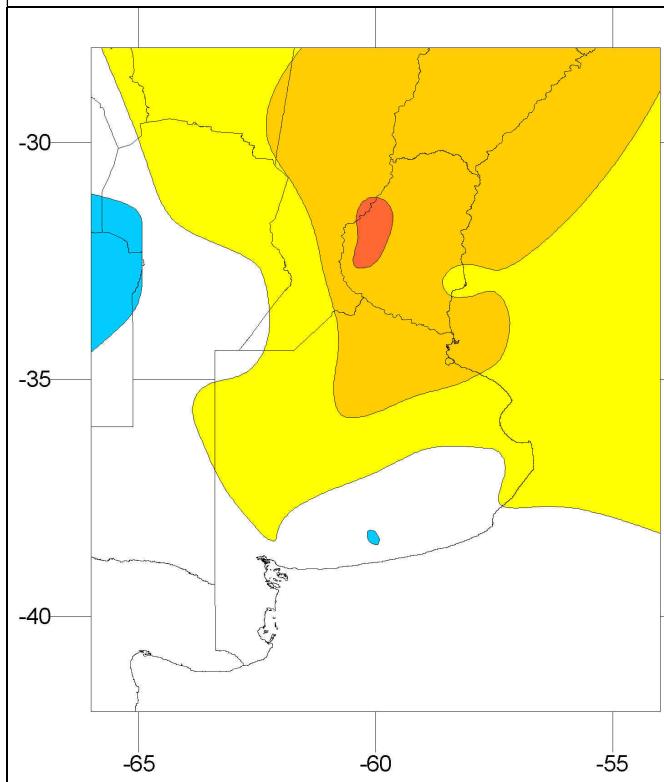


IPE3



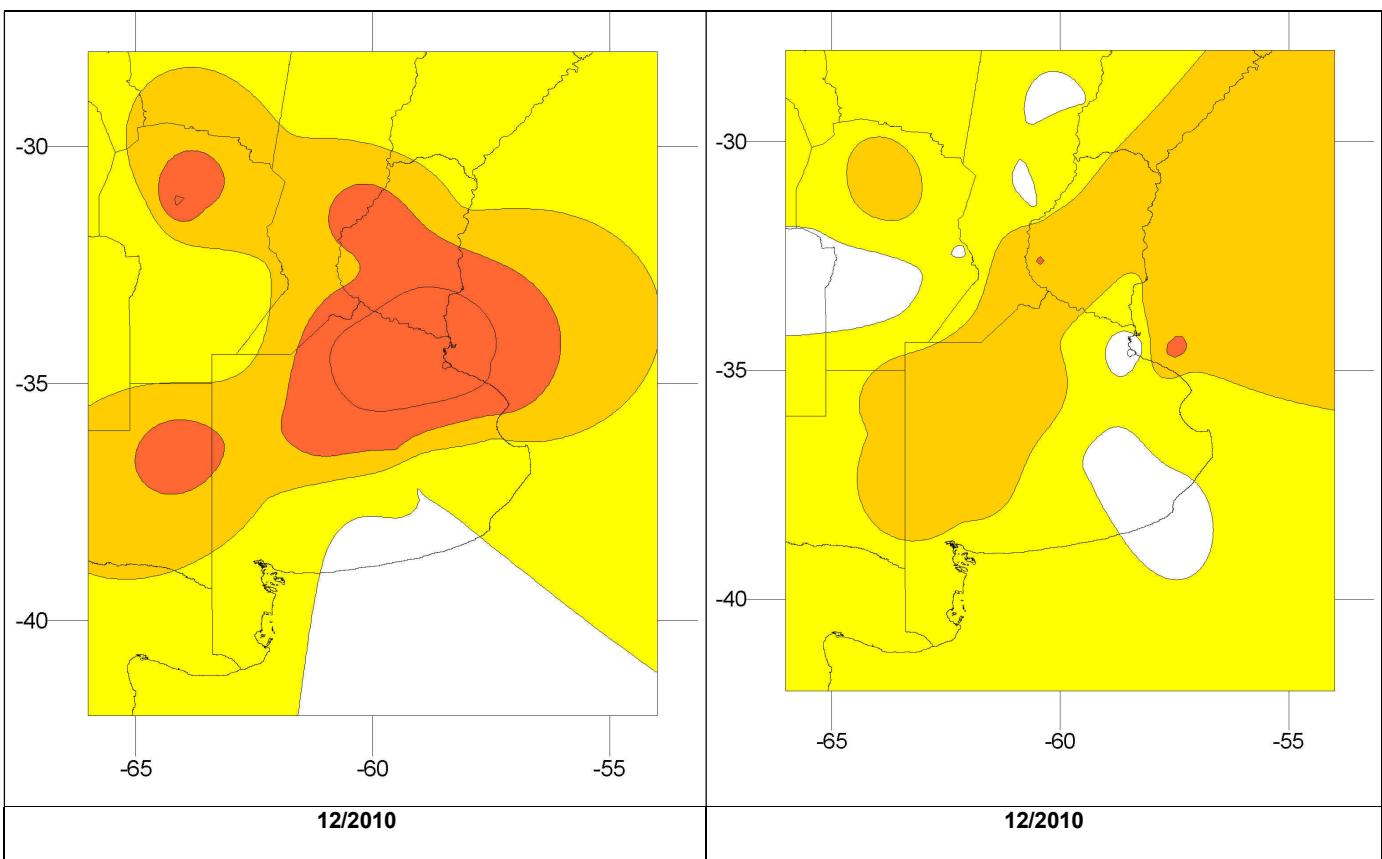
10/2010

10/2010



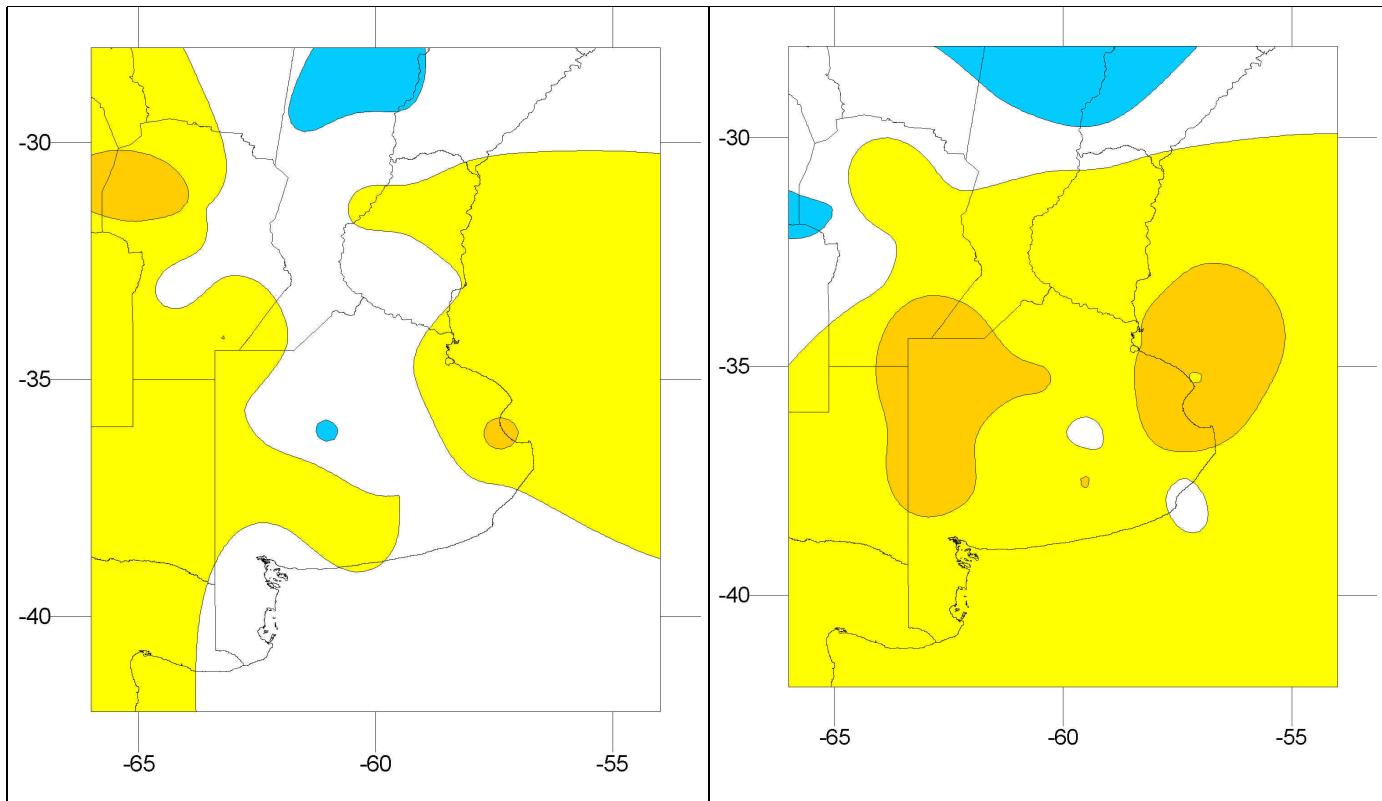
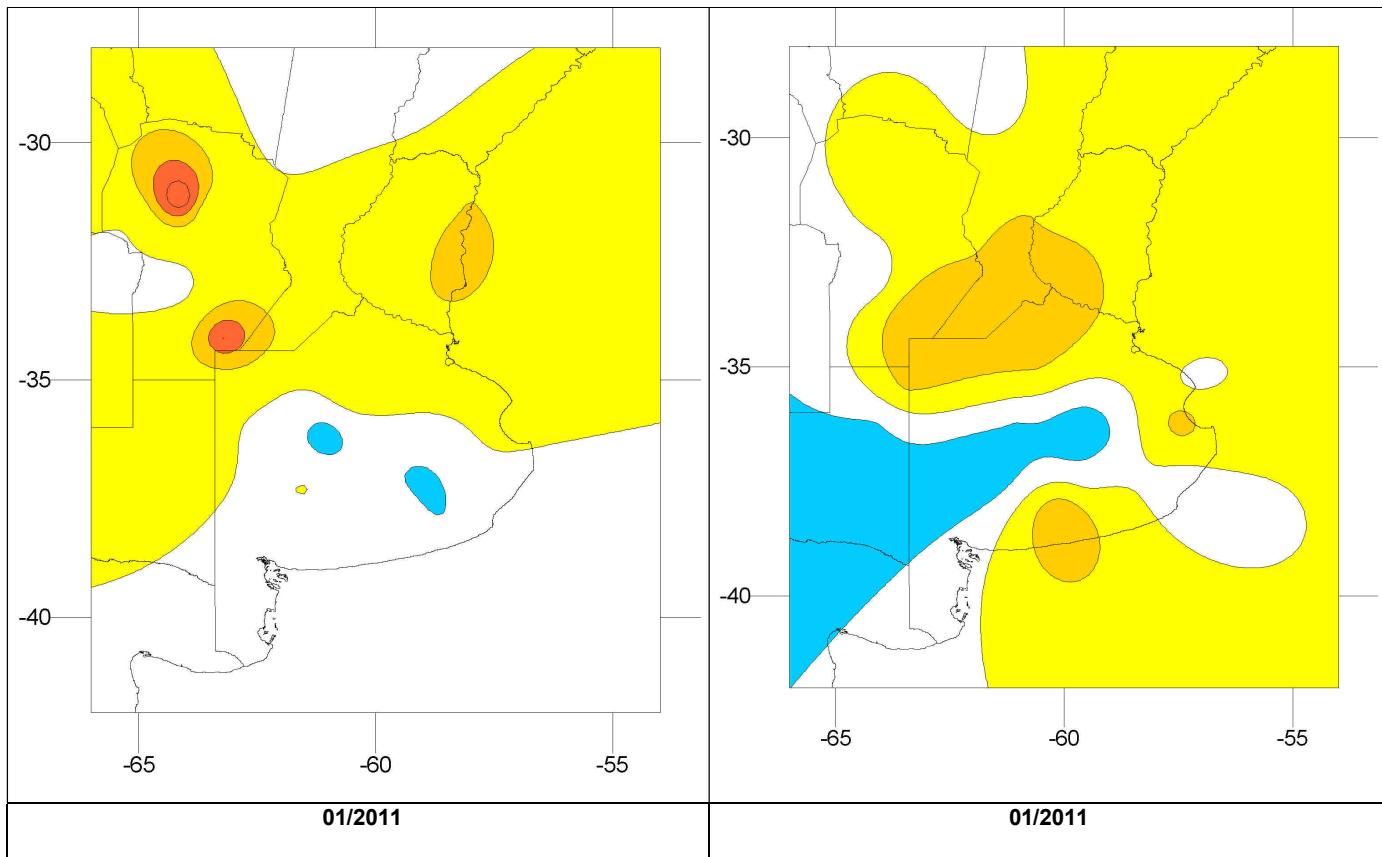
11/2010

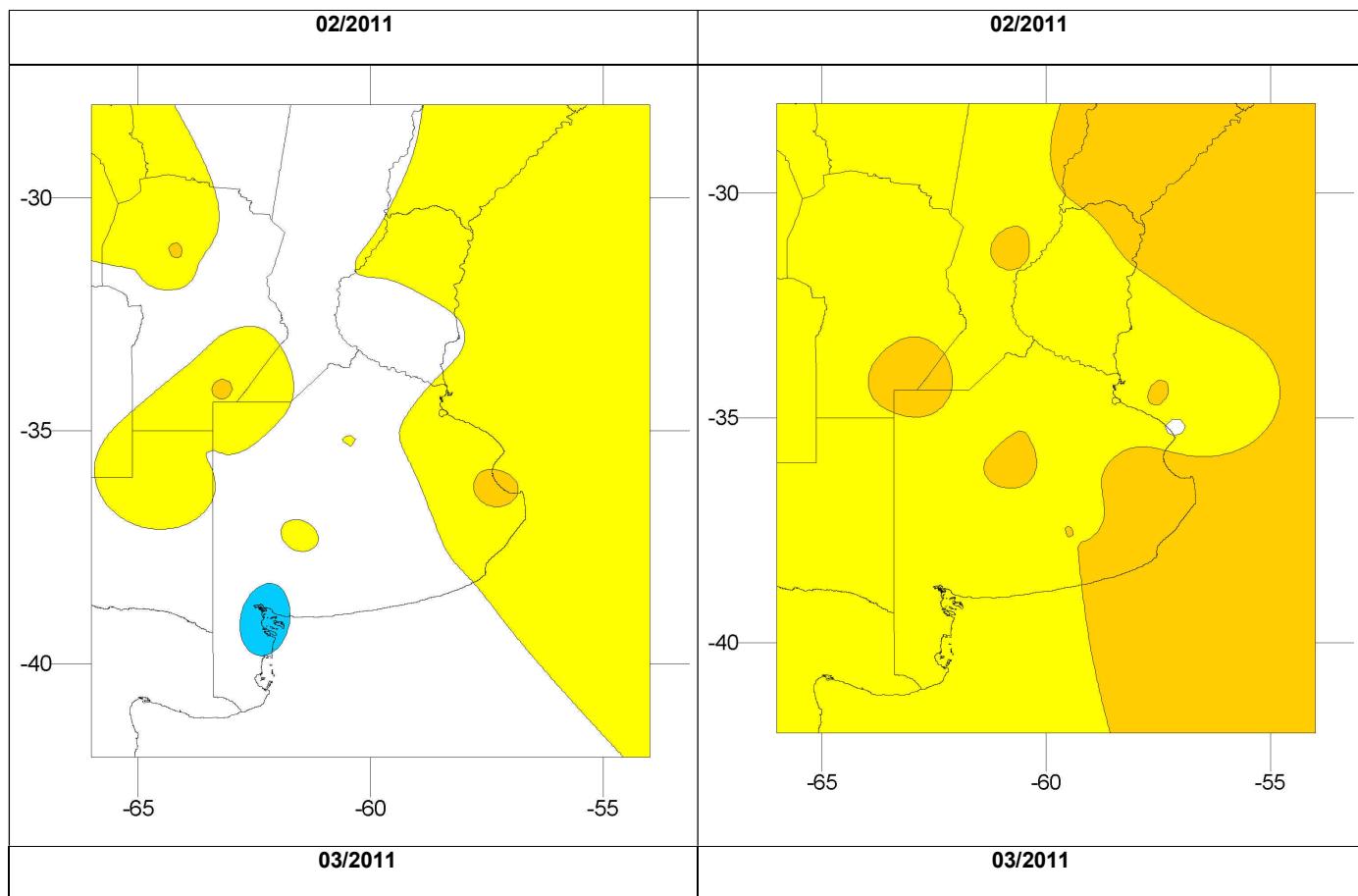
11/2010

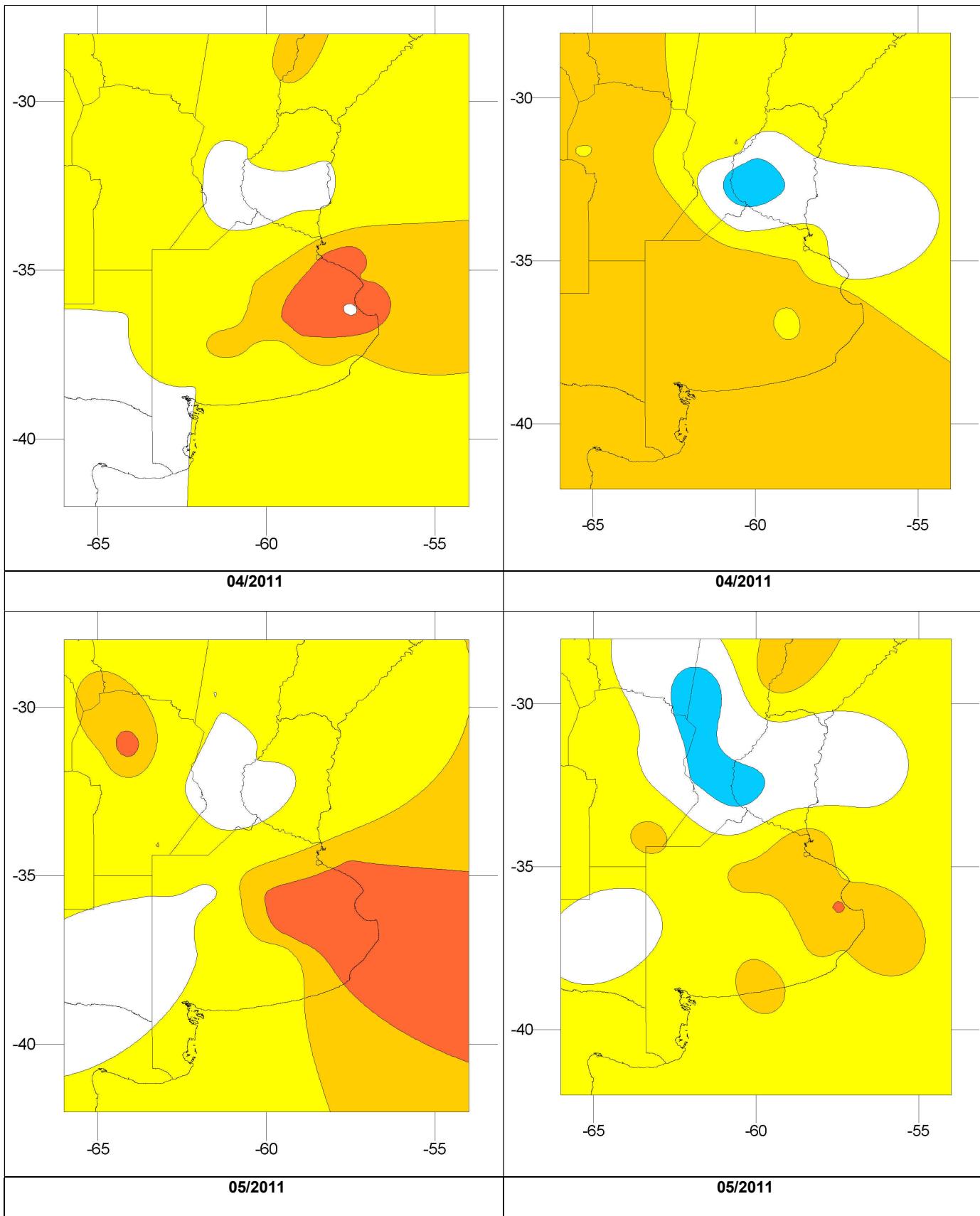


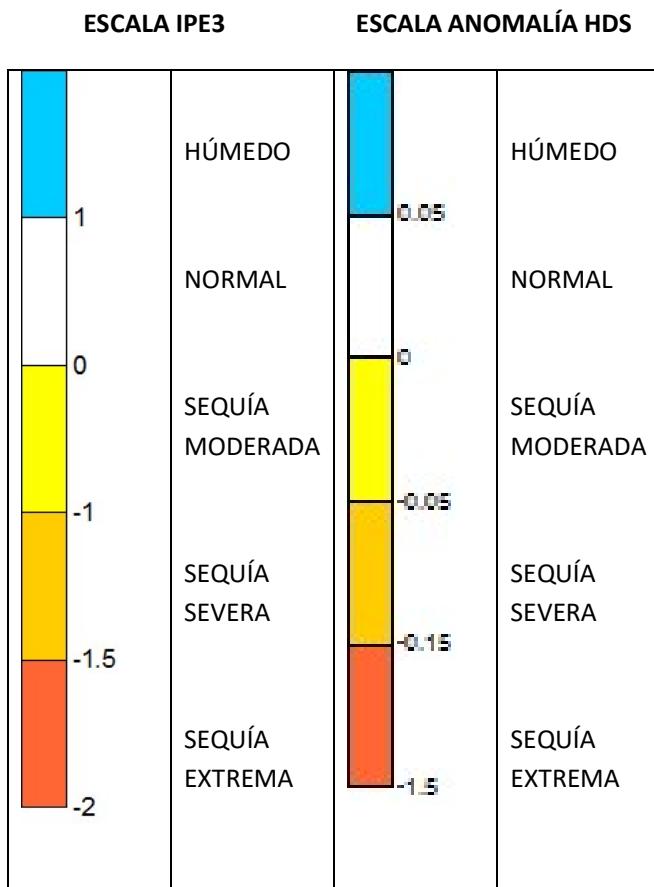
12/2010

12/2010



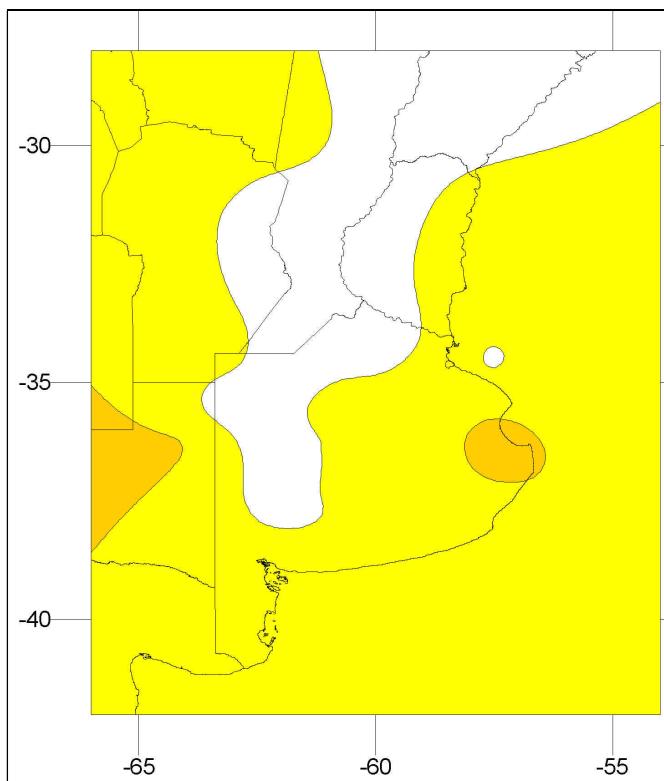




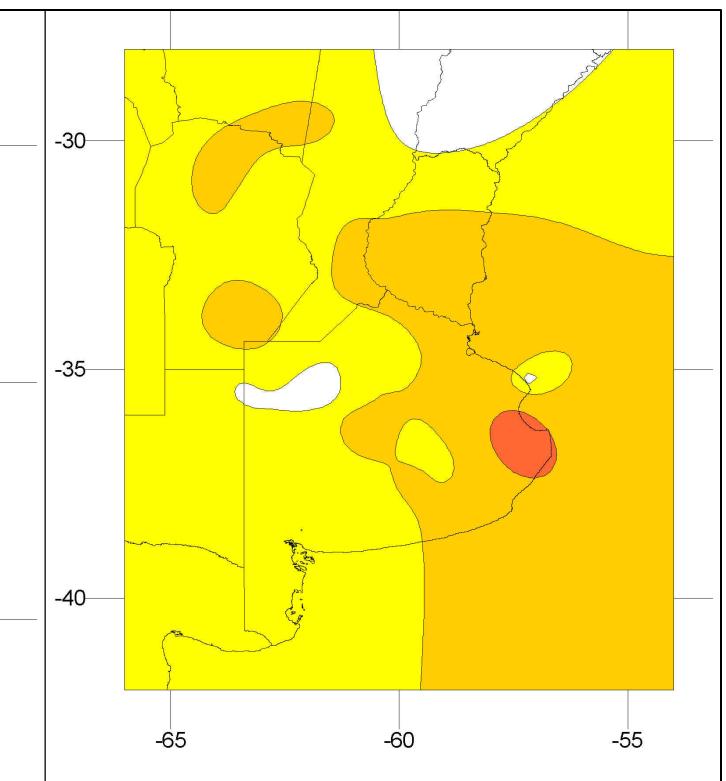


**Figura 18 a)** Patrones espaciales de los valores de IPE3 y anomalías de HDS durante episodios de sequías en los años 2010-2011.

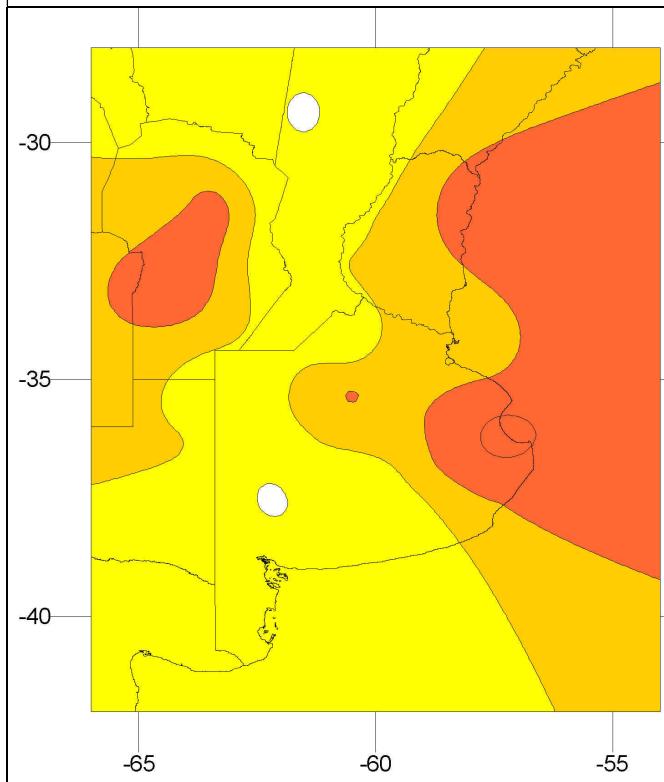
Anomalía HDS



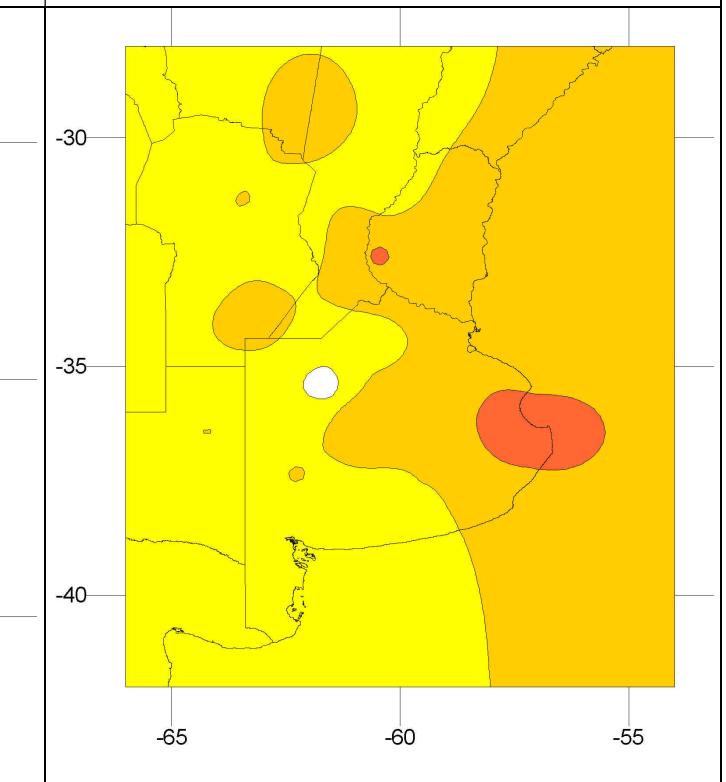
IPE3



07/2013

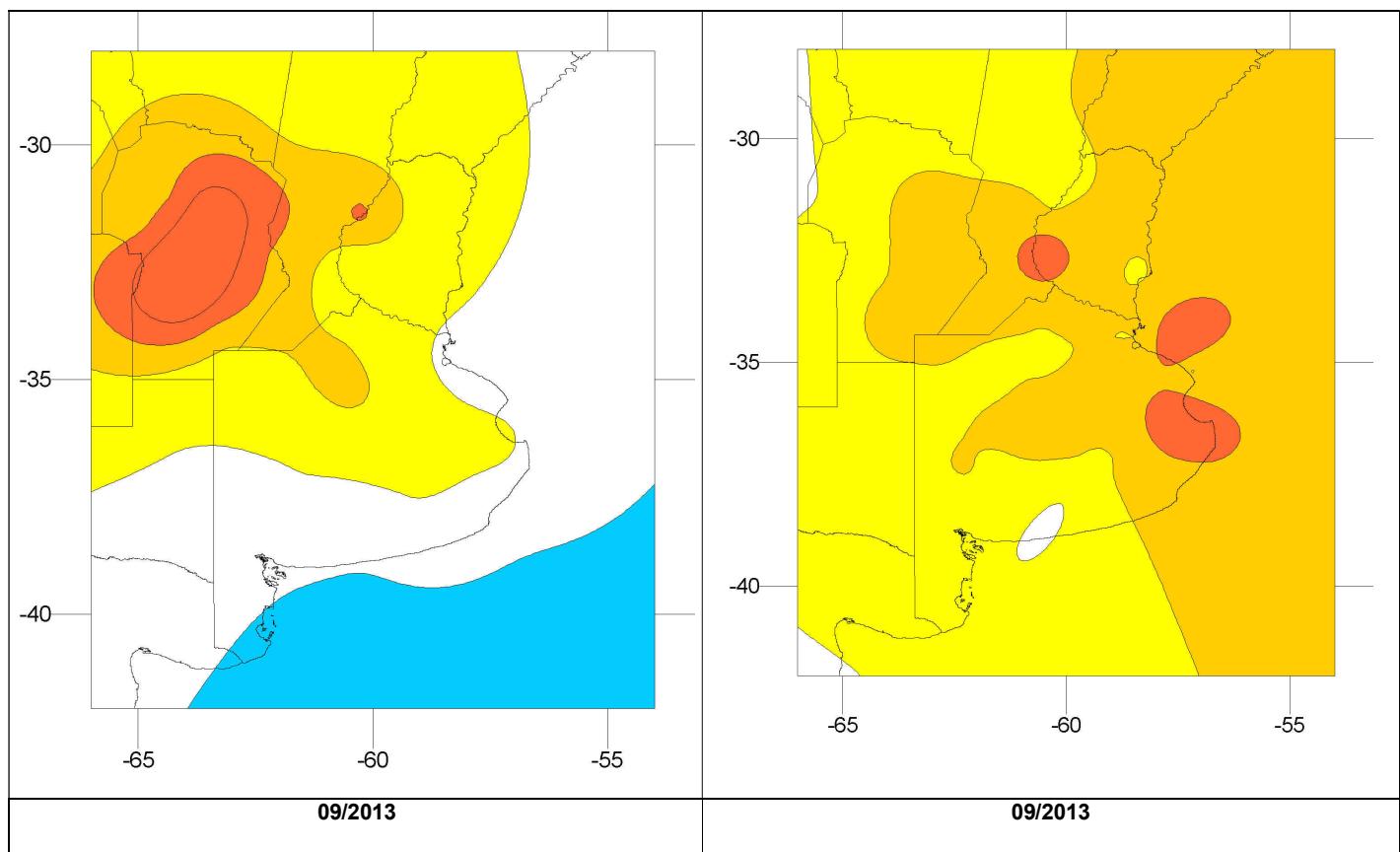


07/2013



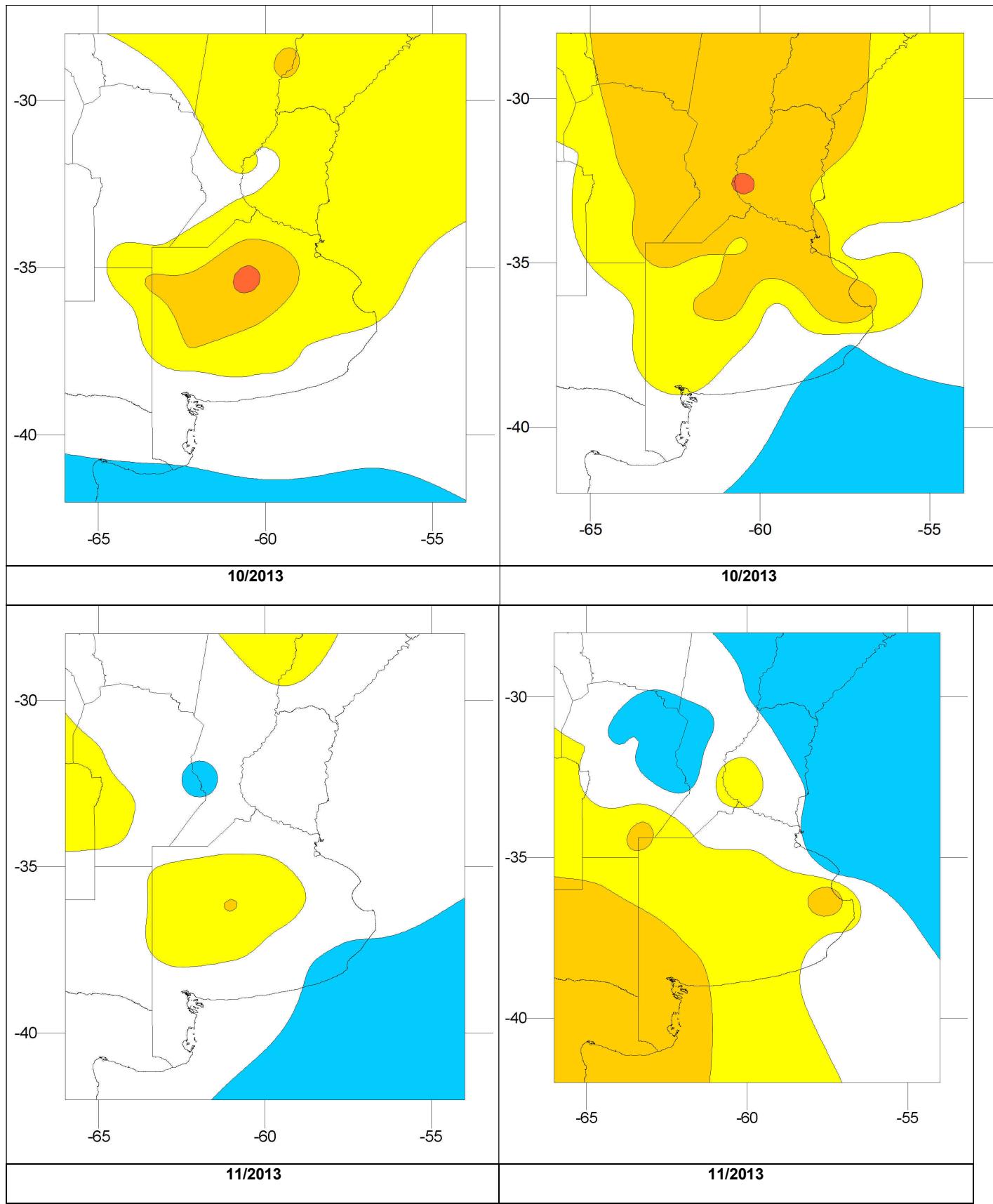
08/2013

08/2013

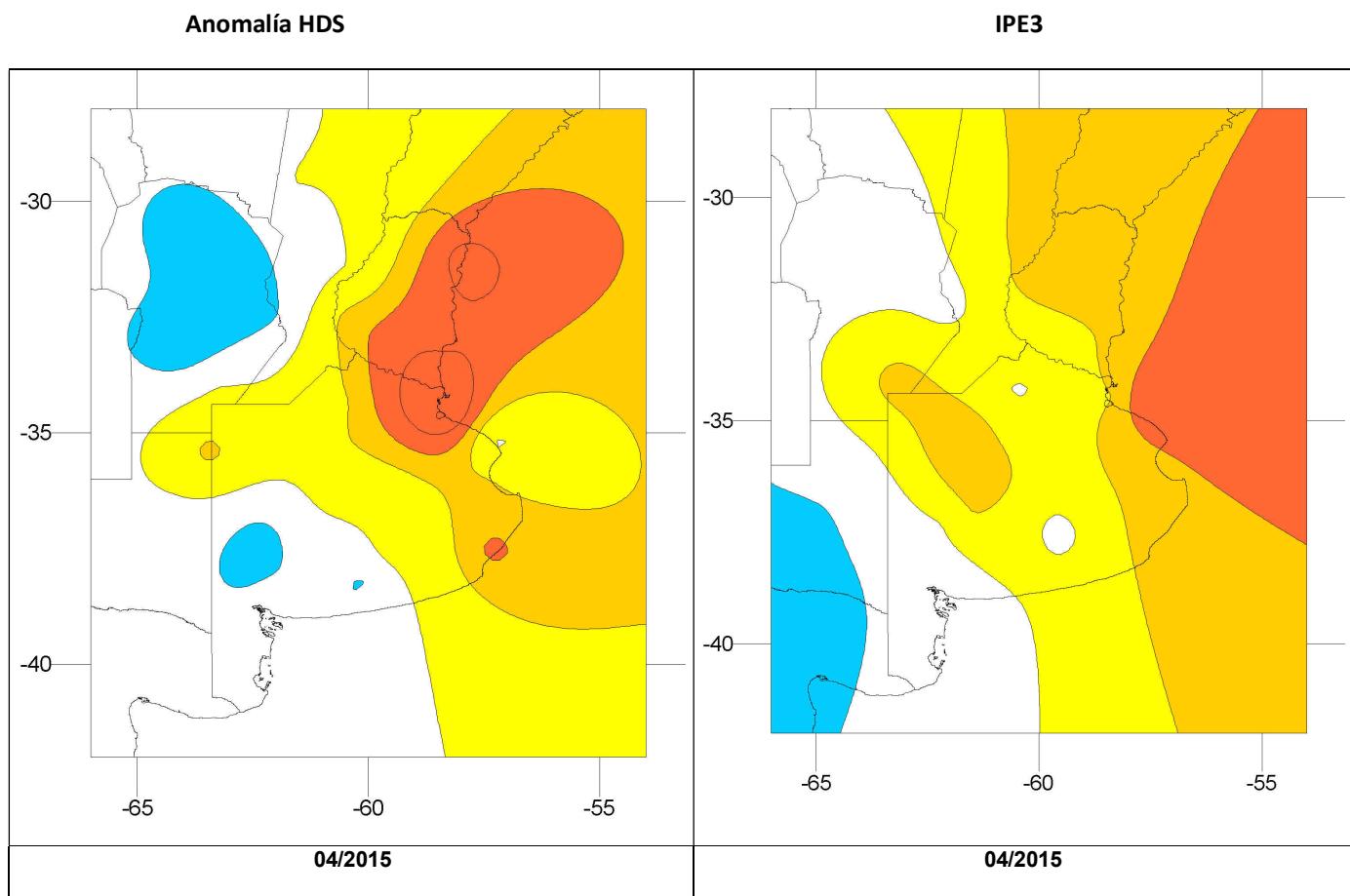


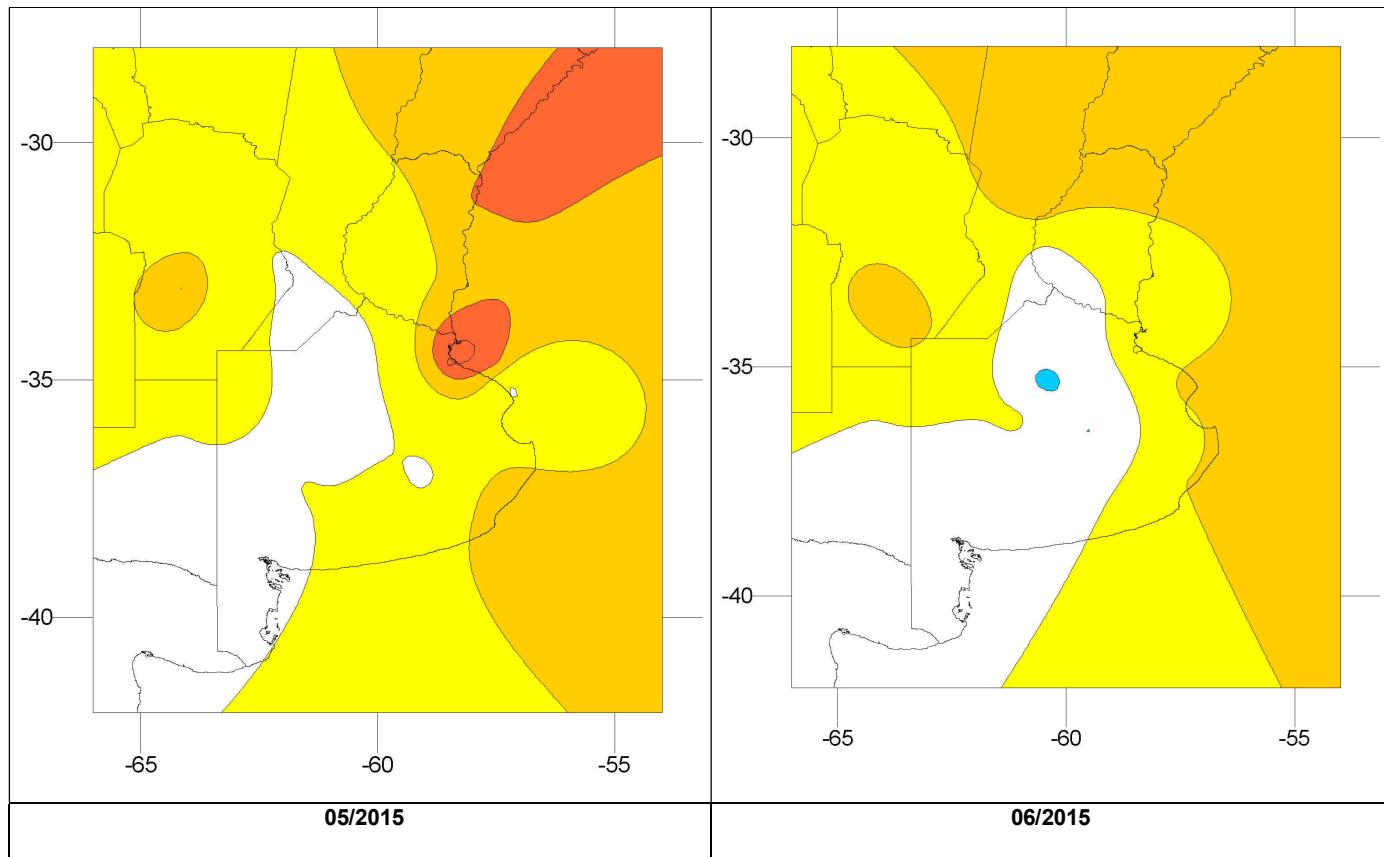
09/2013

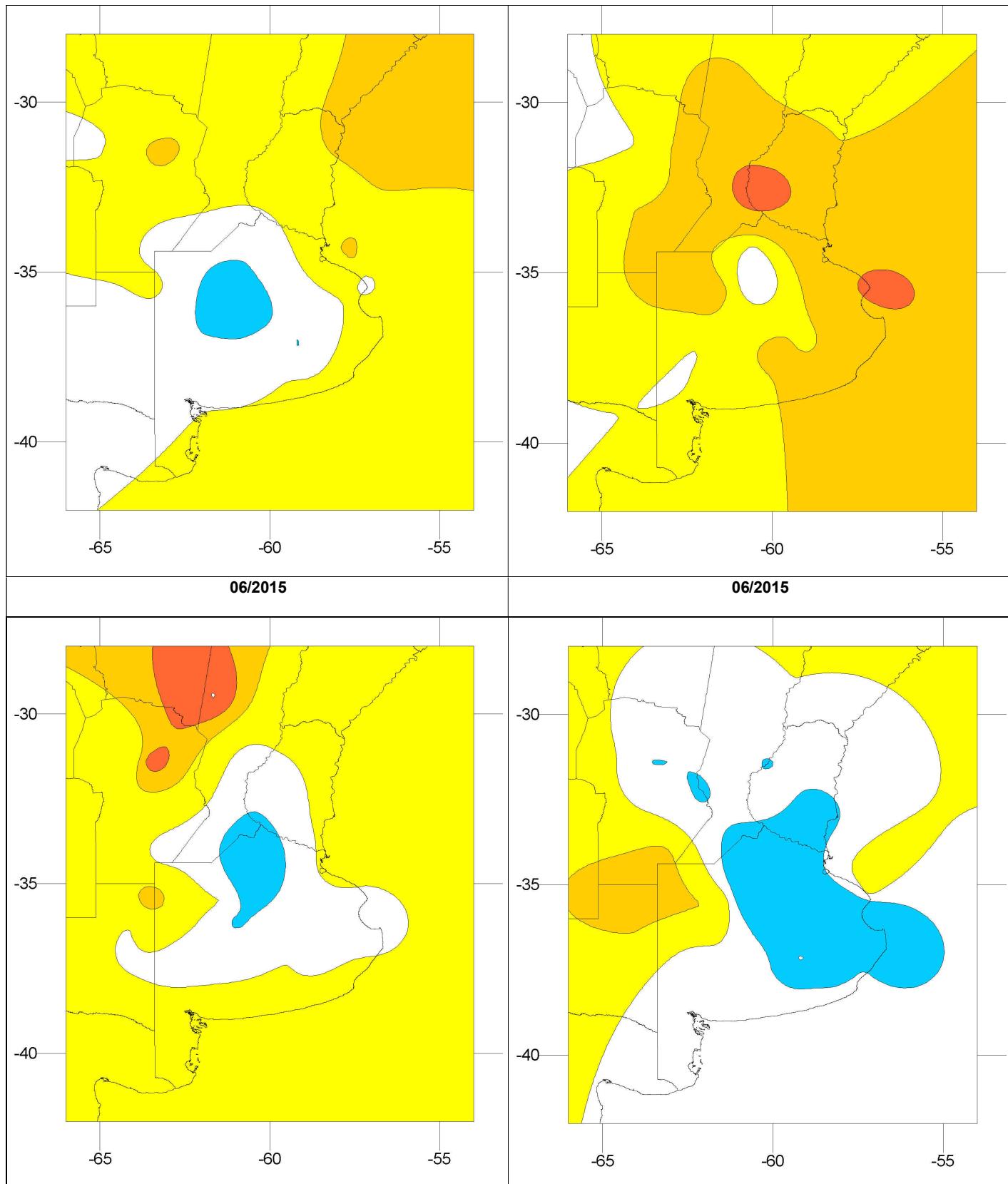
09/2013



**Figura 18 b)** Ídem Figura 18 a) para casos de sequías en el año 2013.







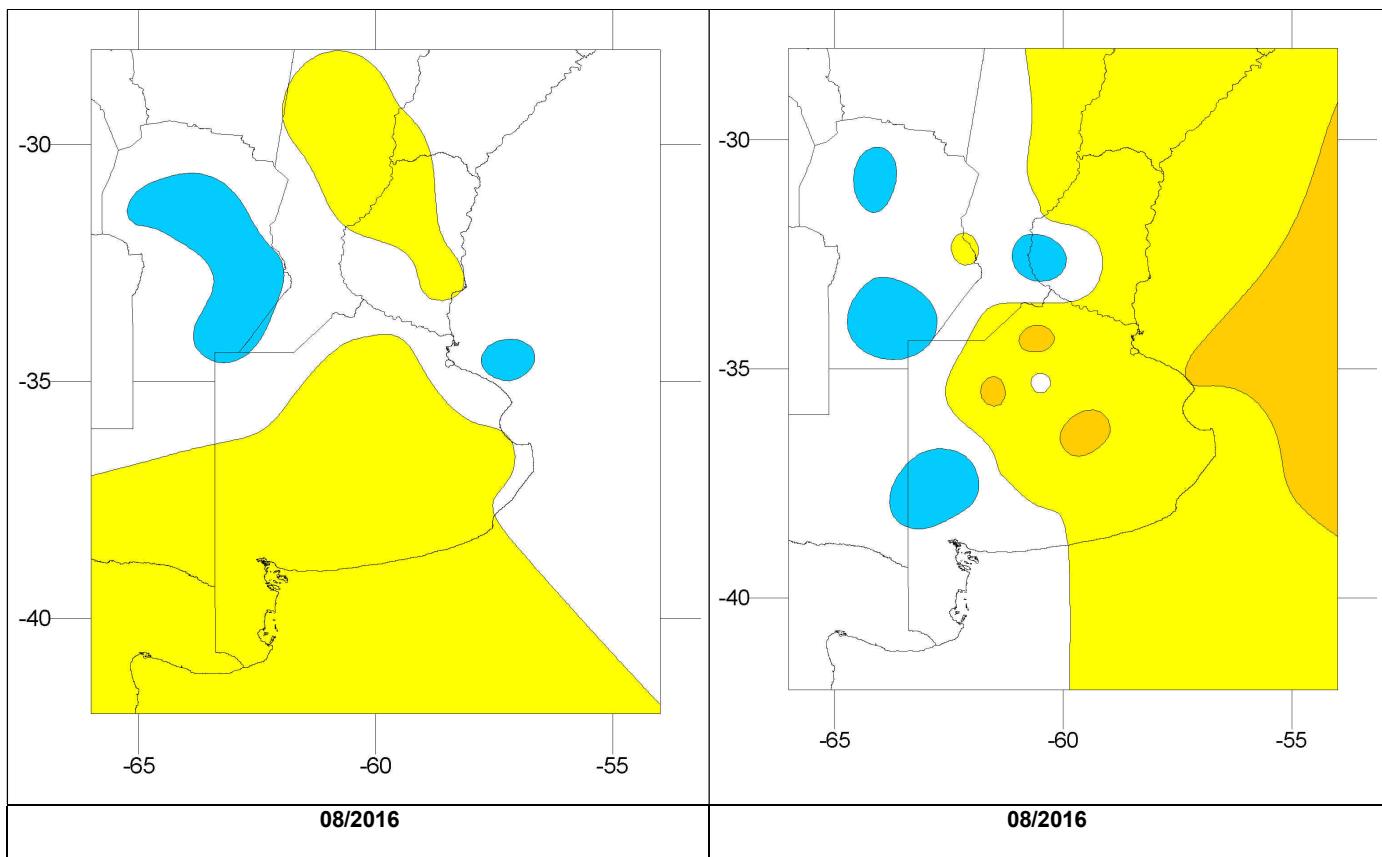
07/2015

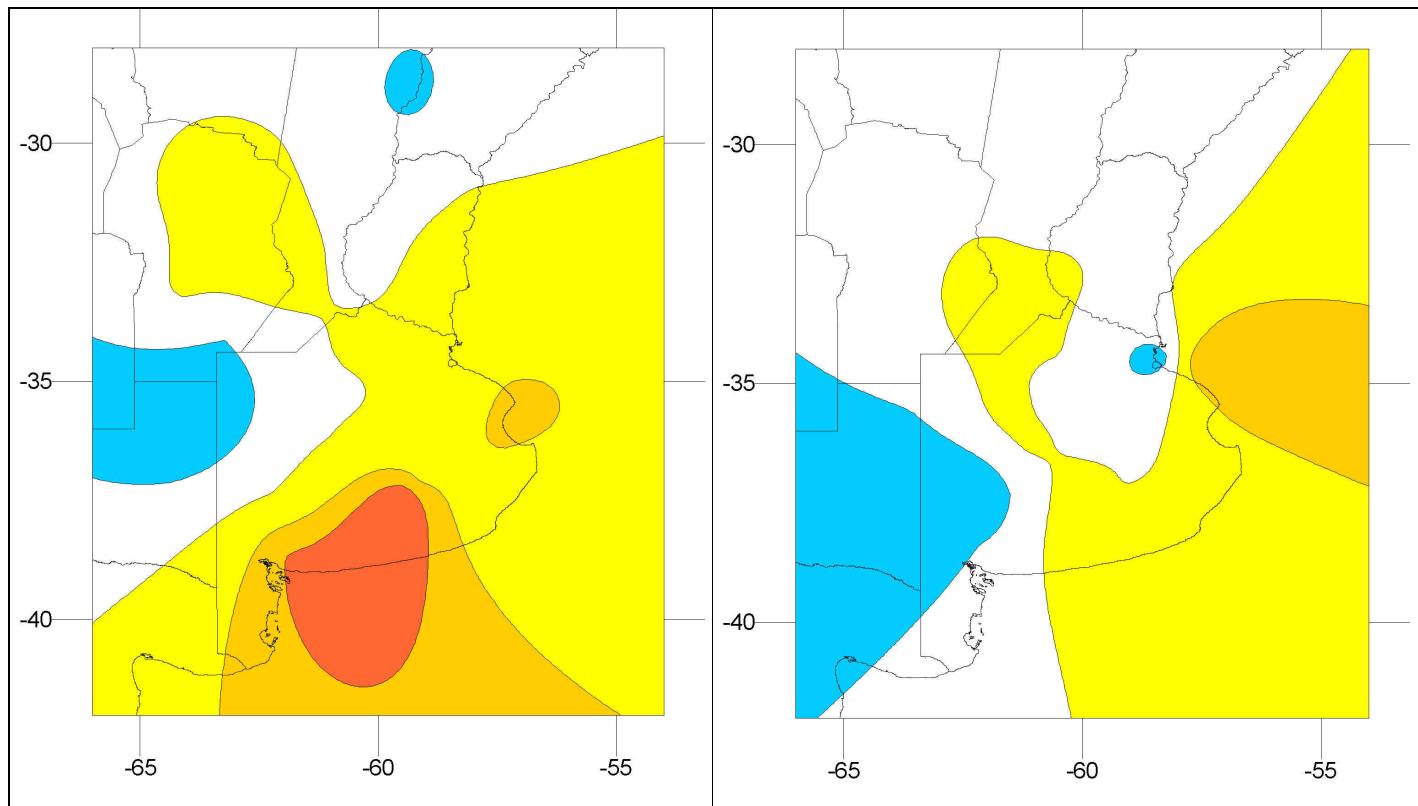
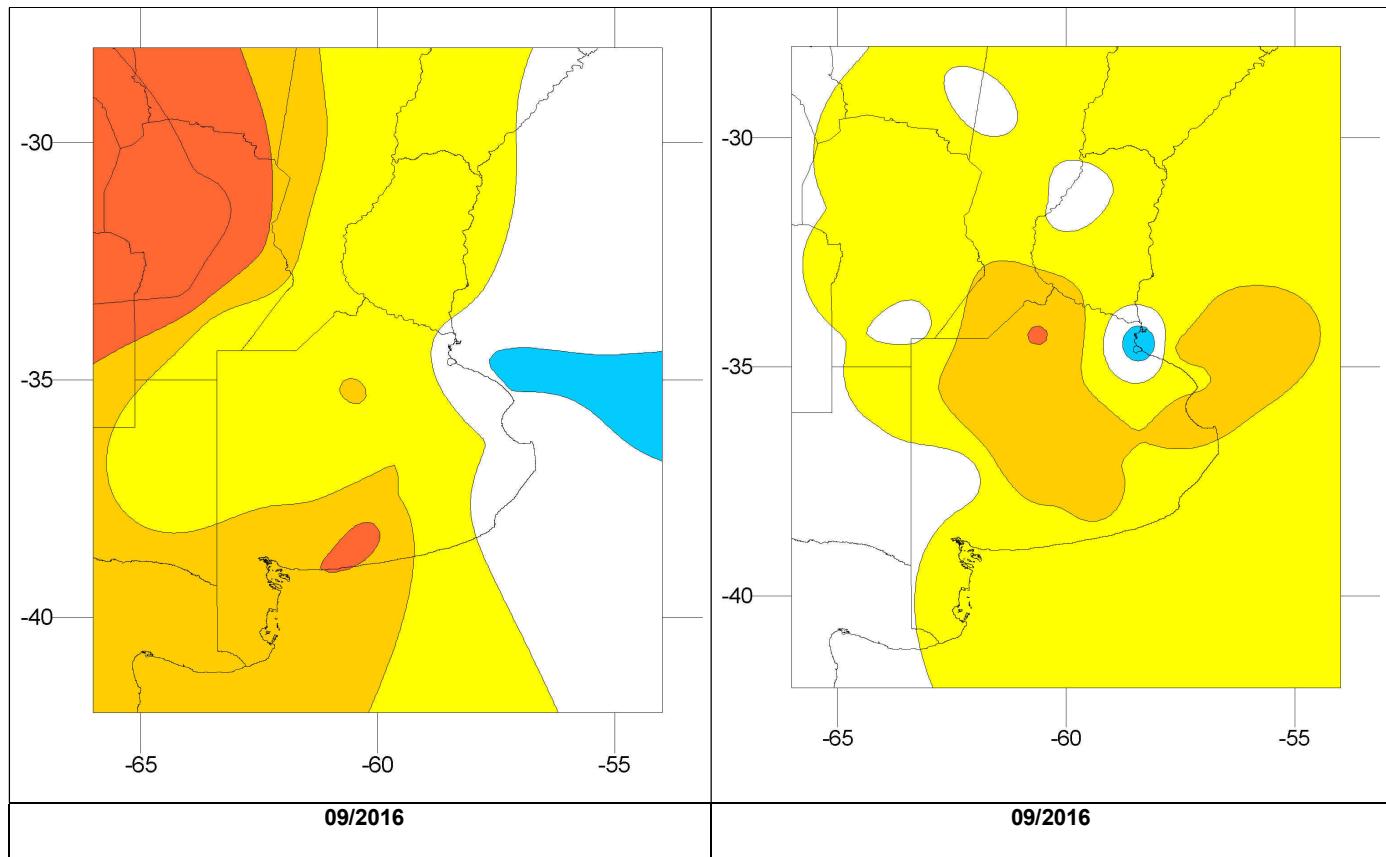
07/2015

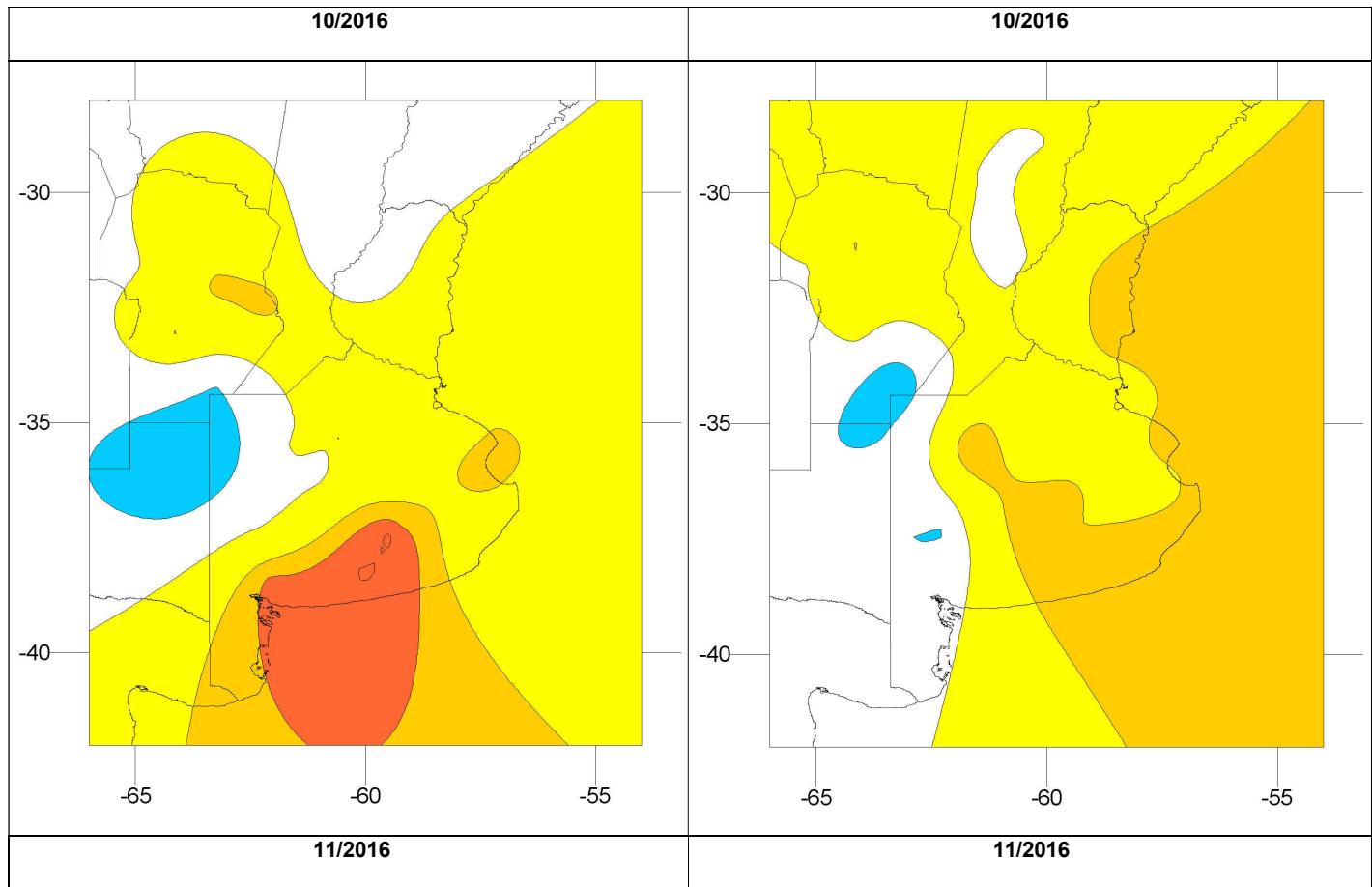
**Figura 18 c)** Ídem Figura 18 a) para casos de sequía del año 2015.

**ANOMALÍA DE HDS (SMOS)**

**IPE3**



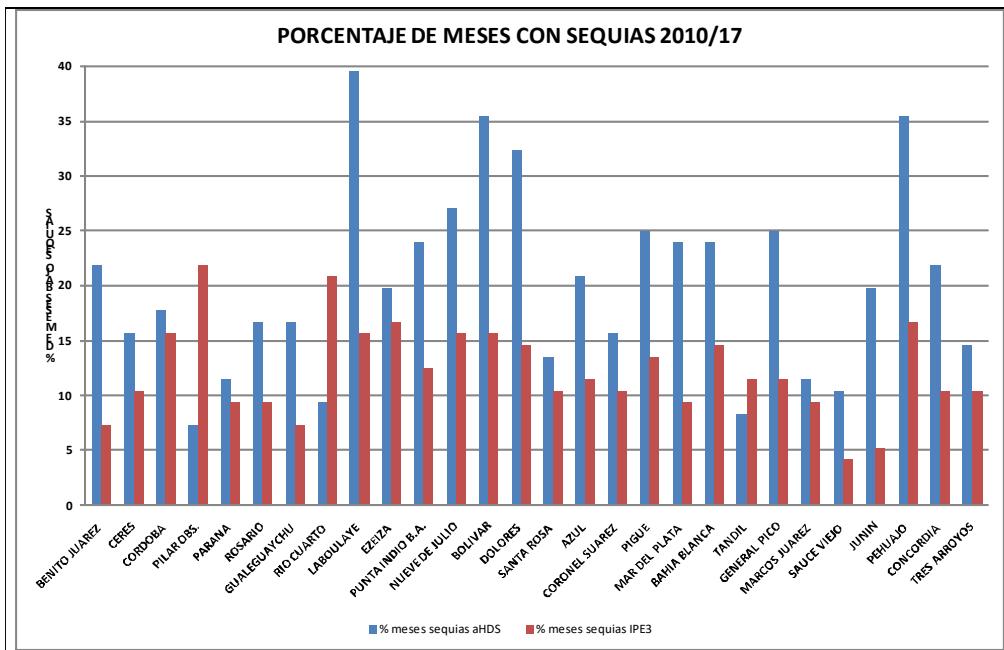




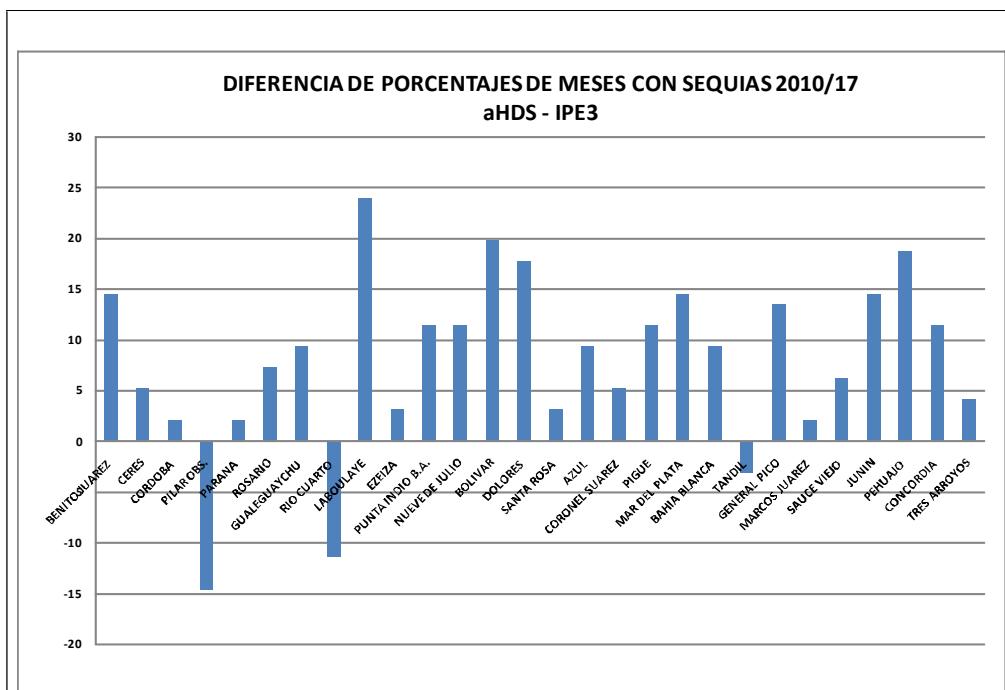
**Figura 18 d)** Ídem Figura 18 a) para casos de sequía del año 2016.

A partir de la comparación de la cantidad de meses con sequías identificados tanto por IPE3 como por la anomalía de HDS de SMOS en base a la categorización propuesta en la Tabla 7, se observa que los meses con sequías obtenidos con SMOS supera a los detectados por IPE3 en la mayoría de las estaciones analizadas (figura 19). En promedio areal y temporal (2010/17) se contabilizan en la región estudiada 12 % del tiempo con alguna categoría de sequias por IPE3 y de 19% del tiempo por SMOS. Con lo cual en promedio se detectaron 15 meses de sequías por década con IPE3 y 24 meses de sequías por década con la anomalía de HDS de SMOS. Las estaciones meteorológicas con más meses detectados bajo condiciones de sequías por la anomalía de HDS de SMOS son Laboulaye, Bolívar, Dolores, Pehuajó, Junín, Benito Juárez y General Pico. En el caso del IPE3 se observaron más meses con sequías respecto a lo identificado a partir de la anomalía de HDS en Pilar, Rio Cuarto y Tandil (Figura 19).

Las diferencias de los meses detectados por cualquier categoría de sequías entre IPE3 y SMOS da en la gran mayoría entre 5-10 % de diferencias, con mayor número de meses con sequía identificados por SMOS (Figura 20).



**Figura 19.** Porcentaje de meses bajo condiciones de sequía identificados a partir de IPE3 y la anomalía de HDS en cada estación meteorológica analizada.



**Figura 20.** Diferencia porcentual de meses bajo condiciones de sequía identificados por la anomalía de HDS respecto a lo obtenido mediante el IPE3.

#### d) Resultados Prueba Piloto: Índice SWDI

Se decidió realizar una prueba piloto del índice SWDI en 6 localidades de la provincia de Buenos Aires, donde se contaban con datos del perfil del suelo en los primeros centímetros (INTA) y HDS,: 9 de Julio, Bolívar, Dolores, Junín, Mar del Plata y Punta Indio.

Se realizaron dos experimentos para el cálculo de los coeficientes hídricos de Capacidad de Campo y Punto de Marchitez por la metodología de los Percentiles y con el uso de los modelos de pedotransferencia. Se calcularon dichos parámetros con ambas metodologías en la localidad de 9 de Julio, donde se contaban con datos del perfil de suelo (% de arena, arcilla y limo en los primeros centímetros) y de HDS (Tabla 8).

De acuerdo a los resultados del índice SWDI en la localidad de 9 de Julio, mediante el uso de los parámetros hídricos obtenidos por ambas metodologías con las anomalías de HDS, se observa que el índice SWDI calculado con la  $\Theta_{CC}$  y  $\Theta_{PM}$  por modelos de pedotransferencia (figura 21 izquierda) tiene mejor desempeño que el mismo índice con método de percentiles (figura 21 derecha). El índice SWDI por el primer método va de la mano con las anomalías de HDS (con un coeficiente de correlación de 0.82, Tabla 8), indicando los períodos normales y de exceso o sequías (aunque no percibe adecuadamente la sequía 2011). En cambio el índice SWDI con el método de percentiles presenta un sesgo seco, con lo cual señala más sequías que lo observado, aunque representa adecuadamente la variabilidad temporal. Esto indica que estos resultados necesitarían una calibración previa para ser utilizados.

MÉTODO	$\Theta_{CC}$ CAPACIDAD DE CAMPO (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	$\Theta_{PM}$ PUNTO DE MARCHITEZ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
PERCENTILES	<b>0,346</b>	<b>0,160</b>
MODELOS	<b>0,204</b>	<b>0,091</b>

**Tabla 8.** Parámetros hídricos para la localidad de 9 de Julio, provincia de Buenos Aires.

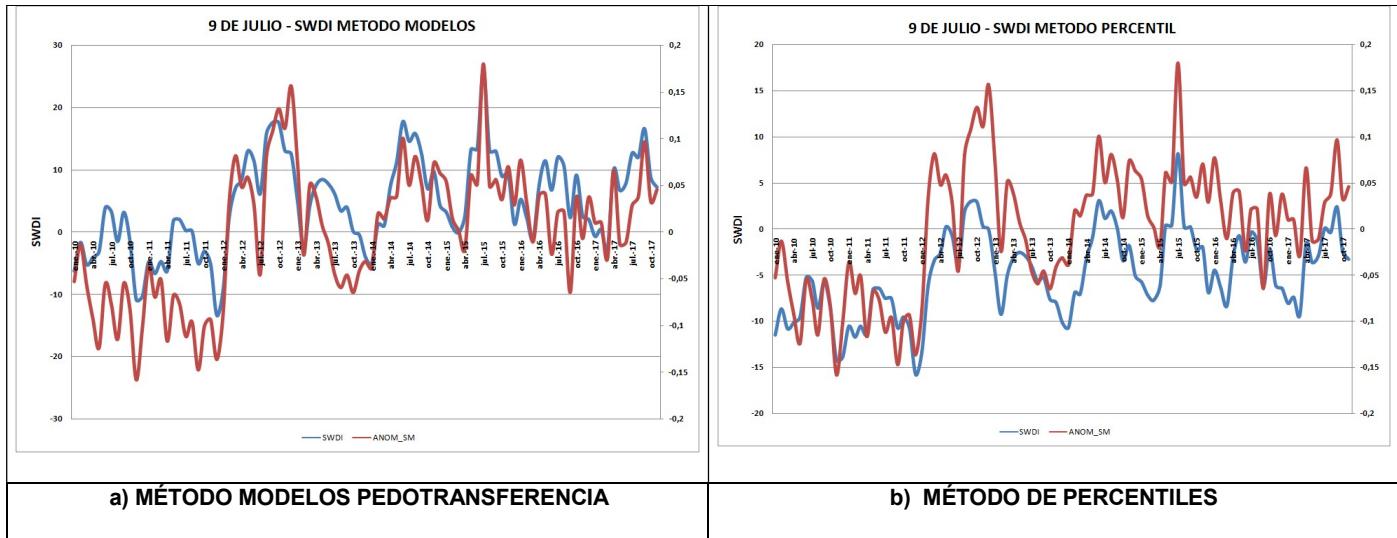
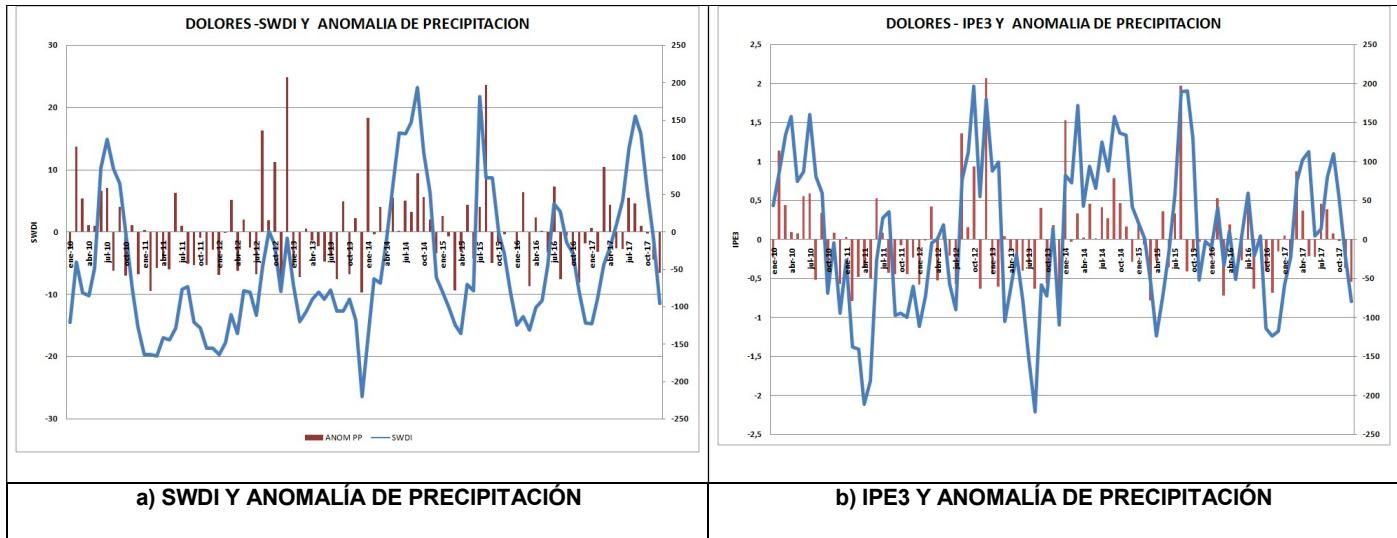


Figura 21 a) y b) SWDI en la localidad de 9 de Julio, provincia de Buenos Aires, calculado por método de Modelos de Pedotransferencia y de Percentiles.

En consecuencia, se utilizará el cálculo de  $\Theta_{CC}$  y  $\Theta_{PM}$  con la ayuda de los modelos de pedotransferencia para el ensayo del índice SWDI en otras estaciones.

En la Figura 22 a) se muestra el resultado del índice SWDI en Dolores (Buenos Aires) comparado con la anomalía de precipitación. De forma similar, la Figura 22 b) muestra la serie de IPE3 en dicha localidad y las anomalías de precipitación. De acuerdo a la figura 22 a) se observa que el SWDI es más estable que IPE3 dentro de la sequía 2011/12, frente a meses aislados con precipitaciones más importantes (175 mm acumulados en junio y julio de 2011). Mientras que el índice SWDI muestra la ocurrencia de una sequía extrema (ver tabla 3) de más de un año en el período 2011/12, con el uso de IPE3 (figura 22 b) la sequía 2011/12 se interrumpe, con valores normales asociados a la reacción del índice a las precipitaciones de mediados de 2011. En consecuencia, se observan 2 períodos secos en lugar de un evento prolongado de sequía con severidad extrema.

En síntesis, el índice SWDI muestra períodos de sequías más estables y extensas en el tiempo, sin verse afectado por la ocurrencia de eventos de lluvias débiles que no cambian las características de las condiciones secas. La alta correlación entre SWDI y aHDS (entre 0.64 y 0.82, Tabla 9), es reflejo de que ambos índices poseen una misma componente (HDS). Pero el agregado de los coeficientes de capacidad de campo y punto de marchitez en SWDI le da un aspecto cualitativo de interpretación con fines agrícolas.



**Figura 22 a) y b)** SWDI e IPE3 junto con la anomalía de precipitación en la localidad de Dolores, provincia de Buenos Aires.

En la figura 23 se muestran los resultados de aplicar el índice SWDI a 6 localidades de testeо. Se observa que el índice SWDI demarca claramente los períodos secos (en diversos niveles de severidad), normales y húmedos en todas las localidades. Hay alternancia de los 3 estadios, acompañando las anomalías de precipitación en cada estación; pero las sequías no se ven interrumpidas por meses aislados de lluvias normales o por encima de lo normal que no revierten la condición de sequía.

Los resultados del índice en Bolívar muestran una variabilidad de períodos húmedos y secos; pero con predominancia de períodos húmedos, en concordancia con las lluvias registradas en dicha localidad entre 2010/17.

En tanto que las estaciones costeras (Mar del Plata y Punta Indio) muestran dicha variabilidad, pero muestran más períodos de sequías que de exceso durante el período analizado. Además, se observa que no concuerdan temporalmente las sequías en las distintas estaciones; evidenciando el comportamiento heterogéneo de las sequías en la Llanura Pampeana.

Otra ventaja del SWDI es brindar información de sequías cuando no se dispone de datos de precipitación en dicha localidad. Esto ocurre durante gran parte del año 2015 en Punta Indio, donde el índice SWDI muestra claramente una sequía agrícola (que se observa en Mar del Plata también) que no se hubiera detectado con IPE3.

Un problema a considerar surge en la estación de 9 de Julio, donde a partir del 2012 los valores del índice no alcanzan el umbral para la definición de sequías, mientras que se registraron anomalías negativas en las lluvias. Esto indicaría que se necesitaría realizar una calibración previa de los valores de HDS estimados por SMOS en la proximidad a dicha ubicación (Figura 23).



**Figura 23.** SWDI y anomalía de la precipitación en 6 localidades de la provincia de Buenos Aires. Período 2010-2017.

	CC
<b>9 DE JULIO</b>	<b>0,82</b>
<b>BOLIVAR</b>	<b>0,86</b>
<b>DOLORES</b>	<b>0,77</b>
<b>JUNIN</b>	<b>0,74</b>
<b>MAR DEL PLATA</b>	<b>0,66</b>
<b>PUNTA INDIO</b>	<b>0,64</b>

**Tabla 9.** Coeficientes de correlación entre SWDI y Anomalía de HDS en 6 localidades de la provincia de Buenos Aires.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La sequía es uno de los principales peligros naturales que ocasionan pérdidas millonarias a la comunidad agrícola de todo el mundo y quizás es el fenómeno natural menos entendido; por su falta de una definición universal, la dificultad para determinar su comienzo, su lento desarrollo y fin, y los diferentes efectos regionales asociados a su ocurrencia.

La agricultura de secano es frecuentemente el primer sector afectado por el inicio de la sequía debido a la dependencia al agua y a las reservas de humedad del suelo durante las diversas etapas del crecimiento de los cultivos. En consecuencia, este trabajo de tesis se centró en el estudio de la Humedad del Suelo (HDS) en condiciones de sequías agrícolas, utilizando las estimaciones de HDS mediante sensores remotos, en especial de la misión SMOS.

Los valores de HDS son una herramienta rápida y aproximada de conocer el balance hídrico en una región, teniendo en cuenta las precipitaciones y las perdidas por evapotranspiración. Los resultados de la regionalización de la HDS concuerdan en general con grandes biomas o áreas ecológicas de la Llanura Pampeana. Se encontraron estimación de HDS no tan confiables en zonas costeras y con cierta topografía (sierras), en concordancia con resultados previos obtenidos en diversas regiones del mundo.

Las relaciones entre las anomalías de HDS (aHDS) y las series de IPE, dan las mayores respuestas de aHDS con IPE3-IPE4-IPE5, con coeficientes de correlación entre anomalía de aHDS e IPE3 a IP5 del orden de  $r = 0.55$ . En función de estos resultados, que concuerdan con publicaciones previas, se adoptó la serie de IPE3 para la identificación de sequías agrícolas, por ser una serie de fácil cálculo y disponibilidad, ya que numerosos centros de investigación y operativos cuentan con ella. Luego se establecieron los rangos de condiciones de excesos, normales y las distintas categorías de sequías para la aHDS, en función de una comparación visual con las series de IPE3, las cuales poseen una categorización definida. Se logró una buena detección de sequías y excesos y además una muy aceptable sincronicidad entre IPE3 y anomalía de HDS.

Se identifican, con una alta coherencia espacial, las áreas afectadas por eventos de sequía, condiciones normales y excesos identificados por el IPE3 y de aHDS. En tanto que las regiones afectadas por eventos de sequía severa y extrema identificadas a partir del IPE3 son representadas por las anomalías negativas de HDS más importantes, observándose una coherencia en la progresión mes a mes de estos eventos. Debe tenerse en cuenta que al trabajar con el IPE3, las series de lluvias representan acumulados trimestrales, mientras que la estimación de humedad de suelo es mensual. Con lo cual la humedad estimada podría estar contenida en otras escalas temporales del IPE (por ejemplo IPE2, IPE4, IPE5).

Los resultados tienden a presentar un sesgo hacia períodos de sequías más prolongados, lo cual podría explicarse por los umbrales elegidos para la aHDS, que surgen de una comparación en una cantidad limitada de estaciones en la Llanura Pampeana. En consecuencia, y ante la imposibilidad de contabilizar más eventos de sequía dado el corto período temporal de comparación -2010 a 2017-, se propone como trabajo a futuro considerar más estaciones para establecer rangos más robustos. No obstante, los resultados preliminares obtenidos en esta tesis muestran que la categorización propuesta resulta en una adecuada detección de sequías

y excesos y buena sincronicidad entre IPE3 y aHDS. Asimismo, este estudio puede ampliarse considerando una mayor frecuencia temporal de las estimaciones SMOS (cada 3 días o semanal) y una región más grande, lo cual requerirá nuevos ejercicios de validación.

Para complementar el análisis de sequías agrícolas a partir de la aHDS se realizó una prueba piloto en 6 localidades de la provincia de Buenos Aires mediante el Soil Water Deficit Index (SWDI). Esto se logró mediante el uso de la HDS como variable de entrada, con la ayuda de datos de composición del suelo en los primeros centímetros del suelo y los modelos de pedotransferencia. El análisis permite concluir que el índice SWDI demarca claramente los períodos secos (en diversos niveles de severidad), normales y húmedos en todas las localidades y a la vez exhibe períodos de sequías más estables y extensos en el tiempo, sin verse afectado por la ocurrencia de eventos de lluvias dispersos. No obstante, una desventaja de este índice es la demanda de datos de perfil del suelo, los cuales sólo se encuentran disponibles en la provincia de Buenos Aires.

El presente trabajo con estimaciones satelitales de HDS a partir de datos de SMOS permite introducir la teoría y el uso de técnicas novedosas para la obtención de HDS en los primeros centímetros de suelo. Esta investigación es el puntapié inicial para avanzar y trabajar con información proveniente otras de las misiones, como SMAP y la misión argentina SAOCOM.

En base a los resultados obtenidos se propone como trabajo futuro utilizar otros productos de la misión SMOS, como por ejemplo el producto L4, que integra la HDS de la estimación con un modelo hidrológico, para llegar a estimaciones de la HDS en profundidad (hasta 1 metro del perfil de suelo). Un próximo paso sería evaluar el desempeño del producto L4, ya que daría estimaciones de HDS a mayor profundidad, donde se desarrollan las raíces de las plantas.

Otro tema a desarrollar sería el tratamiento conjunto de información observada de freátímetros y de estimaciones satelitales de HDS, con el fin de evaluar la identificación y variación de la napa freática; de importancia para planificación de prácticas agronómicas y manejo de excesos y déficits hídricos.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- Agnew, C.T. 2000. Using the SPI to identify drought. *Drought Network News*, 12, 6–12.
- Aliaga, V. S. 2018. Variabilidad climática de la Región Pampeana y su efecto sobre las lagunas de la región. Tesis doctoral, Universidad Nacional del Sur. Departamento de Geografía y Turismo. (Bahía Blanca, Argentina).
- Angella, G., C Frais, R. Salgado. 2016. Conceptos básicos de las relaciones agua-suelo-planta. ISBN ISSN 1850-4086. INTA EDICIONES.
- Antelo M., Fernandez Long M.E. 2012. Caracterización agroclimática del agua en el suelo en Buenos Aires y Patagonia. *Actas 1er Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos. 14-15 junio 2012. Ezeiza, Buenos Aires, Argentina.*
- Bryant, E.A. 1991. *Natural Hazards*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Bolsa de Cereales. 2018. Campaña 2017/18: Evaluación del Impacto Económico de la Sequia (Informe). Argentina. <http://www.bolsadecereales.com>.
- Burkart R., Bárbaro N., Sánchez R., Gómez D. 1999. Eco-regiones de la Argentina. Administración de Parques Nacionales. Secretaría de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable. Presidencia de la Nación.
- Burgos, J. J. 1982. El programa “Excesos y deficiencias de agua en la República Argentina” del Centro de Investigaciones Biometeorológicas (CIBIOM - CONICET) Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria (ANAV), tomo XXXVI.
- Burgos, J. J., Vidal A. L. 1951. “Los climas de la República Argentina, según la nueva clasificación de Thornthwaite”. Serie agroclimática. Publ. N° 3, 32 págs. Servicio Meteorológico Nacional. Buenos Aires.
- Carrasco Galleguillos F.C., Basualdo, A., Boragno S., Ochiuzzi S. 2018. TVDI: un índice satelital para el monitoreo de sequías y excesos hídricos. “RADA 2018” XVII Reunión Argentina de Agrometeorología, Argentina.
- Cavalcanti I., Carril A., Penalba O., Grimm A., Menéndez C., Sanchez E., Cherchi A., Sörensson A., Robledo F., Rivera J., Pántano V., Bettolli M., Zaninelli P., Zamboni L., Tedeschi R.G., Dominguez M., Ruscica R., Flach R. 2015. Precipitation extremes over La Plata Basin – review and new results from observations and climate simulations. *Journal of Hydrology* 523: 211–230. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.028>.
- Censo nacional de población, hogares y viviendas 2010: censo del Bicentenario: resultados definitivos, Serie B nº 2. - 1a ed. - Buenos Aires, Instituto Nacional de Estadística y Censos - INDEC, 2012.
- Champagne C., Davidson A., Cherneski P., L'Heureux J., Hadwen T. 2015. Monitoring agricultural risk in Canada using L-band passive microwave soil moisture from SMOS. *J. Hydrometeorol.*, 16, 5–18.

- Dai, A., K. E. Trenberth, T. Qian. 2004. A global data set of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. *Journal of Hydrometeorology* 5(6):1117-1130.
- Damario E., Pascale J. 1988. Características Agroclimáticos de la Región Pampeana Argentina. *Revista Facultad de Agronomía*, 9(1-2):41—64.
- Damiano, F. Taboada M.A. 2000. Predicción del agua disponible usando funciones de pedo-transferencia en suelos agrícolas de la región pampeana, *Ciencias del Suelo*, 18:77-88.
- Dobson M C, Ulaby F T, Hallikainen M T, El-Rayes M A. 1985. Microwave Dielectric Behaviour of Wet Soil- Part II: Dielectric Mixing Models. *IEEE Trans Geosci Rem Sens*, GE-23(1): 35–46.
- FAO (Food and Agriculture Organization) a) FAO, IFAD, UNICEF, WFP y WHO. 2018. The State of Food Security and Nutrition in the World 2018. Building climate resilience for food security and nutrition. Rome, FAO.
- FAO (Food and Agriculture Organization) b) FAO's Work on Climate Change. United Nations Climate Change Conference 2018 <http://www.fao.org/3/CA2607EN/ca2607en.pdf>
- FAO (Food and Agriculture Organization) c) FAO. 2018. The State of Agricultural Commodity Markets 2018. Agricultural trade, climate change and food security. Rome, Italy.
- FAO (Food and Agriculture Organization) d) FAO. 2018. The impact of disasters and crises on agriculture and food security 2017. Italy. ISBN: 978-92-5-130359-7.
- Fernández Long, M. E., Gattinoni N. N.; Spennemann P. C. 2018. Inter-comparacion y validación de simulaciones de la humedad del suelo en la Pampa Húmeda. "RADA 2018" XVII Reunión Argentina de Agrometeorología, Argentina.
- Gómez P., Peretti M., Pizarro J., Cascardo A. 1991. Delimitación y caracterización de la región. En El Desarrollo Agropecuario Pampeano. INDECINTA-IICA., Buenos Aires, p. 77-93.
- Grings F., Bruscantini C., Smucler E., Carballo F., Dillon M. E., Collini E., Salvia M., Karszenbaum H. 2015. Validation Strategies for Satellite-Based Soil Moisture Products Over Argentine Pampas. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 8. 4094-4105. 10.1109/JSTARS.2015.2449237.
- Guida Daza C. A. 2017. La agricultura pampeana. Evolución de resultados económicos en el período 1990-2016. Informe INTA Grupo Economía, INTA EEA Marcos Juárez.
- Hayes M., Svoboda M., Wall N., Widham M. 2011. The Lincoln Declaration on Drought Indices: Universal meteorological Drought Index Recommended. *Bulletin of the American Meteorological Society* 92 (4): 485-488.
- Holzman, M.E., Rivas R., Piccolo M.C. 2014 a. Estimating soil moisture and the relationship with crop yield using surface temperature and vegetation index. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 28: 181-192.
- Holzman, M.E., Rivas R., Bayala M. 2014b. Subsurface soil moisture estimation by VI-LST method. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11 (11): 1951-1955.

Hunt E. D., Hubbard K. G., Wilhite D. A., Arkebauer T. J., Dutcher, A. L. 2009. The development and evaluation of a soil moisture index. *International Journal of Climatology*, 29, 747–759.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. Climate Change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, L.L. White, eds. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA. 1132 pp.

Kerr Y.H., Jacquette E., Al Bitar A., Cabot F., Mialon A., Richaume P., Quesney A., Berthon L. 2013. "CATDS SMOS L3 soil moisture retrieval processor Algorithm Theoretical Baseline Document (ATBD)". Technical Note SO-TN-CBSA-GS-0029, Issue 2.0, institution CBSA, 73 p.

Kerr Y., P. Waldteufel, P. Richaume, J. P. Wigneron, P. Ferrazzoli, A. Mahmoodi, A. Al Bitar, F. Cabot, C. Gruhier, S. E. Juglea, D. Leroux, A. Mialon, S Delwart. 2012. The SMOS Soil Moisture Retrieval Algorithm, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 50, pp. 1367-1383.

Labraga J.C., Brandizi L.D., López M.A. 2011. Avances en el pronóstico climático de las anomalías de lluvia en la Región Pampeana. *Meteorológica*, 36(2), 59-71.

Lamb P.J., Changnon Jr. S.A. 1988. On the "best" temperature and precipitation normals: the Illinois situation. *Journal of Applied Meteorology* 20: 1383-1419.

Lloyd-Hughes, B. 2002. The Long-Range Predictability of European Drought, Tesis doctoral, University College London, 203 pp.

MacQueen, J.B. 1967. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 1, 281-297.

Martínez-Fernández J., Ceballos A., Casado S., Morán C., Hernández V. 2005. Runoff and soil moisture relationships in a small forested basin in the Sistema Central ranges (Spain). In: Batalla, R.J., García, C. (Eds.), *Geomorphological Processes and Human Impacts in River Basins*. IAHS Press, Wallingford, UK, pp. 31–36, IAHS Publ. 299

Martínez-Fernández J., González-Zamora A., Sánchez N., Gumuzzio A. 2015. A soil water based index as a suitable agricultural drought indicator. *J. Hydrol.* 522, 265–273.

Martínez-Fernández J., González-Zamora A., Sánchez N., Gumuzzio A., Herrero-Jiménez C.M. 2016. Satellite soil moisture for agricultural drought monitoring: Assessment of the SMOS derived Soil Water Deficit Index. *Remote Sens. Environ.* 177, 277–286.

McKee T. B., Doesken N.J., Kleist J. 1995. Drought monitoring with multiple time scales. Ninth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Jan15-20, 1995, Dallas TX, pp.233-236.

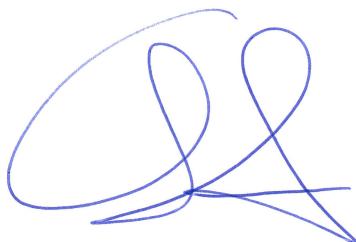
McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J. 1993. The relation of drought frequency and duration to time scales. Pre-print, 8th Conference on Applied Climatology, 179-184.

- Mecklenburg, S., Drusch, M., Kaleschke, L., Rodriguez-Fernandez, N., Reul, N., Kerr, Y., Font, J., Martin-Neira, M., Oliva, R., Daganzo-Eusebio, E., 2016. ESA's Soil Moisture and Ocean Salinity mission: From science to operational applications. *Remote Sens. Environ.*, 180, 3–18.
- Mialon A., Coret L., Kerr Y., Wigneron J.P. 2008. Flagging the Topographic Impact on the SMOS Signal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 46 (3), pp.689-694. 10.1109/TGRS.2007.914788. hal-00297786.
- Mishra, A.K., Singh, V.P. 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology* 391: 202-216.
- Moran M S, Watts J M, Peters-Lidard C D, McElroy S A. 2004. Estimating soil moisture at the watershed scale with satellite-based radar and land surface models. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30(5): 805–826.
- Murphy G., Hurtado R. 2006. Variabilidad del límite occidental de la región agrícola de secano en la Argentina. XI Congreso Argentino de Agrometeorología. La Plata. Buenos Aires. Septiembre 2006.
- Nagore M L, A Maggiora, F Andradea, L Echartea. 2017. Water use efficiency for grain yield in an old and two more recent maize hybrids. *Field Crops Research* 214:185-193.
- Niclòs, R. Rivas, R., García-Santos, V., Doña, C., Valor, E., Holzman, M., Bayala, M., Carmona, F., Ocampo, D., Soldano, A., Thibeault, M. 2015. "SMOS soil moisture product validation in croplands". *IEEE transactions on geoscience and remote sensing PP* (99): 1-14.
- Office of Foreign Disaster Assistance. 1990. Annual Report, Washington, DC: Office of Foreign Disaster Assistance.
- OMM-N° 1006, 2006. Organización Meteorológica Mundial. Vigilancia y alerta temprana de la sequía: conceptos, progresos y desafíos futuros. ISBN 92-63-31006-8.
- Panu U. S., Sharma T. C. 2002. Challenges in drought research: Some perspectives and future directions. *Hydrological Sciences Journal*, 47(S), S19–S30.
- Pántano V. 2011. Análisis de las Condiciones Hídricas de la región oriental argentina de producción agrícola en secano. Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera. Universidad de Buenos Aires.
- Pántano V., Spescha L., Penalba O., Murphy G. 2014. Influencia de la variabilidad de temperatura y precipitación en la Situación Hídrica del suelo, en la región oriental de secano de la Argentina. *Meteorología*. 39. 21.
- Pántano V., Penalba O., Spescha L., Murphy G. 2017. Assessing how accumulated precipitation and long dry sequences impact the soil water storage. *International Journal of Climatology*. 37. 10.1002/joc.5087.
- Paredes F., Barbosa H. 2017. Evaluation of the SMOS-Derived Soil Water Deficit Index as Agricultural Drought Index in Northeast of Brazil. *Water*. 9. 21. 10.3390/w9060377.

- Parrens, M.; Zakharova, E., Lafont, S., Calvet, J.-C., Kerr, Y., Wagner, W., Wigneron, J.-P. 2011. Comparing soil moisture retrievals from SMOS and ASCAT over France. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 8, 8565–8607.
- Pastor J., Post W.M. 1986. Influence of climate, soil moisture, and succession on forest carbon and nitrogen cycles. *Biogeochemistry* 2: 3. <https://doi.org/10.1007/BF02186962>.
- Penalba O.C., Vargas W.M. 2008. Review. Variability of low monthly rainfall in La Plata Basin. *Meteorological Applications* 15: 313–323.
- Penalba O. C., Rivera J. A. 2016. Precipitation response to El Niño/La Niña events in Southern South America – emphasis in regional drought occurrences, *Adv. Geosci.*, 42, 1–14, <https://doi.org/10.5194/adgeo-42-1-2016>.
- Penalba O., Vargas W. 2004. Interdecadal and Interannual variations of annual and extreme precipitation over central-northeastern Argentina. *International Journal of Climatology*. 24. 1565 - 1580. 10.1002/joc.1069.
- Piedallu C., Gégout J.-C., Bruand A., Seynave I. 2011. Mapping soil water holding capacity over large areas to predict potential production of forest stands. *Geoderma* 160, 355–366.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 2006. *Geo Anuario 2006*. ISBN: 92-807-2670-6
- Redmond KT. 2002. The depiction of drought: A commentary. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83: 1143-1147.
- Rodríguez-Fernández, N.J., Kerr, Y.H., van der Schalie, R., Al-Yaari, A., Wigneron, J.-P., de Jeu, R., Richaume, P., Dutra, E., Mialon, A., Drusch, M.. 2016. Long Term Global Surface Soil Moisture Fields Using an SMOS-Trained Neural Network Applied to AMSR-E Data. *Remote Sens.* 8, 959
- SADCC. 1992. *Food Security Bulletin*, Gaborone, Botswana: SADC.
- Sánchez N., Martínez-Fernández J., González-Zamora A., Sánchez N., Martínez-Fernández J., González-Zamora A. 2016. An Combined Approach with SMOS and MODIS to Monitor Agricultural Drought. *ISPRS Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, XLI-B8, 393–
- Savage M.J., Ritchie J.T., Bland W.L., Dugas W.A. 1996. Lower limit of soil water availability. *Agron. J.* 88, 644–651.
- Scaini A., Sánchez N., Vicente-Serrano S.M., Martínez-Fernández J. 2015. SMOS-derived soil moisture anomalies and drought indices: A comparative analysis using in situ measurements. *Hydrol. Process.*, 29, 373–383.
- Scarpatti, O. E., Capriolo, A. D. 2016. Sequías agrícolas: recurrencia, clasificación y distribución en la Región Pampeana argentina. *Cuadernos Geográficos*, vol. 55, núm. 1, 2016, pp. 6-32 Universidad de Granada, Granada, España.
- Scian, B. V. 1999. “Variabilidad interanual de la precipitación en la Pradera Pampeana y su relación con algunos índices de circulación atmosférica”. Tesis de Doctor. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.

- Schaap M.G., Leij F.J., van Genuchten M.Th. 2001. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol.* 251, 163–176.
- Schmugge, T.J., W.P. Kustas, J.C. Ritchie, T.J. Jackson, and A. Rango. 2002. Remote sensing in hydrology. *Advances in Water Resources* 25:1367-1385.
- Seneviratne, S. I., T. Corti, E. L. Davin, M. Hirschi, E. B. Jaeger, I. Lehner, B. Orlowsky, and A. J. Teuling, 2010. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. *Earth Sci. Rev.*, 99, 125–161, doi:10.1016/j.earscirev.2010.02.004.
- Sitch S., Smith B., Prentice I.C., Arneth A., Bondeau A., Cramer W., Kaplan J.O., Levis S., Lucht W., Sykes M.T., Thonicke K., Venevsky S. 2003. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 9: 161-185. doi:10.1046/j.1365-2486.2003.00569.x
- Sivakumar M.V.K., Motha R. P., Wilhite D.A., Wood D. A. (Eds.). 2011. Agricultural Drought Indices. Proceedings of the WMO/UNISDR Expert Group Meeting on Agricultural Drought Indices, 2-4 June 2010, Murcia, Spain: Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization. AGM-11, WMO/TD No. 1572; WAOB-2011. 197 pp.
- Soriano A., León R.J.C., Sala O.E., Lavado R.S., Dereibus V.A., Cahuepé M.A., Scaglia O.A., Velazquez C.A., Lemcoff J.H. 1992. Río de la Plata grasslands. *Ecosystems of the world* 8A. Natural grasslands. Elsevier.
- Sosa, G.D.; Fernández Long, M.E.; Spescha, L.B. 2018. Evaluación de dos índices como indicadores de sequía agrícola en la Región Pampeana (Argentina). “RADA 2018” XVII Reunión Argentina de Agrometeorología, Argentina.
- Spennemann P., Rivera J.A., Saulo C., Penalba O. 2015: A Comparison of GLDAS Soil Moisture Anomalies against Standardized Precipitation Index and Multisatellite Estimations over South America. *Journal of Hydrometeorology*, 16, 158–171. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JHM-D-13-0190.1>
- Spennemann P. C., Ruscic R., Salvia M., Sörensson A., Grings F. , Karzsebaum H. 2018. Land-atmosphere interaction patterns in southeastern South America using satellite products and climate models. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2017.08.016>
- Stoffelen A. 1998. Toward the true near-surface wind speed: Error modeling and calibration using triple collocation. *J. Geophys. Res.*, vol. 103,no. C4, pp. 7755–7766
- Stone R. C. 2014. Constructing a framework for national drought policy: The way forward – The way Australia developed and implemented the national drought policy, *Weather and Climate Extremes*, 3, (117).
- Tannehill, I.R. 1947. Drought: Its Causes and Effects. Princeton University Pres, Princeton, New Jersey.

- Thom, H. C. S. 1966. Same methods of climatological analyses. World Meteorological Organization, Geneva, 53p. (WMO, 199; TP, 103; Technical note 81).
- Thorntwaite, C. W. 1948. "An approach toward a rational classification of climate". Geogr. Rev., 38:85-94.
- Torres G.M., Lollato P.R., Ochsner T.E. 2013. Comparison of drought probability assessments based on atmospheric water deficit and soil water deficit. Agron. J. 105, 428–436.
- Vicente-Serrano S., Beguería S., Lorenzo-Lacruz J., Camarero J., López-Moreno J.I., Azorin-Molina C., Revuelto J., Morán-Tejeda E., Sanchez-Lorenzo A. 2012. Performance of Drought Indices for Ecological, Agricultural, and Hydrological Applications. Earth Interactions. 16, 1-27. 10.1175/2012EI000434.1.
- Viglizzo, E.F., Lértora F., Pordomingo A. J., Bernardos J. N., Roberto Z. E., Del Valle, H. 2001. Ecological lessons and applications from one century of low external-input farming in the pampas of Argentina. Agriculture, Ecosystems and Environment 83:65-81.
- Wang Lingli, J. J. QU. 2009. Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review. Front Earth Sci Chin, 3(2): 237-247.
- WASDE. 2016. Word Agricultural Supply and Demand Estimates Report, USDA. web <https://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/latest.pdf>
- Western A.W., Grayson R.B., Blöschl G. 2002. Scaling of Soil Moisture: A Hydrologic Perspective. Annual Review of Earth and Planetary Sciences. Vol. 30:149-180.
- White, D.H.; Walcott. J. J. 2009. The role of seasonal indices in monitoring and assessing agricultural and other droughts: A review. Crop and Pasture Science 60:599-616.
- Wilhite D A.. 2000. Chapter 1 Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions. Drought: A Global Assessment, Vol. I, edited by Donald A. Wilhite, chap. 1, pp. 3–18.
- Wilhite, D. A., Glantz, M. H. 1985. Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. Water International 10: 111–20.
- Wong G., Lambert M.F., Leonard M., Metcalfe A.V. 2010. Drought Analysis Using Trivariate Copulas Conditional on Climatic States. Journal of Hydrologic Engineering - J HYDROL ENG. 15. 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000169.



Lic Gustavo J ALMEIRA

Tesista



Dr Juan RIVERA

Director