



Facultad de Ciencias Agrarias
Universidad Nacional de Rosario

“Las masas de aire que afectan al Departamento Rosario durante el período crítico del cultivo de maíz (Zea mays L.)”

Ing. Agr. María José Dickie

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN MANEJO Y CONSERVACIÓN
DE RECURSOS NATURALES

DIRECTORA: Dra. Alejandra Coronel

Año: 2016

“Las masas de aire que afectan al Departamento Rosario durante el período crítico del cultivo de maíz (Zea mays L.)”

María José Dickie. Ingeniera Agrónoma, FCA, UNR

Esta Tesis es presentada como parte de los requisitos para optar al grado académico de Magister en “MANEJO Y CONSERVACIÓN DE RECURSOS NATURALES”, de la Universidad Nacional de Rosario y no ha sido previamente presentada para la obtención de otro título en ésta u otra Universidad. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el Departamento Rosario, Santa Fe durante el período comprendido entre el 2015 y 2016, bajo la dirección de la Dra. Alejandra Coronel.

Nombre y firma del Maestrando:



Ing. Agr. María José Dickie

Nombre y firma de la Directora:



Dra. Alejandra Coronel

Defendida:de 20__.

Agradecimientos

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que me brindaron sus conocimientos, su ayuda, su apoyo durante todo este trayecto de aprendizaje y crecimiento, tanto profesional como personal.

Gracias infinitamente a la Dra. Alejandra Coronel, por su generosidad profesional y personal, que exterioriza su calidad humana, por su entera dedicación en este trabajo. Gracias también a su constante motivación que me permitió ahondar en esta apasionante disciplina. Gracias a su familia, que también fue pilar fundamental en este camino.

Gracias a la Ing. Agr. Julia Capurro, por compartirme sus experiencias y conocimientos, por estimular a mi crecimiento profesional. Y por sobre todo gracias por demostrarme día a día la clase de persona que es.

A mis compañeros de Cátedra, por apoyarme siempre y colaborar en este trabajo, Ings Agrs: Marta Costanzo, Emiliano Jozami y Verónica Anibalini, gracias.

A la directora de la Carrera Dra. Mónica Sacido, a la anterior directora, Dra Susana Feldman y a la Comisión de Posgrado de la Maestría, por darme la posibilidad de poder finalizar la carrera.

Gracias a mi familia, que siempre me acompañan y me dan las fuerzas para seguir avanzado en este camino.

A Lisandro que sin su apoyo incondicional no podría haber realizado este trabajo.

Gracias a todos por contribuir en hacer realidad este logro

ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
I. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO SOBRE EL TEMA	1
II. HIPÓTESIS:	9
Primera hipótesis.....	9
Segunda hipótesis	9
III. OBJETIVOS GENERALES.....	9
Objetivos específicos.....	9
CAPÍTULO II.....	10
RELACIÓN ESTADÍSTICA ENTRE LOS RENDIMIENTOS DE MAÍZ Y LA OCURRENCIA DE DEFICIENCIAS HÍDRICAS.....	10
I. INTRODUCCIÓN	10
HIPÓTESIS DEL CAPITULO	13
OBJETIVO GENERAL	13
II. MATERIALES Y MÉTODOS	13
II.1. Caracterización de la región de estudio	13
II.2. Información de rendimientos.....	14
II.3. Información meteorológica:.....	14
II.4. Determinación objetiva del período crítico de maíz.....	15
II.4.a. Análisis de los rendimientos de maíz	15
II.4.b. Cálculo de la Evapotranspiración de referencia	17
II.4.c. Cálculo del Balance hidrológico seriado decádico.....	18
II.4.d. Determinación objetiva del PC de maíz	20
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
III.1. Variación de los rendimientos, área sembrada y área cosechada.....	21

III.2. Balance hídrico seriado.....	25
III.3. Determinación del PC	28
IV. CONCLUSIONES	38
CAPITULO III.....	39
Caracterización de las masas de aire asociadas a la ocurrencia de DHS durante los PC de maíz	39
I. INTRODUCCIÓN	39
HIPÓTESIS DE ESTE CAPÍTULO:	40
OBJETIVOS:.....	40
II. MATERIALES Y MÉTODOS	40
II. 1. Información meteorológica.....	40
II.2. Identificación de las masas de aire diarias que ocurren en los períodos críticos del cultivo.	41
II.3. Establecer la frecuencia y persistencia de masas de aire en años con deficiencia hídrica severa, y sus patrones medios de circulación asociados.	44
III. RESULTADOS.....	45
III.1. Periodo Crítico 1: 2° década de Noviembre	45
III. 2. Periodo Crítico 2: 2° década de Diciembre - 1° década de Enero	54
III.3. Patrones sinópticos.....	66
III.3.2. Patrones sinópticos asociados a mTS durante el PC2.....	70
III.3.2. Patrones sinópticos asociados a mCS durante el PC2.....	74
III. DISCUSIÓN	78
IV. CONCLUSIONES	83
BIBLIOGRAFÍA	85
ANEXO I	99
Líneas Futuras de Investigación	99

Abreviaturas y símbolos

Alm	Almacenaje del suelo
ANOVA	Análisis de la varianza (por sus siglas en inglés)
BH	Balance hídrico
BHC	Balance hídrico climático
BHS	Balance hídrico seriado
BHSd	Balance hídrico seriado decádico
°C	Grados centígrados
CC	Capacidad de campo
CpMallows	Criterio de selección de Mallows
CV	Coefficiente de variación
DEF	Déficit
Depto	Departamento
DH	Deficiencias hídricas
DHL	Deficiencias hídricas leves
DHM	Deficiencias hídricas moderadas
DHS	Deficiencias hídricas severas
DH2N	Deficiencias hídricas 2° década de noviembre
DH2D	Deficiencias hídricas 2° década de diciembre
DH3D	Deficiencias hídricas 3° década de diciembre
DH1E	Deficiencias hídricas 1° década de enero
DHPC1	Deficiencias hídricas período crítico 2° década de noviembre
DHPC2	Deficiencias hídricas período crítico 2° y 3° década de diciembre a 1° década de enero.
DIC	Diciembre
Dism	Disminución
DS	Desvío estándar

DSSAT	The Decision Support System for Agrotechnology Transfer
e_a	Presión de vapor actual
E.E	Error Estándar
ENE	Enero
ENOS	Fenómeno de El Niño - Oscilación Sur
EXC	Exceso hídricos
e_s	Presión de vapor a saturación a la temperatura promedio del aire
Est	Estadístico
ETo	Evapotranspiración de referencia
ER	Evapotranspiración real
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
G	Flujo de calor latente desde el suelo
Ha	Hectáreas
Hef	Heliofanía efectiva
hPa	Hectopascales
HR	Humedad relativa
HRm	Humedad Relativa media
Hs	Horas
INTA	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
k	Función percentil
kg.ha^{-1}	kilos por hectareas
kPa	Kilos Pascales
LI	Límite inferior
LS	Límite superior
m^2	Metros cuadrado
ma1, ma2, ma3, ma4, ma5	Masa de aire uno, dos, tres, cuatro y cinco, respectivamente
mCS	Masa de aire cálida seca

mFS	Masa fría seca
MJ	Mega joule
mm	Milímetros
mm.día ⁻¹	Milímetros por día
m.s ⁻¹	Metros por segundo
mTS	Masa de aire templada seca
mTH	Masa de aire templada húmeda
mTHP	Masa templada húmeda con precipitaciones
mTHsP	Masa templada con elevada humedad relativa sin precipitaciones
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NOV	Noviembre
O	Oeste
P	Persistencia
Patm	Presión atmosférica
PC	Período crítico
PC1	Período crítico, 2° década de noviembre
PC2	Período crítico, 2° y 3° década de diciembre y 1° década de enero
PM	Punto de marchitez
PP	Precipitación
p-valor	Valor probabilístico
%	Porcentaje
R	Rendimiento
R ²	Coeficiente de regresión lineal
Raj	Rendimiento ajustado por una función polinómica de segundo grado
Ref	Referencia
Rn	Energía de radiación neta

Rst	Rendimiento sin tendencia
SAGPYA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos de la Nación
S	Secuencia
S	Sur
T	Prueba de Student
Tmax	Temperatura máxima
Tmed	Temperatura media
Tmin	Temperatura mínima
u_2	Velocidad del viento a 2 m de altura
VIF	Factor de inflación de varianza (por su sigla en inglés)
γ	Constante psicométrica
Δ específica	Pendiente de la curva de presión de la saturación de vapor a una temperatura específica
Δ ALM	Variación de almacenaje
P	Coefficiente de correlación de Spearman

Resumen

El maíz, *Zea mays* L., es uno de los granos alimenticios más antiguos que se conocen y debido a sus grandes bondades y multitud de usos se ha convertido en el cultivo más importante entre los cereales a nivel mundial por su producción. En Argentina se ubica en el tercer puesto según su producción, luego de los cultivos de soja y caña de azúcar. Las condiciones ambientales de temperatura, radiación y agua son factores determinantes en el crecimiento, desarrollo y en la producción final del cultivo. El agua disponible es generalmente el principal factor que limita el crecimiento y rendimiento del cultivo de maíz en condiciones extensivas. El grado de sensibilidad al estrés hídrico en este cultivo, depende del momento en que ocurra. Es muy sensible a situaciones de estrés hídrico durante la floración, dado que su principal órgano de interés comercial, la espiga, se encuentra relegada por la dominancia apical ejercida por la panoja. Esta característica, junto con su hábito de crecimiento determinado, le confiere al maíz inestabilidad en el rendimiento frente a situaciones de estrés en floración, lo cual determina que su período crítico es de 30 días centrados en floración. Estrés hídrico en etapas vegetativas afecta la expansión foliar reduciendo el índice de área foliar y la radiación incidente interceptada.

Este cultivo tiene gran sensibilidad a los cambios de las lluvias con el tiempo, debido a su escasa extensión radicular (extractora de agua) en la capa sub-superficial del suelo y una gran superficie foliar consumidora de agua. Esto lo hace apto para estudiar su rendimiento en función solo del clima. Desde el punto de vista agronómico y económico, es muy importante el análisis del impacto que las deficiencias hídricas severas asociadas a sequías han tenido en un cultivo de gran difusión regional como el maíz.

El área de estudio de esta tesis se ubica en el Departamento Rosario, provincia de Santa Fe, con el fin de determinar objetivamente el periodo crítico del cultivo de maíz, identificar las masas de aire que afectan al Departamento Rosario en dicho periodo y establecer la frecuencia y persistencia de masas de aire en años con deficiencias hídricas severas, y sus patrones medios de circulación. Para ello se utilizan las técnicas estadísticas de regresión lineal múltiple y análisis de conglomerados. La información meteorológica corresponde a la estación agrometeorológica de Zavalla (33°01´S, 60°53´O), y los datos de rendimientos de maíz son del Departamento Rosario.

La humedad en la zona radical se estima mediante un Balance Hídrico seriado decádico (diez días). El Balance Hídrico es un modelo simplificado de estimación de la reserva de agua en la zona de exploración radicular o sea en la zona insaturada del suelo. A partir del mismo es posible cuantificar la disponibilidad de humedad durante el ciclo de un cultivo y el agua consumida por la planta.

En estudios referentes a fenómenos meteorológicos asociados a una región, la Climatología Sinóptica permite analizar las interacciones existentes entre la circulación atmosférica y las condiciones presentes en superficie. En particular, los métodos de clasificación y caracterización de masas de aire se basan en las similitudes de las características higrotérmicas del aire, siendo concebible que los campos de presión y viento puedan variar a lo largo del tiempo dentro de la masa de aire.

Se determinaron dos periodos críticos de maíz, por orden de su impacto en la disminución del rendimiento uno ocurre entre la 2° década de diciembre y 1° década de enero (PC2), cuando se encuentra en floración, R1 (Estado Reproductivo) e inicio de llenado de granos, y el otro momento crítico (PC1) se presenta en la 2° década de noviembre, en este período ocurre la emergencia y el cambio de estado del meristema apical, dando por finalizada la etapa vegetativa. Cuando ocurren deficiencias hídricas severas en ambos PC los rendimientos de maíz pueden disminuir hasta un 56% respecto de los rendimientos esperados. Las masas de aire más frecuentes y de mayor persistencia durante ambos períodos críticos del cultivo de maíz están caracterizadas en general por condiciones de altas temperaturas, bajas humedades relativas, y en cuanto a las precipitaciones las mismas pueden ser nulas o de pocos mm. Estas condiciones ambientales afectan al crecimiento y desarrollo del cultivo, ya que la combinación de altas temperaturas y DH causan una mayor reducción de la fotosíntesis y en consecuencia del rendimiento del cultivo. Las condiciones predominantes de los patrones de circulación relacionados a estas masas de aire, evidencian una fuerte subsidencia sobre el centro norte del país que impide el ascenso de las masas de aire y una advección de aire cálido desde el norte y noroeste.

ABSTRACT

Air masses which affect the Department of Rosario during the critical period in corn crop (*Zea mays* L.).

Temperature, radiation and water are determinant factors in the growth, development and final production of corn and its sensitivity to water stress depends on the time this last one happens.

The study area is located in the Department of Rosario with the aim of determining the critical period (CP) in corn crop, identifying the air masses that occur in that period, their frequency and persistence in years of severe water deficit (SWD), and their circulation patterns. Multiple linear regression and cluster analysis techniques were used. The weather information belongs to Zavalla station (33°01'S, 60°53'W) and the corn yield data to the Department of Rosario.

Two corn CP were determined according to its impact on yield; one that takes place between the 2nd decade of December and the 1st of January (flowering and start of grain filling), and the other, in the 2nd decade of November (vegetative stage). When SWD occur, yields could decrease to 56%. The most frequent and persistent air masses are characterised by high temperature conditions and low relative humidity. This combination causes a reduction in photosynthesis and, in consequence, in yield. The predominant conditions of the circulation patterns reveal a strong subsidence in the centre-north of the country and an advection of warm air from the north and northwest.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

I. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO SOBRE EL TEMA

El maíz, *Zea mays L.*, es uno de los granos alimenticios más antiguos que se conocen y debido a sus grandes bondades y multitud de usos se ha convertido en el cultivo más importante entre los cereales a nivel mundial por su producción (795.935.000 de toneladas, en la temporada 2009-2010, superando al trigo y al arroz), de las cuales el 90% corresponden a maíz amarillo y el 10% restante a maíz blanco. Ocupa el segundo lugar en área de siembra, con alrededor de 140.000.000 ha, se siembra en 135 países y se comercializan en el mercado internacional más de 90 millones de toneladas.

La diversidad de los ambientes bajo los cuales se siembra es mucho mayor que la de cualquier otro cultivo. Aunque se originó y evolucionó en la zona tropical y subtropical, como una planta de excelentes rendimientos, hoy en día se cultiva desde los 58° de latitud norte, en Canadá y Rusia hasta los 40° de latitud sur, en Argentina y Chile (FENALCE, 2010).

La planta de maíz se utiliza en su totalidad, en múltiples y variados usos. Es el único cereal que puede ser utilizado como alimento en distintas etapas del desarrollo de la planta. A futuro, la necesidad mundial de maíz estará impulsada por el crecimiento de la industria de biocombustibles en Estados Unidos y una mayor demanda del grano por parte de economías emergentes, particularmente de India y China.

En consecuencia, se estima que el comercio mundial tendrá un crecimiento anual aproximado de 1,8% durante los próximos 3 años, llegando a cerca de 96 millones de toneladas de maíz para el año 2017. Los principales exportadores del grano serán Estados Unidos, Argentina y Brasil (FENALCE, 2010).

En Argentina el cultivo de maíz (*Zea mays L.*) se ubica en el tercer puesto según su producción, luego de los cultivos de soja y caña de azúcar (FAO, 2010). Durante las tres últimas décadas la superficie sembrada se redujo un 40% y la productividad aumentó un 170%, alcanzando en la

campana 2008/09 3,49 millones.ha⁻¹ sembradas y un rendimiento promedio de 5.596 kg.ha⁻¹ (Bojanich *et al.*, 2010).

En el departamento Rosario, provincia de Santa Fe, durante el período 1974/2007 se destinaron en promedio 9000 ha al cultivo de maíz variando entre 1500 ha en la campana 1990/91 y 38.300 en el año 1975/1976. Los rendimientos, también fueron variables, 1449 kg.ha⁻¹ en la campana 1975/1976 y 9200 kg.ha⁻¹ en la campana 2006/2007, con un promedio del período en estudio de 4906 kg.ha⁻¹ (Dickie *et al.*, 2012).

En la región pampeana se ha intensificado el uso agrícola de los suelos, pasando de esquemas mixtos con 4-5 años de pasturas perennes seguido de 4-8 años de cultivos anuales a secuencias continuas de cereales y oleaginosas anuales (De Battista *et al.*, 1992). El abandono de la rotación de cultivos como modelo productivo ha generado consecuencias negativas sobre el incremento de la erosión de los suelos, el balance de materia orgánica, la fertilidad y la eficiencia hídrica (Casas, 2016). En los sistemas agrícolas del sur santafesino que implementan esquemas de rotaciones de cultivos, el maíz es la gramínea estival más importante (Capurro *et al.*, 2013a). Este cultivo adquiere gran importancia por su capacidad de producción de rastrojos de calidad, proveedor de materia orgánica y cobertura (Capurro *et al.*, 2013b). La inclusión de maíz contribuye a mejorar la estabilidad del sistema de producción y a mantener la calidad de los recursos y el potencial productivo de nuestros suelos (Forjan, 2012).

La planta de maíz es una especie C4, muy eficiente en la producción de biomasa, dado que en condiciones de cultivo puede alcanzar en 4-5 meses un peso seco 1.000 veces superior al de la semilla que le dió origen, superando ampliamente en la capacidad de producir biomasa al girasol y la soja (Andrade, 1995).

Las condiciones ambientales de temperatura, radiación y agua son factores determinantes en el crecimiento, desarrollo y en la producción final del cultivo. Esta relación entre el tiempo, el clima y la agricultura es estudiada por la Agrometeorología, que desarrolla una función de nexo entre las ciencias meteorológicas y agrícolas, y tiene como propósito final la aplicación del conocimiento, datos y experiencias meteorológicas a problemas agrícolas sensibles al tiempo y al clima para ayudar a resolverlos de una manera práctica (Garabatos, 1991). La atmósfera y el suelo constituyen el medio físico de estudio de la Agrometeorología, ya que éstos, incluida el agua, comúnmente constituyen las verdaderas fuerzas que rigen el medio ambiente, son

elementos de naturaleza compleja y dinámica, variables en el tiempo y el espacio, que permanentemente interaccionan entre sí y con las plantas (Garabatos, 1991).

Los ambientes con alta radiación, altas temperaturas diurnas y bajas temperaturas nocturnas son favorables para un alto crecimiento y una adecuada duración de las etapas de desarrollo (Pedrol *et al.*, 2004).

El agua disponible es generalmente el principal factor que limita el crecimiento y rendimiento del cultivo de maíz en condiciones extensivas. Además, el grado de sensibilidad al estrés hídrico en este cultivo, depende del momento en que ocurra (Andrade *et al.*, 1996). Es muy sensible a situaciones de estrés hídrico durante la floración, dado que su principal órgano de interés comercial, la espiga, se encuentra relegada por la dominancia apical ejercida por la panoja. Esta característica, junto con su hábito de crecimiento determinado, le confiere al maíz inestabilidad en el rendimiento frente a situaciones de estrés en floración (Andrade *et al.*, 1996), lo cual determina que su período crítico es de 30 días centrados en floración (Carcova *et al.*, 2003), donde se define el número de granos y se caracteriza por su alta sensibilidad al déficit hídrico (Echarte *et al.*, 1998).

Por otro lado Dardanelli *et al.* (2003) manifiestan que el estrés hídrico en etapas vegetativas afecta la expansión foliar reduciendo el índice de área foliar y la radiación incidente interceptada.

Carvallo *et al.* (2004), refieren que las fases más sensibles del cultivo de maíz al déficit hídrico, en orden decreciente son: floración, llenado de grano y desarrollo vegetativo. Dickie *et al.* (2012) determinaron, para el Departamento Rosario, que la influencia de la deficiencia hídrica en el cultivo de maíz, se evidenció en mayor grado en etapa de floración, disminuyendo su efecto en las etapas de desarrollo vegetativo y llenado de grano.

La magnitud de las pérdidas depende de la oportunidad, intensidad y duración del estrés y se manifiesta a través de la disminución de la cantidad de espigas por planta y de menor número de granos en la espiga (Westgate y Boyer, 1986).

La fecha de siembra puede modificar la condición hídrica a la cual está expuesto el cultivo en diferentes subperíodos de la estación de crecimiento (Della Maggiora *et al.*, 2012). Por tal motivo, la elección de la fecha de siembra es una de las prácticas más asociada a las

variaciones de rendimiento. Normalmente para la zona núcleo, la fecha de siembra abarca desde mediados de septiembre a principios de octubre, con lo cual el periodo crítico relacionado con deficiencia hídrica transcurre en diciembre. En las últimas campañas, la fecha de siembra comenzó a desplazarse hacia principios y mediados de diciembre y con ello se traslada el periodo crítico a febrero. Debido a esto, el cultivo se enfrenta a condiciones climáticas que difieren con las esperadas para una fecha de siembra normal con consecuencias en el rendimiento (Steccone *et al.*, 2013).

Los niveles de radiación solar, los registros térmicos y la longitud del día varían marcadamente a lo largo del año. Entonces, la modificación de la fecha de siembra del cultivo altera la combinación de dichas variables ambientales a lo largo de toda su estación de crecimiento (Cirilo, 2004).

El conocimiento de la disponibilidad de agua en el suelo ha sido motivo de estudio desde los comienzos de la Agrometeorología. Una alternativa, es estimar la humedad en la zona radical mediante un Balance Hidrológico o Balance Hídrico (BH). El BH es un modelo simplificado de estimación de la reserva de agua en la zona de exploración radicular o sea en la zona insaturada del suelo. A partir del mismo es posible cuantificar la disponibilidad de humedad durante el ciclo de un cultivo y el agua consumida por la planta. Con los resultados generados se pueden calcular índices agroclimáticos que nos indiquen la disponibilidad regional de agua en el suelo en forma espacial y temporal según los valores utilizados en el cómputo (Fernández Long *et al.*, 2012).

Considerando las utilidades expuestas se han desarrollado numerosos modelos tanto en el exterior (Thornthwaite y Mather, 1955; Holmes y Robertson, 1959; Baier y Robertson, 1969; Smith, 1992; Freebairn *et al.*, 1994; Allen *et al.*, 1998; Saxton y Willey, 2006; Senay, 2008; Raes *et al.*, 2009, citados por Fernández Long *et al.*, 2012) como en nuestro país (Burgos y Corsi, 1970; Damario y Pascale, 1977; Forte Lay *et al.*, 1995; Paruelo y Sala, 1995, citados por Fernández Long *et al.*, 2012) con distintos grados de complejidad y para diferentes escalas espacio-temporales.

El BH de un ecosistema terrestre está definido por el volumen de lluvias que ingresan al sistema, por las proporciones que se infiltran y distribuyen en el perfil del suelo, y por las pérdidas debido al drenaje, evaporación y transpiración (Ferrante, 2011).

El BH climático (BHC) (Thornthwaite y Mather, 1957) y el BH seriado (BHS) según Damario y Pascale (1977) dan una aproximación de las disponibilidades de agua en un lugar o región. El balance hídrico es una metodología que cuantifica las entradas y salidas del sistema suelo-cultivo-ambiente, tomando como datos la precipitación (PP) y la evapotranspiración de referencia (ET_o) locales, teniendo en cuenta además la capacidad de almacenaje del suelo. Como resultado se obtienen la época y la magnitud de deficiencias (DH) y excesos (EXC) hídricos, como así también la evapotranspiración real y el almacenaje del suelo. En el BHC la información de entrada son las PP medias mensuales y las EP medias mensuales de la serie histórica de datos disponibles, obteniéndose un único balance, representativo del estado medio del lugar. En el caso del BHS se calculan con todos los años de datos balances para cada año, por lo que se obtienen tantos balances meteorológicos como años de información se dispongan. Esto posibilita tener diferentes situaciones de deficiencias y excesos, permitiendo establecer frecuencias y probabilidades de ocurrencia (Coronel *et al.*, 2012). Thornthwaite (1948) creó el término “evapotranspiración” que representa la pérdida conjunta del agua evaporada desde el suelo y transpirada por la vegetación. A partir de este nuevo concepto los estudios sobre utilización del agua del suelo por los cultivos se enfocan, por un lado, teniendo en cuenta solamente la influencia de los factores atmosféricos y, por el otro, los que consideran al movimiento del agua en el suelo.

El consumo de agua o la evapotranspiración del cultivo (ETR), es altamente dependiente de factores ambientales como la presión de vapor de agua, temperatura, velocidad del viento y la radiación. También depende de factores propios del cultivo tales como el estado hídrico y la cobertura foliar lograda por el mismo (que es función del área foliar). Las propiedades físicas del suelo y su contenido de agua, afectan la evaporación desde el mismo e indirectamente regulan la transpiración de las plantas a través de su influencia en el estado hídrico del cultivo (Rhoads y Bennett, 1990).

En las regiones con fuertes contrastes estacionales en el clima (es decir, en las latitudes medias), la fenología de las plantas es impulsada por los cambios diarios en la hidrósfera y la atmósfera. Las condiciones atmosféricas en estas regiones regulan las respuestas fenológicas de las plantas que en última instancia determinan el resultado final (rendimiento y calidad) de la mayoría de los cultivos. En estas latitudes, los grandes cambios estacionales y diarios en el tiempo están relacionados con cambios en la secuencia de masas de aire procedentes de las regiones polares y subtropicales. Teniendo en cuenta el acoplamiento de las masas de aire y la

circulación, un estudio de las frecuencias diarias de masas de aire y los distintos patrones de circulación que controlan sus movimientos podrían resultar útiles en la comprensión de las variaciones anuales en la fenología y en el rendimiento y calidad final de los cultivos (Jones y Davis, 1999).

La Climatología Sinóptica estudia las interacciones existentes entre la circulación atmosférica y las condiciones presentes en superficie, por ello tiene un alto potencial para ser utilizada en investigaciones referentes a fenómenos meteorológicos asociados a una región (Gutierrez *et al.*, 2005).

Hoffmann (1971), menciona que la Climatología Sinóptica estudia estadísticamente la frecuencia de los diferentes sistemas dinámicos de la circulación atmosférica que afectan en perpetua secuencia una región determinada, las masas de aire involucradas, los tipos de tiempo resultantes, las variaciones aperiódicas de los elementos meteorológicos asociados y las precipitaciones producidas.

Barry y Perry (1973) muestran que el objetivo principal de la Climatología Sinóptica es combinar elementos meteorológicos, de una serie climatológica, en grupos homogéneos o clases que representan la situación sinóptica en un determinado momento. Las categorías resultantes son analizadas considerando sus características meteorológicas, sus movimientos espaciales y temporales y su frecuencia, y su relación con parámetros externos.

Las investigaciones en esta rama de la Climatología pueden dividirse, en general, en dos clases: los métodos basados en las situaciones sinópticas y los métodos basados en las masas de aire. Los primeros se definen a través de los campos de presión y viento en superficie y/o de los campos de altura, y representan distintas situaciones de la circulación atmosférica (Coronel, 2001).

Los tipos de circulación atmosférica pueden definirse como las configuraciones que adopta un campo meteorológico (presión a nivel del mar, altura geopotencial) sobre un ámbito espacial concreto (Rasilla Álvarez, 2003)

La Climatología Sinóptica se debe llevar a cabo en dos etapas: (1) la clasificación de la circulación atmosférica; y (2) estimación de la relación entre esas categorías y los elementos meteorológicos de la región. La segunda fase ha sufrido una considerable ampliación debido a

que es posible relacionar variables no meteorológicas con patrones de circulación, un ejemplo de ello son los estudios realizados sobre calidad de agua, cultivos, ozono troposférico, etc. (Barry y Perry, 1973).

El concepto de masa de aire fue introducido por Bergeron (1930, citado por Petterssen, 1956), el cual define a una masa de aire como una extensión de aire aproximadamente homogénea en la horizontal, principalmente en la temperatura y la humedad, a su vez define masa de aire polar, tropical, continental y marítima de acuerdo a sus regiones de origen. Unas décadas más tarde, Crowe (1971) define a una masa de aire como un gran volumen de aire que adquiere, “...características de temperatura y humedad de las condiciones higrotérmicas del océano, tierra o hielo por donde ella transita”. Schwartz y Skeeter (1994) adoptó una definición similar a la de Crowe, basándose en límites numéricos con situaciones de transición, para determinar las distintas masas de aire. El objetivo principal del autor es la identificación de los umbrales del aire que atraviesa una región y de las distintas características de tiempo asociadas. La respuesta del ambiente a la masa de aire no depende sólo de la zona de origen de la misma, sino de las características meteorológicas del aire presente en la región de análisis.

Los métodos de clasificación y caracterización de masas de aire se basan en las similitudes de las características higrotérmicas del aire, siendo concebible que los campos de presión y viento puedan variar a lo largo del tiempo dentro de la masa de aire. Los siguientes son algunos trabajos que muestran las diferentes metodologías para analizar este tema: Christensen y Bryson (1966) y Kalkstein y Corrigan (1986) realizan una clasificación diaria de las masas de aire a partir de datos y fenómenos de superficie en diferentes ciudades de Estados Unidos (escala puntual); Bryson (1966) y Schwartz y Skeeter (1994) identifican las masas de aire que afectan la región central norte de Estados Unidos a partir de datos de superficie y obtuvieron las distribuciones de frecuencias de las mismas (escala regional); Kalkstein *et al.* (1996) encontraron un método a partir de técnicas de análisis multivariado para clasificar las masas de aire en todo el continente necesitando previamente identificar las principales masas y sus características meteorológicas típicas en cada lugar analizado; y Coronel (2001) identifica las masas de aire de la República Argentina a partir del análisis de la temperatura potencial adiabática equivalente, o sea a partir de las características termodinámicas de las mismas.

La homogeneidad termodinámica de las masas de aire permite asociarlas a estudios de problemas bioambientales, como ser la relación entre la salud humana y los diferentes tipos de

masas de aire (Greene y Kalkstein 1996; Kalkstein y Greene 1997; Jamason *et al.*, 1997; McGregor *et al.*, 1999; Tan *et al.*, 2004, Sheridan *et al.*, 2012a y 2012b), la variación en la cantidad de ozono en la atmósfera (Adame y Solé 2008), los cambios en la magnitud del CO₂ (Aalto *et al.*, 2003), entre otros temas. También se ha analizado la variación en la frecuencia de las masas de aire a largo plazo con el fin de establecer relaciones con el cambio climático (Kalkstein *et al.*, 1990, 1998; Fealy y Sweeney 2007, Perera *et al.*, 2012).

En nuestro país, Bejarán y Camilloni (2003) clasificaron a través de la aplicación de un método objetivo las masas de aire en relación con la intensidad de la isla urbana de calor en Buenos Aires, en invierno. Coronel y Castañeda (2010) identificaron las masas de aire que afectan el sur de Santa Fe durante los eneros de 1998-2006 y las relacionaron con la precipitación diaria.

El área de estudio, Pampa Húmeda, constituye la región agropecuaria más competitiva de Argentina y según Bartolomé *et al.* (2004) los principales factores de riesgo productivo son en orden de prioridad: la incertidumbre e inestabilidad económica y política, los mercados internacionales y política internacional, el clima, plagas y enfermedades, y otros. En cuanto a los principales riesgos climáticos se destacan: granizo, inundación y sequía. Estos riesgos climáticos son consecuencia de las modificaciones en los patrones de circulación y en las masas de aire que afectan la región.

Este trabajo de investigación se encuadra dentro de la Agrometeorología y de la Climatología Sinóptica, si bien cabe aclarar que en esta tesis en primer lugar se clasifican las masas de aire durante los períodos críticos del cultivo de maíz (previamente determinados), luego se analizan los elementos meteorológicos asociados a situaciones de deficiencia hídrica extremas a través de las características de las masas de aire específicas involucradas, y por último la circulación atmosférica correspondiente. Esto muestra una diferencia en el orden de lo planteado por Barry y Perry (1973), y está más acorde con la metodología expuesta por Kalkstein y Nichols (1996).

II. HIPÓTESIS:

Primera hipótesis:

“El período crítico del cultivo de maíz debido a deficiencias hídricas, se ubica desde la tercera década de noviembre hasta la segunda década de enero”.

Segunda hipótesis: *“La ocurrencia y persistencia de masas de aire con temperaturas mayores a lo normal, humedad relativa con valores menores a la media y alta insolación durante los periodos críticos del maíz provocan deficiencias hídricas severas que reducen significativamente los rendimientos del cultivo. La circulación atmosférica asociada a estas masas de aire presenta una inhibición de la entrada de aire húmedo proveniente del noreste del país y/o del factor dinámico de la precipitación”.*

III. OBJETIVOS GENERALES:

- ✓ Determinar objetivamente el periodo crítico del cultivo de maíz y las masas de aire que afectan al Departamento Rosario en dicho periodo.

III.1. Objetivos específicos:

- ✓ Determinar objetivamente el periodo crítico del cultivo de maíz
- ✓ Identificar las masas de aire diarias que ocurren en el periodo crítico del cultivo.
- ✓ Establecer la frecuencia y persistencia de masas de aire en años con deficiencia hídrica, y sus patrones medios de circulación asociados.

CAPÍTULO II

RELACIÓN ESTADÍSTICA ENTRE LOS RENDIMIENTOS DE MAÍZ Y LA OCURRENCIA DE DEFICIENCIAS HÍDRICAS

I. INTRODUCCIÓN

En Argentina, la región maicera templada se extiende entre los paralelos de 31° y 40° de latitud sur y entre los meridianos 57° y 65° de longitud oeste de la Pampa Húmeda y Subhúmeda argentina. En esta área, los factores climáticos (lluvias, temperaturas, evaporación, etc.), a través de su acción individual o conjunta, introducen el «azar» en los sistemas productivos, detectándose en consecuencia grandes amplitudes en los rendimientos anuales promedio de maíz en la región, hecho que repercute fuertemente en el volumen total del país (Totis de Zeljkovich, 2012).

El rendimiento del cultivo de maíz es la resultante de dos procesos simultáneos e interdependientes: el crecimiento y el desarrollo. Mientras que el primero se refiere al aumento del número y tamaño de las células, el desarrollo es la sucesión progresiva de etapas que llevan a establecer la morfología del organismo adulto (Andrade *et al.*, 1996). La fenología establece las distintas fases del desarrollo por las que atraviesa un cultivo, teniendo en cuenta los cambios morfológicos y fisiológicos que se producen a medida que transcurre el tiempo (Andrade *et al.*, 1996).

La escala fenológica más utilizada para describir el ciclo del cultivo de maíz es la de Ritchie y Hanway (1982). En ella se pueden distinguir dos grandes períodos: el vegetativo y el reproductivo. El primero se subdivide en estadíos identificados con la letra V y un subíndice, que señala el número de orden de la última hoja completamente expandida (lígula visible) al momento de la observación. Una vez producida la aparición de todas las hojas, el estado es definido por la aparición de la panoja (VT: panojamiento, floración masculina). El período reproductivo, subdividido en estadios identificados con la letra R y un subíndice, comienza con la emergencia de los estigmas, (floración femenina, R1), continúa con el cuaje o estado de ampolla (R2) y el llenado de los granos, grano lechoso (R3), grano pastoso (R4) y grano duro o indentado (R5) y finaliza con la madurez fisiológica (R6) (Cárcova *et al.*, 2003).

En la figura 1 se muestra el ciclo del cultivo de maíz siguiendo esta nomenclatura.

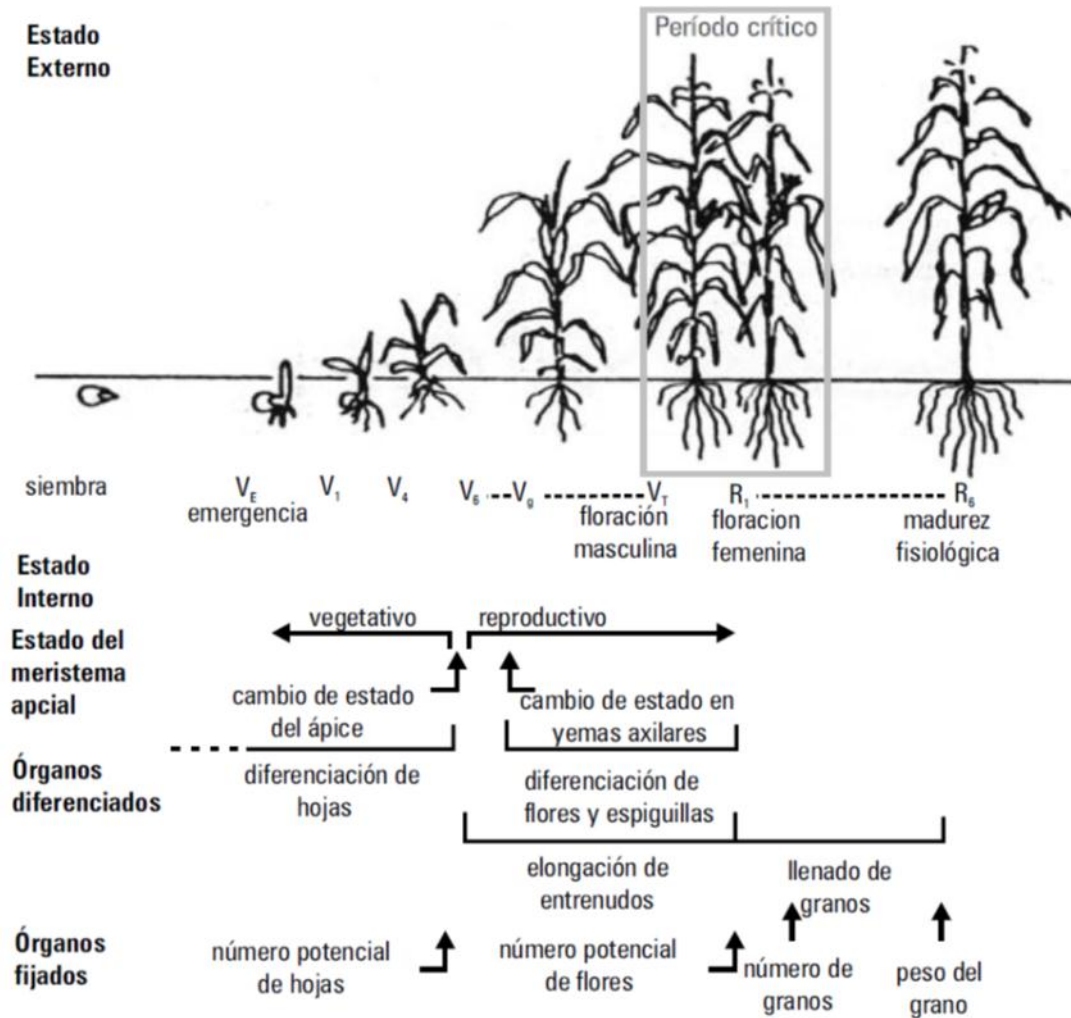


Figura 1: Ciclo ontogénico del cultivo de maíz (Adaptado de Cárcova *et al.*, 2003)

Este cultivo tiene gran sensibilidad a los cambios de las lluvias con el tiempo, debido a su escasa extensión radicular (extractora de agua) en la capa sub-superficial del suelo y una gran superficie foliar consumidora de agua (Sierra y Pórfido, 1980). Esto lo hace apto para estudiar su rendimiento en función solo del clima y por otra parte permite acotar el interés de este estudio a las llamadas sequías climáticas (Minetti *et al.*, 2007). Desde el punto de vista agronómico y económico, es muy importante el análisis del impacto que las deficiencias hídricas

(DH) severas (DHS) asociadas a sequías han tenido en un cultivo de gran difusión regional como el maíz.

El momento de ocurrencia de las DH afecta al cultivo de diferente manera. Echarte *et al.* (1998) mencionan en su trabajo que “se ha demostrado que la sensibilidad del cultivo de maíz a los déficit hídricos declina en el siguiente orden: floración > llenado de granos > estado vegetativo”.

DH en etapas vegetativas tempranas reducen el crecimiento, pero si el cultivo tiene la posibilidad de recuperar área foliar una vez finalizado el estrés, y llega al período crítico (PC) de la floración con una buena cobertura del suelo, las disminuciones en el rendimiento serán leves o nulas (Abrecht y Carberry, 1993; Andrade *et al.*, 1996). Si la cobertura no se recupera luego del estrés, el crecimiento del cultivo en el PC se verá afectado y el rendimiento en grano se reducirá (Cirilo *et al.*, 2012).

En el período de cuatro semanas centrado en la floración femenina el cultivo de maíz es particularmente sensible a cualquier estrés de crecimiento en cuanto al número final de granos logrados (Hall *et al.*, 1981; Fischer y Palmer, 1984; Kiniry y Ritchie, 1985). Durante dicho período ocurre el crecimiento activo de la espiga, la aparición de los estigmas (barbas) y el comienzo del llenado del grano (Otegui y Bonhomme, 1998). Durante la primera mitad del PC previa a la aparición de los estigmas queda determinado el número de espigas por planta capaces de granar, mientras que en la segunda mitad se determina el número de granos fijados por espiga granada. El número de granos cosechados en el cultivo responde a las variaciones en la tasa de crecimiento que experimentó el cultivo durante el PC.

Existe una relación estrecha entre el consumo de agua del maíz y la producción de grano (Puech y Hernández, 1973). Por ello, el rendimiento potencial será alcanzado cuando el agua consumida por el cultivo, sea próxima a aquella posible de consumir, según las características de la especie (densidad, altura, repartición de la superficie foliar y fisiología de la regulación estomática) y a la energía disponible, cuando las condiciones hídricas y nutricionales no son limitantes (Perrier, 1977).

HIPÓTESIS DEL CAPITULO

“El período crítico del cultivo de maíz debido a deficiencias hídricas, se ubica desde la tercera década de noviembre hasta la segunda década de enero”.

OBJETIVO GENERAL

- ✓ Determinar objetivamente el período crítico del cultivo de maíz

II. MATERIALES Y MÉTODOS

II.1. Caracterización de la región de estudio

El Departamento Rosario se ubica en el sudeste de la provincia de Santa Fe, dentro de la región de la Pampa Húmeda Argentina. Posee una superficie de 1890 km².

Las estaciones meteorológicas oficiales que se ubican en este Departamento son: Rosario Aero (32°55'S, 60°47'O), perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y Zavalla (33°01'S, 60°53'O) perteneciente a la red del SMN y del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). La estación Rosario Aero se ubica muy cerca de la ciudad de Rosario, mientras que Zavalla es una estación agrometeorológica ubicada en una zona esencialmente agrícola. Por lo tanto se toma a esta última localidad como representativa de las condiciones climáticas del Departamento Rosario.

El clima de la región se caracteriza por temperaturas típicas de un clima templado, con veranos cálidos e inviernos suaves, con temperaturas medias entre 10°C en julio y 23.6°C en enero, siendo la media anual de 17°C. El período libre de heladas, de 278 días, abarca desde principios de septiembre hasta mediados de junio (Mancini *et al.*, 2006). Presenta precipitaciones anuales que varían entre 678 mm y 1338 mm, con un régimen pluviométrico semi-monzónico cuya secuencia de mayor a menor lluvia es verano-primavera-otoño-invierno. Se observa además una gran variabilidad interanual en todas las estaciones del año, principalmente en invierno (Sacchi *et al.*, 2002).

En cuanto a los suelos se pueden encontrar dos órdenes los Molisoles y Alfisoles. Dentro de los Molisoles se encuentran los Argiudoles típicos y vérticos, estos suelos predominan en gran parte de la Pampa Ondulada, (S de la provincia de Santa Fe), con un paisaje de loma suavemente ondulada, con una pendiente que no supera el 0,5% de gradiente, lo que determina un escurrimiento lento a medio y una permeabilidad moderadamente lenta a moderada. Es un suelo muy profundo desarrollado a partir de sedimentos loésicos franco limosos, bien drenado y de alto grado de evolución. Presentan un horizonte argílico y perfil completo (A-B-C).

Los Argiudoles típicos no manifiestan evidencias de hidromorfismo y poseen la siguiente secuencia de horizontes: A1, B1 (o A3), B2, B3, C y los Argiudoles vérticos, presentan características semejantes a los típicos, misma secuencia de horizontes, pero con un mayor contenido de arcilla en el A y en el B.

En cuanto a los Alfisoles, el gran grupo de los Natracualfes están asociados a posiciones deprimidas del relieve; presentan un horizonte nátrico. El perfil más representativo tiene la secuencia A2, B2, B3, C (Cátedra de Edafología, 2015).

II.2. Información de rendimientos:

- Los rendimientos (R), áreas sembradas y superficies cosechadas del cultivo de maíz para las campañas 1974/1975 a 2013/2014 se obtuvieron de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos de la Nación (SAGPYA, 2015). La información corresponde al Departamento Rosario.

II.3. Información meteorológica:

La información meteorológica utilizada corresponde a:

- Series diarias de temperatura media (Tmed, °C), máxima (Tmáx, °C) y mínima (Tmin, °C), humedad relativa media (HRm, %), heliofanía efectiva (Hef, horas), velocidad de viento (m/s) y precipitación (PP, mm) correspondiente a los doce meses del año para el período 1974-2014.

II.4. Determinación objetiva del período crítico de maíz

El período analizado de R de maíz (1974/1975 - 2013/2014) corresponde a 40 años de información del Dpto. Rosario donde no se discrimina: los R por cada localidad del departamento, la fecha de siembra de cada campaña agrícola, ni la duración de cada etapa fenológica del cultivo, por ende para cada campaña no se puede establecer explícitamente el comienzo y fin del PC de maíz relacionado a DH.

Para definir el PC se utilizó una metodología objetiva que analiza la relación estadística entre los R y las series de DH obtenidas a partir de un BHS decádico (diez días).

II.4.a. Análisis de los rendimientos de maíz

Los R del cultivo de maíz presentan un aumento en el transcurso del tiempo, y es de esperar, que esta tendencia creciente sea debida a la mejora de las prácticas agrícolas y al mejoramiento genético. Según Rossi (2007) el significativo aumento de los rendimientos unitarios no puede explicarse sólo por el mejoramiento genético, sino que las tecnologías de manejo han jugado un papel decisivo y estrechamente interrelacionado con el mismo (Figura 2). Por lo cual muchos trabajos, filtran las tendencias de la productividad previamente, y postulan que los cambios de larga escala son únicamente debidos a la tecnología y genética (Hurtado *et al.*, 2003, Fernández Long *et al.*, 2011; Dickie *et al.*, 2012).

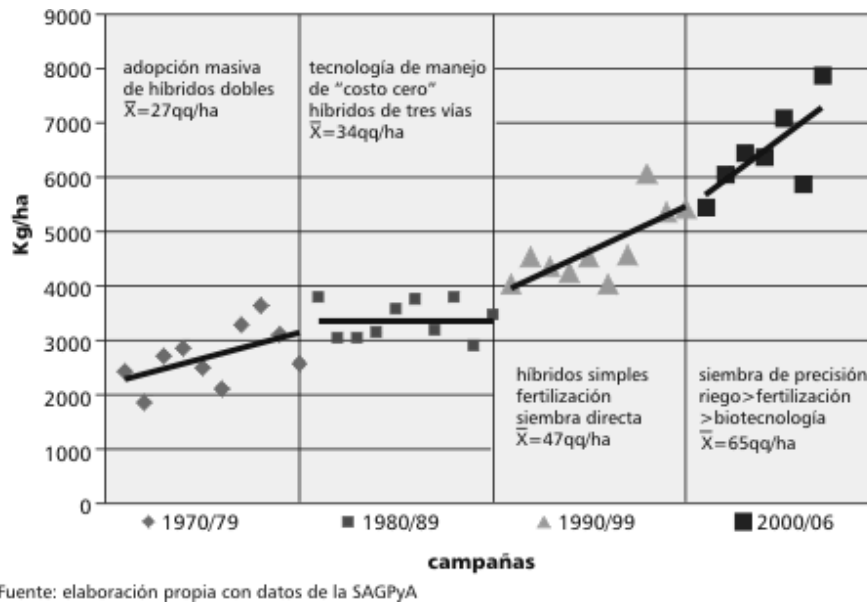


Figura 2: Evolución del rendimiento de maíz en la Argentina durante los últimos 37 años. Extraído de Rossi (2007).

Por otro lado Minetti *et al.* (2007) plantean que las mejores prácticas agrícolas combinadas con precipitación y riego influyen positivamente en los rindes. La interacción entre estos componentes, hace que los resultados observados como tendencias no se encuentren disociados a la tendencia positiva de las precipitaciones registradas durante la segunda mitad del siglo pasado en la Pampa Húmeda. De estos conceptos surgiría, según estos autores, que un procedimiento adecuado para la estimación del impacto de variables climatológicas en la productividad, sería el analizar la asociación sin filtrar la tendencia en el rendimiento.

Para establecer cuál procedimiento abordar en la tesis, si filtrar o no la tendencia en los rendimientos de maíz, se tuvo en cuenta los resultados encontrados por Coronel *et al.* (2011): para la región bajo estudio se destaca la poca variación de la precipitación, comportamiento distinto a otros sitios de la región pampeana donde es significativo el aumento de esta variable. La disminución de lluvias solo es significativa en invierno, lo cual no presenta demasiada incidencia en la producción agrícola ya que en este período del año ocurren menor cantidad de precipitaciones.

Por este motivo, se filtró la componente tendencia de la serie original a través de la función que ajusta mejor a la serie de datos (Raj), generándose la serie de rendimiento sin tendencia (Rst). De este modo sólo se analizó el efecto climático sobre el R.

Es esperable que Rst presente oscilaciones alrededor del valor cero. Para determinar si estas variaciones presentaban una periodicidad se determinaron las autocorrelaciones de la serie Rst para diferentes lags. La función de autocorrelación puede proporcionar información sobre los ciclos en el modelo hipotético que genera los datos.

El porcentaje de aumento o disminución de los R respecto de los rendimientos esperados (Raj) se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ variación} = 100 - (R/Raj) * 100$$

II.4.b. Cálculo de la Evapotranspiración de referencia

La evapotranspiración es la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo.

Se define como evapotranspiración potencial (EP) a la cantidad de agua evapotranspirada en un área cubierta completamente de vegetación sin DH (Thornthwaite, 1948). Surgen críticas al concepto desarrollado por Thornthwaite, en función de ello surge otro concepto “evapotranspiración de referencia” (ETo), siendo una estimación de la evapotranspiración de un cultivo de referencia a partir de datos de HRm, radiación, Tmax y Tmin para un período dado. Según Penman-Monteith y con la modificación introducida por FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) la ETo es la evapotranspiración de un cultivo de gramíneas hipotético con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia superficial de 70 s.m⁻¹ y un albedo de 0,23 y que representa a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado (Allen *et al.*, 1998).

La ETo diaria se calculó a través de la ecuación de Penman-Monteith recomendada por FAO (Allen *et al.*, 1998).

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

Dónde:

ET_o: evapotranspiración potencial (mm /día)

R_n = energía de radiación neta (MJ/m² .día)

G= flujo de calor latente desde el suelo (MJ/m²)

T = temperatura promedio (°C)

γ = constante psicométrica.

e_s – e_a = déficit de presión de vapor

e_s = presión de vapor a saturación a la temperatura promedio del aire (kPa)

e_a = presión de vapor actual (kPa)

u₂= velocidad del viento a 2 m de altura (m/s).

Δ = pendiente de la curva de presión de la saturación de vapor a una temperatura específica (kPa/°C)

II.4.c. Cálculo del Balance hidrológico seriado decádico

El BH es una metodología que cuantifica las entradas y salidas del sistema suelo-cultivo-ambiente, tomando como datos las PP y las ETo locales, teniendo en cuenta además la capacidad de almacenaje del suelo. Como resultado se obtienen la época y la magnitud de deficiencias (DH) y excesos (EXC) hídricos, como así también la evapotranspiración real y el almacenaje del suelo. En el BHC la información de entrada son las PP medias mensuales y las ETo medias mensuales de la serie histórica de datos disponibles, obteniéndose un único balance, representativo del estado medio del lugar. En el caso del BHS se calculan con todos los años de datos balances para cada año, por lo que se obtienen tantos balances meteorológicos como años de información se dispongan. Esto posibilita tener diferentes situaciones de DH y EXC, permitiendo establecer frecuencias y probabilidades de ocurrencia

Se utilizó el BHS basado en la metodología de Thornthwaite y Mather (1955) y en escala decádica (BHSd) (cada diez días), a fin de definir con mayor exactitud las DH y el PC. Damario y Pascale (1977) señalan que el BHC es insuficiente cuando se requiere conocer las

probabilidades de ocurrencias de DH y EXC de una determinada región, sugiriendo como solución el uso del BHS.

Para realizarlo es necesario disponer de los valores de PP y ETo diarios, a fin de calcular los valores acumulados correspondientes a las décadas de los meses de noviembre a enero de cada año. Dado que los resultados del BHSd corresponden a cada una de las décadas de la serie total es posible realizar un análisis estadístico de las mismos determinando la probabilidad de ocurrencia de distintas disponibilidades de agua en el suelo (Murphy y Hurtado, 2011).

Los valores de capacidad de campo (CC) y de punto de marchitez (PM) se tomaron de Fernández Long *et al.* (2012) y de Busso y Ausilio (1989). Se utilizaron los valores de 250 mm y 135 mm, respectivamente.

El valor de almacenaje de la década t, se obtiene sumando el almacenaje de la década t-1 y el valor de la diferencia PP-ETo si esta diferencia es positiva. Si esta diferencia es negativa, el valor de almacenaje de la década t (Alm_t) se obtiene a partir de la siguiente fórmula (Murphy y Hurtado, 2011):

$$Alm_t = Alm_{t-1} * e^{(PP-ETo/CC)}$$

Dónde:

Alm: Almacenaje del suelo (mm)

PP: Precipitaciones (mm)

ETo: Evapotranspiración de referencia (mm)

CC: Capacidad de campo (mm)

De acuerdo a Fernández Long (2012) y Murphy y Hurtado (2011) se determinaron los siguientes pasos del BHSd.

Cuando el ALM supera la CC se considera que el agua restante no puede permanecer en el suelo, por lo tanto escurre. A esa cantidad de agua se la llama exceso, y se la calcula como:

$$EXC = ALM_{t-1} + DP - CC$$

Luego se calcula el ΔAlm como:

$$\Delta\text{ALM} = \text{ALM}_t - \text{ALM}_{t-1}$$

Cuando ΔAlm es negativo indica que el suelo se está secando, y esa cantidad de agua se pierde a través de la evapotranspiración real (ER), por lo tanto:

$$\text{ER} = \text{IALMI} + \text{PP}$$

En cambio, cuando el ΔAlm es positivo indica que el suelo se está recargando. En estos casos la ER va a ser igual a la EP debido a que el suelo tiene suficiente agua para evapotranspirar lo que la atmósfera demanda y, lo que resta se almacena en el suelo, entonces:

$$\text{ER} = \text{ET}_0$$

Cuando la ER es menor que la ET_0 se considera que las plantas comienzan a sufrir un estrés hídrico, por lo tanto se calcula el déficit (DH) como:

$$\text{DH} = \text{ER} - \text{ET}_0$$

II.4.d. Determinación objetiva del PC de maíz

Se calculó el coeficiente de correlación de Spearman (ρ) entre la serie de Rst y las series de las DH decádicas (primera década de noviembre a última década de enero, 9 series), a fin de determinar las décadas que presentan asociación lineal significativa (probabilidad < 0,05%).

Para la selección de las DH decádicas significativas como variables regresoras del Rst se aplicó la técnica de regresión lineal múltiple con el método de stepwise, tomando como criterio de entrada y de retención el valor $t = 0,1$. Este procedimiento consiste en ir elaborando sucesivas ecuaciones de regresión en las que se va añadiendo en cada paso una variable regresora. El primer paso consiste en seleccionar el regresor de máxima correlación simple con el criterio, y se define, en consecuencia una ecuación de regresión simple con esa variable. A continuación se elabora una segunda ecuación de regresión añadiendo a la anterior otro regresor, esta vez el que más proporción de variabilidad explicada aporte sobre la ecuación anterior. Así hasta que no haya más regresores que aporten nada sustantivo, que es cuando el procedimiento acaba.

Hay que indicar, y aquí esta lo destacable de este procedimiento, que en este proceso de elaboración del modelo definitivo, hay una continua reevaluación de los predictores incluidos en el modelo, de forma que si algún regresor queda explicado por los restantes (en el sentido de que carece de contribución específica propia) queda eliminado (Balzarini *et al.*, 2008).

Una vez seleccionadas las variables regresoras se determinará el peso de cada una en el Rst a partir del cálculo de los coeficientes del modelo de regresión tomando a las variables estandarizadas. De esta forma, se obtiene el peso relativo de cada variable dentro de la especificación, sin importar la unidad de medida en que se encuentren expresadas. La estandarización consiste en restar a cada valor su promedio y dividirlo por su desviación estándar.

Además se determinaron los parámetros estadísticos básicos de cada variable regresora seleccionada: promedio, desviación estándar, máximo, mínimo, primer y segundo tercil (33% y 66%). Debido a que los valores de DH son negativos se definieron las DH severas, moderadas y leves a partir del siguiente criterio:

DH severa: cuando la DH es menor o igual al primer tercil

DH moderada: cuando la DH es mayor al primer tercil y menor o igual al segundo tercil

DH leve: cuando la DH es mayor al segundo tercil

Se utilizará la función: Percentil.exc (matriz; k): devuelve un valor numérico; dado un rango de valores numéricos, calcula el percentil que se le indique a la función. El percentil es una medida de posición no central. Indica cuál es la posición de un valor, con respecto a los valores dados en la muestra. La función utiliza los argumentos matriz y “k” (Bermúdez, 2012). En esta tesis se trabajó con el argumento $k= 0,33$ y $0,66$.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

III.1. Variación de los rendimientos, área sembrada y área cosechada

El R promedio de las 40 campañas analizadas es de $5.501 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ variando entre $1.449 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en la campaña 1975/1976 y $10.000 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en 2009/2010 (Figura 3).

La tendencia de los R se ajusta a través de un polinomio de segundo grado (Raj), cuyo $R^2 = 0,67$. El aumento de Raj entre la primera y la última campaña considerada, es de un 189% (Figura 3).

Los Rst, Figura 4, muestran una variación durante el período de análisis que se considera producto de la variabilidad climática. Se evidencian oscilaciones de Rst, determinando 21 campañas en las cuales el R es superior al Raj y en 19 campañas ocurre lo contrario. El autocorrelograma de la Rst (Figura 5) muestra que para los distintos lags las autocorrelaciones son no significativas, por lo tanto no se encuentra una periodicidad en las oscilaciones de esta variable, teniendo en consecuencia una distribución al azar o aleatoria. Dado que las condiciones climáticas durante el ciclo de vida del cultivo de maíz pueden variar en forma aleatoria de un año al otro, es esperable que la variabilidad de los Rst sean explicados en forma significativa por las variables ambientales y en particular por las DH.

Los máximos valores de aumento y disminución del R respecto a los Raj alcanzan un porcentaje del 60% (Figura 6).

La superficie sembrada con este cereal en promedio es de 8.834 ha, encontrándose la superficie mínima en 1990/1991 (1.500 ha) y su máxima superficie con 38.300 ha en la campaña 1975/1976 (Figura 7). El maíz es el segundo cultivo más importante de la Argentina luego de la soja, pero debido a que el costo de producción del maíz es más elevado que el de la soja, desde 1997 se viene verificando un gran crecimiento del área sembrada con soja, alcanzándose una relación de casi 4 hectáreas de soja por una de maíz. Sin embargo, la imposibilidad de su reemplazo como materia prima en diversas industrias y la necesidad de una agricultura sustentable a través de su participación en la rotación de cultivos, se plantea un interesante desafío para intentar revertir esta tendencia. Asimismo, el aumento de los precios internacionales a partir de 2006, determinan significativamente que el área sembrada con maíz presente una tendencia creciente (Maizar, 2013).

En el 45% de las campañas evaluadas se puede observar un desfasaje entre la superficie sembrada y cosechada, es decir, la superficie cosechada fue menor a la sembrada. La campaña 1975/1976 presentó la mayor diferencia, 4.300 ha sin cosechar, seguida por la campaña 1982/1983 con 3.500 ha (Figura 7). Este desfasaje podría deberse en forma frecuente a la influencia directa de las condiciones climáticas de la campaña, por ejemplo debido a

situaciones de sequía, o a su influencia indirecta como puede ser aparición de plagas y enfermedades que están altamente condicionadas por la combinación de variables ambientales.

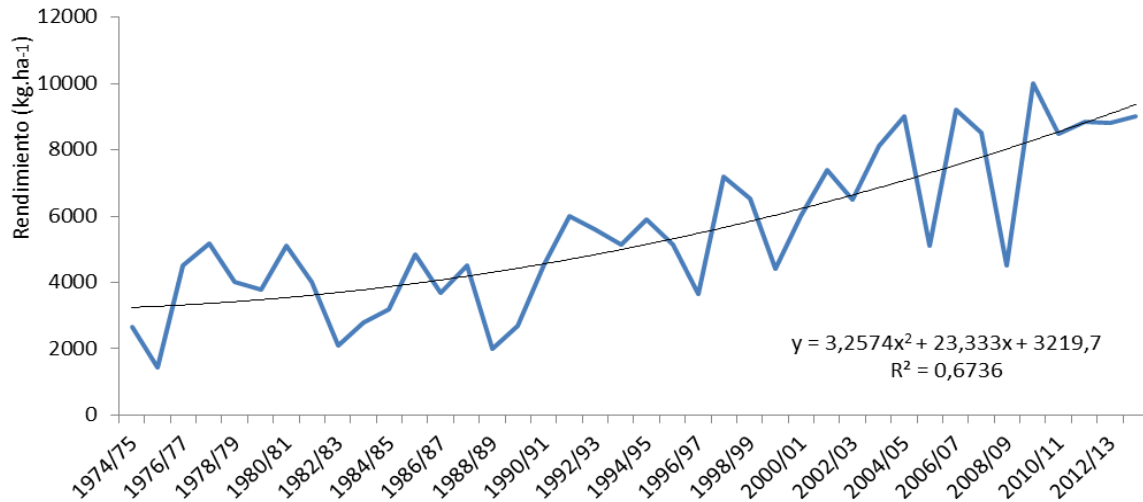


Figura 3: Evolución del rendimiento del cultivo de maíz y su tendencia ajustada a través de un polinomio de segundo grado. Período 1974-2014

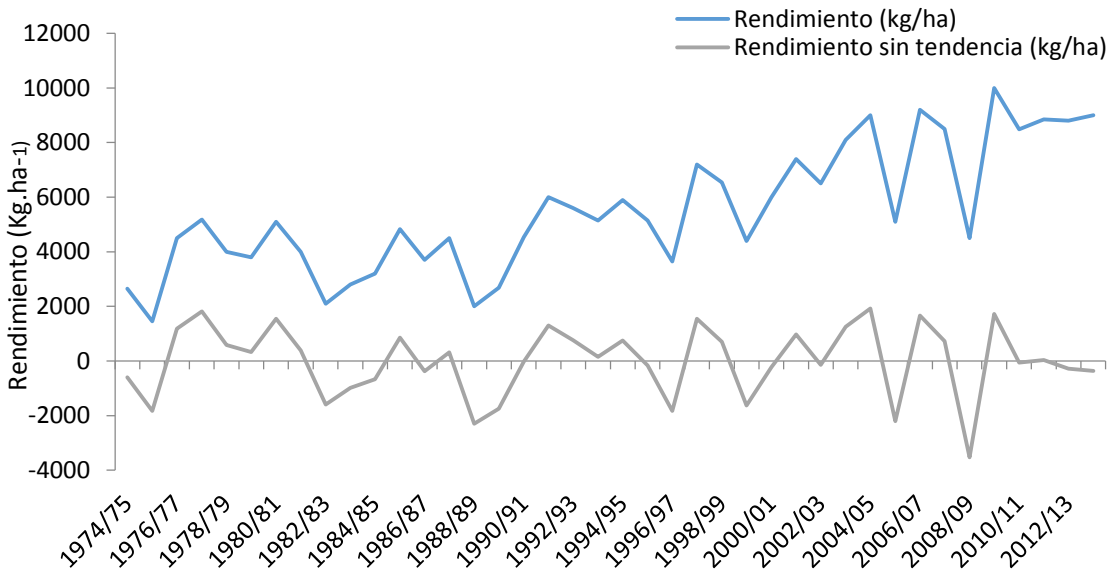


Figura 4: Evolución del rendimiento del cultivo de maíz y del rendimiento sin tendencia. Período 1974-2014.

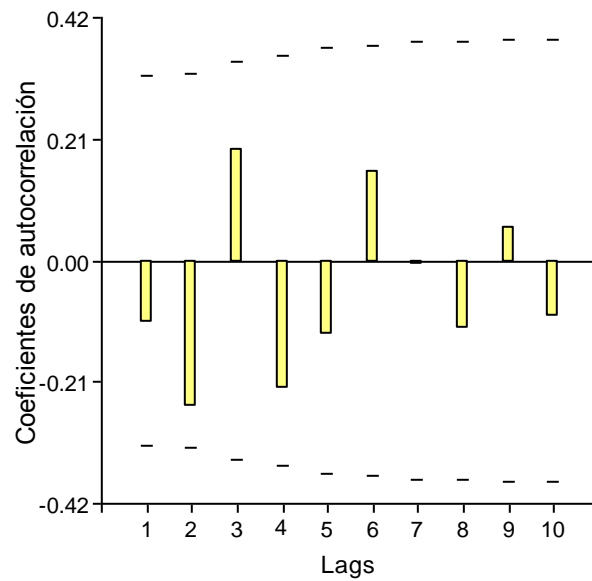


Figura 5: Autocorrelograma de los rendimientos sin tendencia (Rst). Líneas punteadas: límite superior e inferior de significancia al 95%

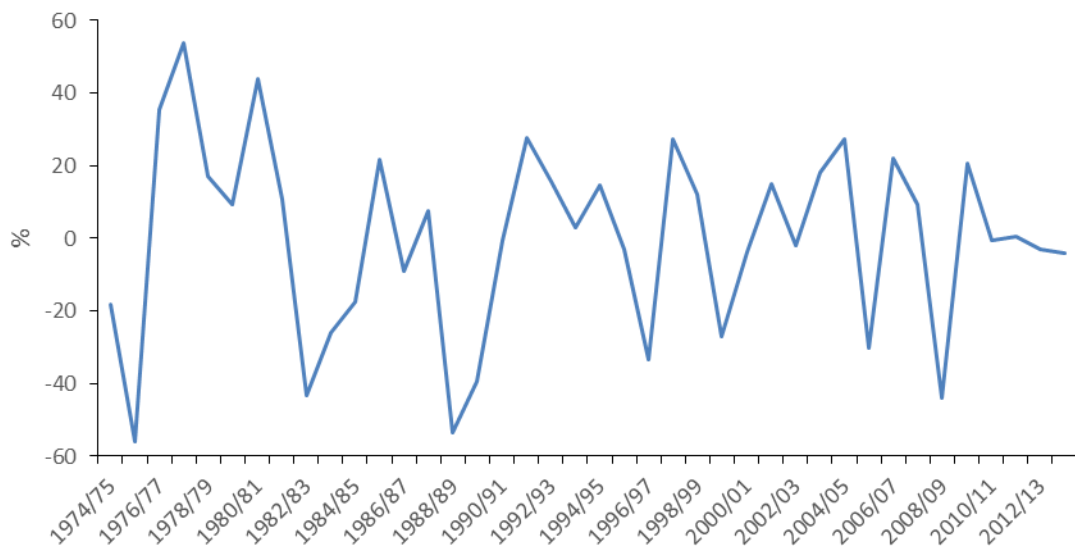


Figura 6: Evolución de la variación porcentual de los rendimientos observados (R) respecto a los rendimientos ajustados (Raj) por un polinomio de segundo grado. Período 1974-2014.

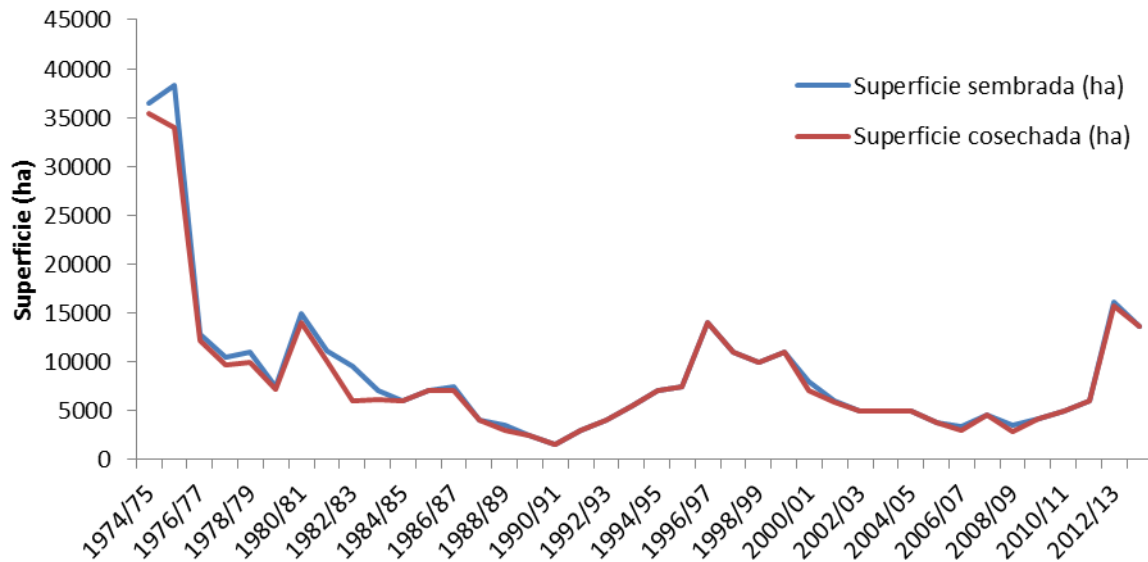


Figura 7: Evolución del área sembrada y cosechada (ha). Período 1974-2014

III.2. Balance hídrico seriado

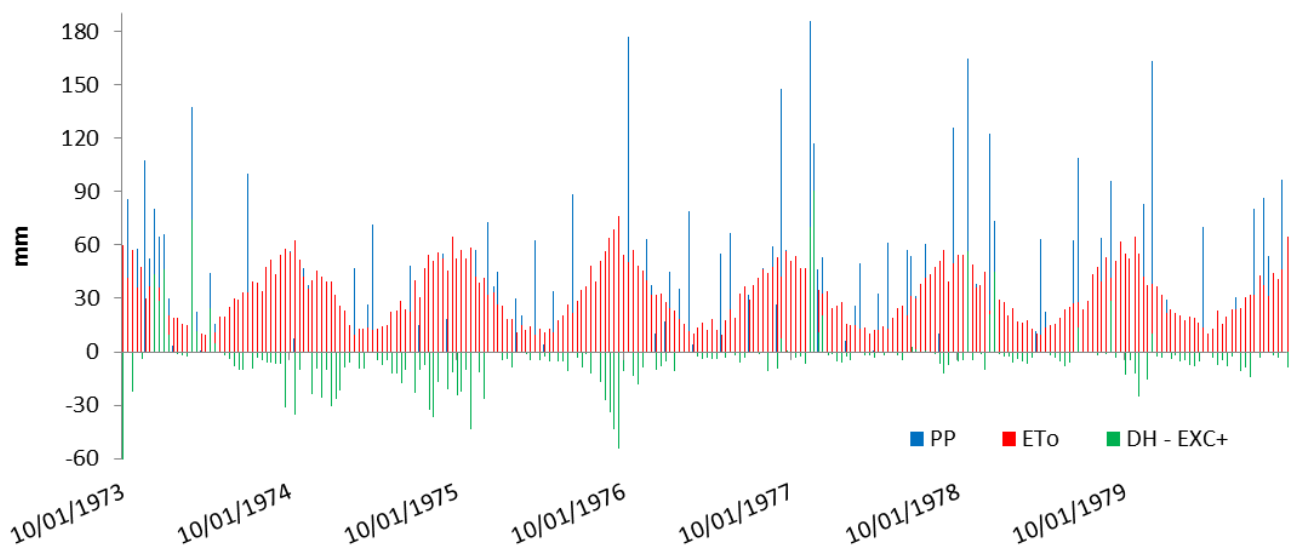
Del análisis del BHSd se encuentra que en el 64% de las décadas ocurrieron DH, el 29% no presentan DH o EXC y en el 7% restante acontecen EXC hídricos.

En todas las décadas de los meses de noviembre, diciembre y enero se destaca un mayor porcentaje de situaciones con DH, respecto de situaciones de EXC (Tabla 1). Si bien durante el período primavera – verano ocurren las mayores PP en la región, las altas temperaturas y la fuerte insolación aumentan la ETo produciendo en forma frecuente DH en el suelo. Coronel *et al.* (2012) encuentran que en Zavalla durante noviembre a enero ocurren las DH de mayor intensidad, ya que es esperable que en uno de cada cuatro años ($p=25\%$) ocurran DH por debajo de -40 mm. Estas DH de diferente intensidad, tienen efectos más severos cuando mayor es la degradación de los suelos y el manejo del mismo no contribuye a mejorar el almacenamiento de agua (Pedrol *et al.*, 2006).

Tabla 1: Porcentaje de décadas con Deficiencias Hídricas. 1973-2014
Ref.: Noviembre (NOV), diciembre (DIC) y enero (ENE)

	% de décadas con DH		
	1° década	2° década	3° década
NOV	67	64	74
DIC	71	69	71
ENE	69	74	72

En la figura 8 se presentan los resultados del BHSd en el período de estudio, en el mismo se pueden observar la evolución de PP, ETo, DH y EXC.



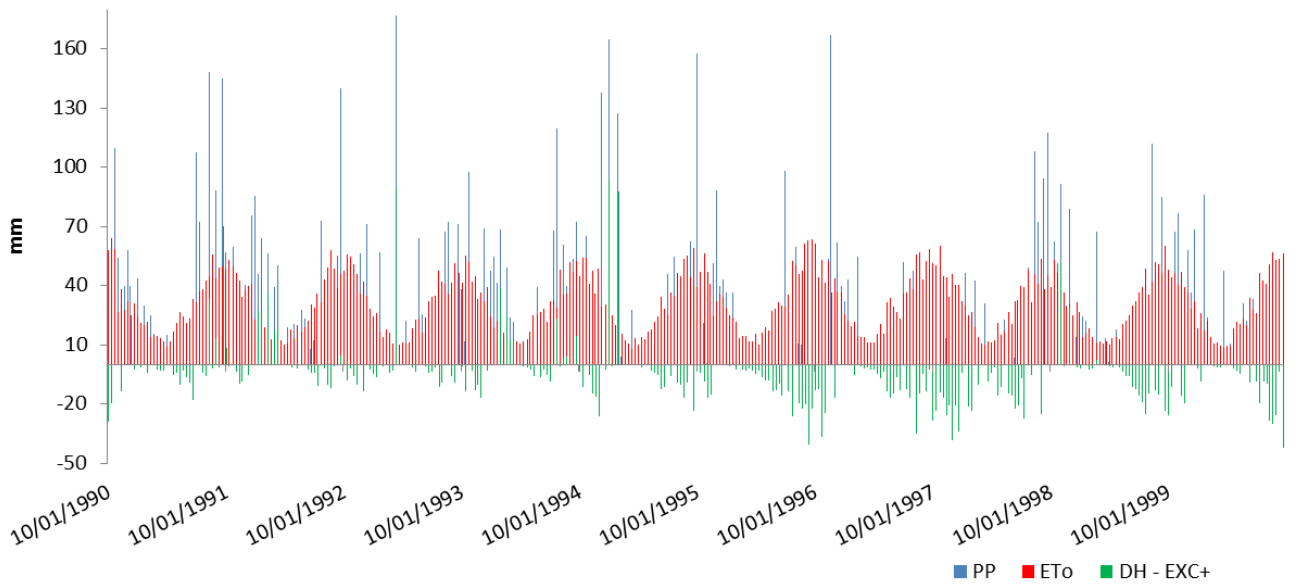
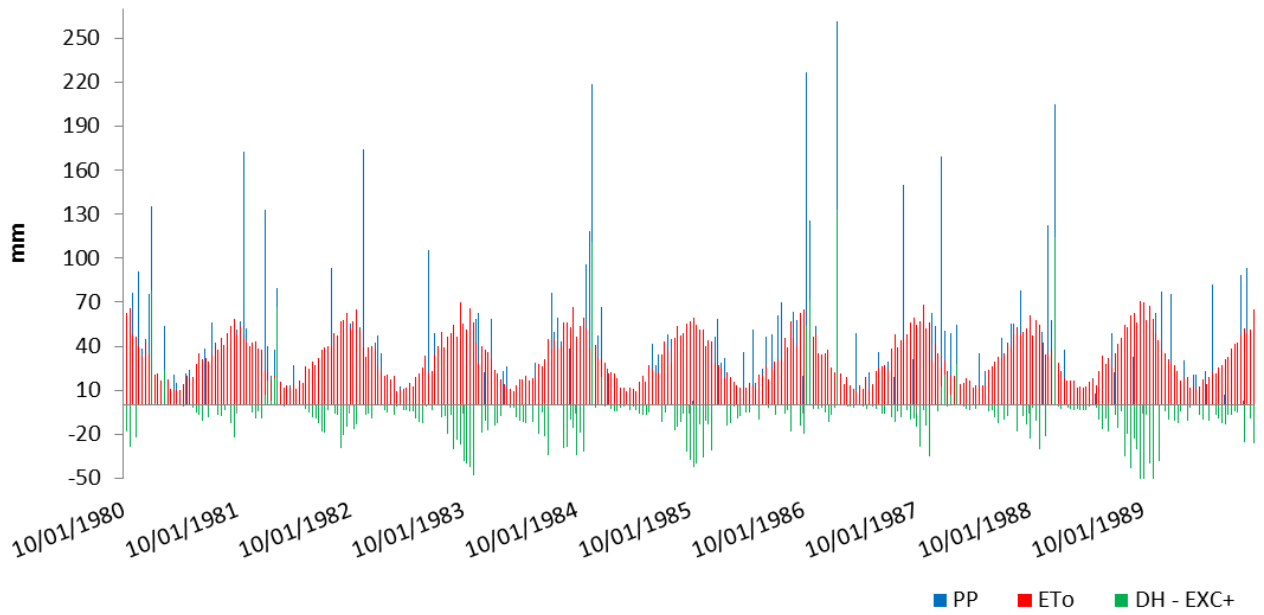




Figura 8: Resultados del Balance Hídrico Seriado decádico. Período 1974-2014.
Ref.: PP: Precipitaciones, ETo Evapotranspiración de referencia, DH: Deficiencias Hídricas y Exc: excesos hídricos.

III.3. Determinación del PC

Una vez realizado el BHSd, se analiza estadísticamente la correlación entre las series decádicas de DH y del Rst, con el objetivo de determinar el PC. Del análisis realizado se

determina que la 1° década de enero presentó el mayor valor de correlación: 0,76; seguida por la 3° década de diciembre ($\rho = 0.60$) y la 2° década de diciembre ($\rho = 0,57$); si bien cabe destacar que todas las correlaciones son estadísticamente significativas con la excepción de la 1° y 3° década de noviembre (Tabla 2). En consecuencia las series de DH de estas décadas explican entre un 11 % (2° década de enero) y un 57% (1° década de enero) de la variabilidad de los Rst de maíz.

Tabla 2: Correlaciones entre DH y Rst. Período 1974-2014.
Ref.: Los valores resaltados son estadísticamente significativos al 5%

	1° década	2° década	3° década
NOV	0.12	0.48	0.18
DIC	0.33	0.57	0.60
ENE	0.76	0.33	0.55
FEB	0.20	0.10	0.07

El modelo obtenido a partir de la técnica de regresión lineal múltiple con el método stepwise, tomando como variables regresoras a las DH decádicas de noviembre, diciembre y enero, selecciona las siguientes variables de acuerdo a los criterios de entrada y retención considerados: DH 2° década de noviembre (DH2N), DH 2° década de diciembre (DH2D) y DH 1° década de enero (DH1E). Los valores estadísticos del modelo obtenido se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Parámetros estadísticos modelo de regresión múltiple con tres variables

	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
Constante	1219,86	183,64	847,43	1592,30	6,64	<0,0001		
DH1E	44,33	8,80	26,48	62,18	5,04	<0,0001	27,71	1,47
DH2N	19,98	11,69	-3,72	43,68	1,71	0,0960	5,87	1,56
DH2D	21,66	10,31	0,75	42,58	2,10	0,0428	7,32	1,35

$R^2 = 0,69$

Debido a que la DH 3° década de diciembre (DH3D) presenta una correlación significativa con Rst, que está comprendida entre dos de las variables regresoras seleccionadas por el modelo

estadístico (2° década de diciembre y 1° década de enero), y que junto a estos dos períodos representaría el estadio de floración del cultivo de maíz (se explicará más adelante en profundidad) se toma el criterio de considerar como una cuarta variable regresora a la DH3D. De este modo el modelo obtenido presenta los estadísticos asociados que se muestran en la Tabla 4.

En base a esta metodología se establecen dos períodos críticos: segunda década de noviembre (PC1) y segunda década de diciembre a primera década de enero (PC2). Dickie *et al.* (2012) y Minetti *et al.* (2007), a partir de series mensuales, detectaron que las mayores correlaciones entre R de maíz y DH o entre R e índice de sequía, respectivamente, ocurren de noviembre a enero. De este modo se observa que al disminuir la escala de análisis, de mensual a decádica, se puede discriminar dos PC a largo del período noviembre – enero.

Se suman las DH que corresponden al PC2 y se toma como una variable única (DHPC2) y se recalcula el modelo de regresión con dos variables, cuyos estadísticos se presentan en la Tabla 5. Se observa una disminución del R^2 al sumar las DH, pero este nuevo modelo nos permite determinar que cada mm de DH en el PC1 estaría asociado a una disminución de $22,8 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ del R (considerando cero la DH en el PC2), mientras que si este valor de DH se produce en el PC2 la disminución en el R es de $20,2 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (siendo cero la DH en el PC1).

Si bien en esta tesis no se realizan pronósticos de R y de Rst, se considera que el modelo con las cuatro variables presenta un mejor comportamiento estadístico.

La Tabla 6 presenta los coeficientes de regresión de ambos modelos considerando a las variables estandarizadas. En el caso de considerar las DH durante PC1 y durante PC2 en forma integrada, el efecto esperado de la DHPC2 en el Rst es de 0,4 desviaciones estándar más que el cambio esperado por el efecto exclusivo de las DHPC1. Al tomar las DH de cada década que integra el PC2 se determina que la que tiene mayor efecto es la DH1E.

En la Tabla 7 se muestran los parámetros estadísticos de las variables regresoras seleccionadas, donde se observa que las DH decádicas pueden alcanzar valores de hasta -60 mm.

Tabla 4: Parámetros estadísticos del modelo de regresión múltiple con cuatro variables

	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
Constante	1208,81	186,47	830,25	1587,37	6,48	<0,0001		
DH2N	20,91	11,92	-3,28	45,11	1,75	0,0881	7,02	1,59
DH2D	24,33	11,46	1,07	47,60	2,12	0,0409	8,41	1,64
DH3D	-6,47	11,60	-30,01	17,07	-0,56	0,5802	4,33	2,65
DH1E	7,76	10,81	25,82	69,70	4,42	0,0001	23,02	2,18

$R^2 = 0,69$

Tabla 5: Parámetros estadísticos del modelo de regresión múltiple con dos variables

	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
Constante	1172,75	199,36	768,81	1576,69	5,88	<0,0001		
DHPC1	22,80	12,77	-3,08	48,69	1,79	0,0824	5,13	1,59
DHPC2	20,24	4,09	11,96	28,52	4,95	<0,0001	25,92	1,59

$R^2 = 0,62$

Tabla 6: Parámetros estadísticos de los modelos de regresión múltiple con dos y cuatro variables estandarizadas

	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
Constante	0,00	0,10	-0,20	0,20	0,00	>0,9999		
DHPC1	0,23	0,13	-0,03	0,48	1,79	0,0824	5,13	1,59
DHPC2	0,63	0,13	0,37	0,89	4,95	<0,0001	25,92	1,59

	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
Constante	0,00	0,09	-0,19	0,19	0,00	>0,9999		
DH2N	0,21	0,12	-0,03	0,45	1,75	0,0881	7,02	1,59
DH2D	0,26	0,12	0,01	0,50	2,12	0,0409	8,41	1,64
DH3D	-0,09	0,15	-0,40	0,23	-0,56	0,5802	4,33	2,65
DH1E	0,61	0,14	0,33	0,90	4,42	0,0001	23,02	2,18

Tabla 7: Parámetros estadísticos de las DH seleccionadas

	DH2N	DH2D	DH3D	DH1E
Media	-10	-12	-17	-16
DS	13	13	17	16
Mínimo	-55	-43	-60	-57
Máximo	0	0	0	0
Primer tercil	-13	-14	-23	-25
Segundo tercil	0	-1	-4	-4

Para determinar a qué estadio del ciclo corresponde cada PC encontrado, hay que tener en cuenta la fecha de siembra. Dado que no se cuenta con la fecha de siembra de cada campaña analizada se realizarán inferencias a partir de las fechas de siembra más probables según la bibliografía. Pedrol *et al.* (2004) explican que en el sur de Santa Fe, el período libre de heladas es suficientemente largo como para permitir un amplio período de siembra (septiembre - octubre). Estos autores exponen que en siembras tempranas (fin de agosto, principios de septiembre) existe un menor riesgo de estrés hídrico durante el período crítico porque la ocurrencia de antesis es más temprana. En siembras más tardías (fin de septiembre, octubre), las temperaturas del suelo son más altas y generalmente se logra una mejor implantación. Es mayor la tasa de crecimiento y normalmente se produce un acortamiento del ciclo. La floración puede ocurrir hacia fines de diciembre o principios de enero, por lo tanto el éxito del cultivo es muy dependiente de las lluvias del mes de enero. En el caso de fechas normales para la zona núcleo, mediados de septiembre a principios de octubre, el período de floración transcurre en diciembre (Steccone *et al.* 2012). Por último se encuentran los maíces tardíos con siembras de fines de noviembre a principios de enero, cuyo período de floración puede ocurrir en febrero.

En consecuencia para fechas normales de siembra el PC1 ocurriría dentro del estado vegetativo y el PC2 durante el estadio de floración e inicio de llenado de granos. En fechas de siembras muy tempranas el PC1 podría estar asociado a la etapa de floración. Y por último en fechas tardías, disminuye significativamente la incidencia de los PC encontrados en la merma del R.

En la Figura 9 se presentan las 19 campañas en las que se produjeron Rst negativos. Se presentan en el gráfico los porcentajes de disminución del R respecto del Raj a través del polinomio de segundo grado. Las campañas se ordenaron de manera ascendente respecto al porcentaje de disminución de los R. Las disminuciones superiores a 26% corresponden a disminuciones severas ya que se encuentran en el último tercil de la serie. Las campañas que

cumplen con esta condición son 9, siendo en orden ascendente: 1983/84 (26%), 1999/00 (27%), 2005/06 (30%), 1996/97 (33%), 1989/90 (39%), 1982/83 (43%), 2008/09 (44%), 1988/89 (54%), 1975/76 (56%). En las campañas 1999/00, 2005/06, 2008/09, 1988/89, 1975/76 tanto la DHPC1 como la DHPC2 corresponden a DH severas; en las campañas 1983/84 y 1989/90 ocurren DHPC2 severas y DHPC1 igual a “cero”; mientras que en las campañas restantes (de las 9) se observan DHPC1 severas y DHPC2 moderada para 1982/83 y leve para 1996/97.

Teniendo en cuenta los coeficientes de regresión lineal múltiple con variables estandarizadas para las DH de ambos PC y los resultados señalados en el párrafo anterior, se determina, para fechas normales de siembra, una mayor incidencia de las DH severas ocurridas durante el período de floración e inicio de llenado de granos en la disminución de los R de maíz, respecto a la influencia de las DHPC1 asociado a la etapa vegetativa.

Las 10 campañas restantes presentaron una disminución inferior al 18% en el R, destacándose que en las campañas 2010/11 y 2013/14 en las cuales se produjeron DH severas en ambos PC no se reflejó en una merma severa del R. El resto de las campañas se caracterizan por DH del PC2 leves a moderadas, si bien en 3 campañas la DH del PC1 fueron severas.

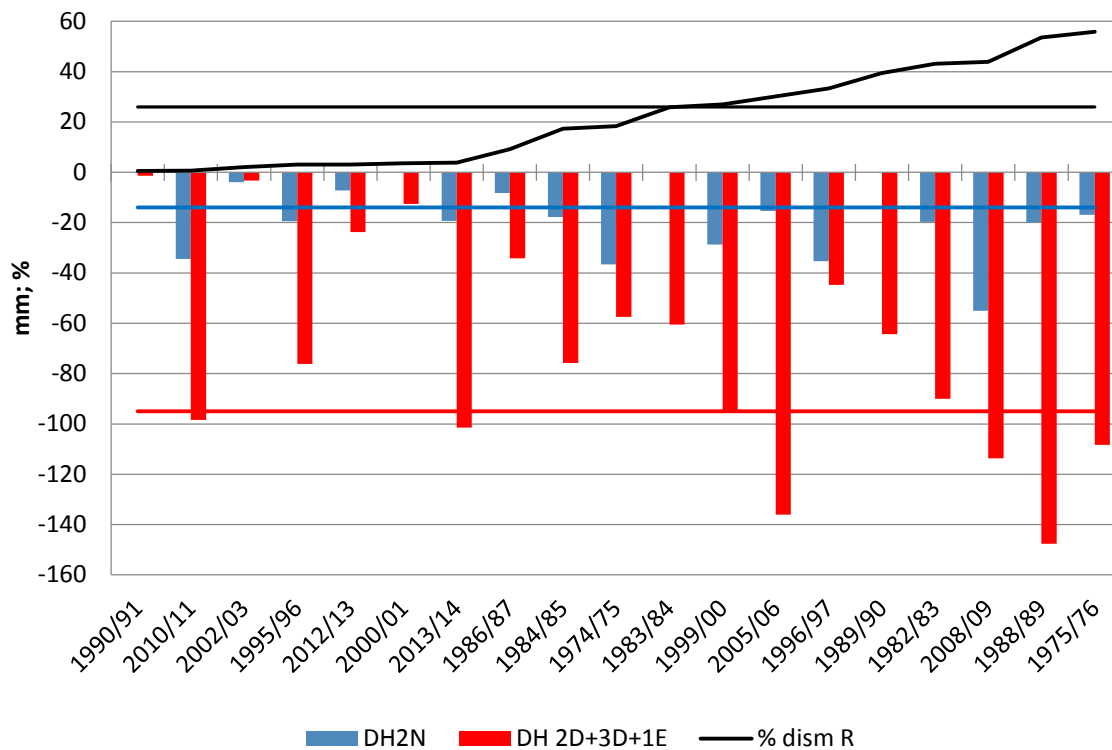


Figura 9: Porcentaje de disminución del rendimiento respecto del estimado ordenado de menor a mayor, DH de la segunda década de noviembre y la suma de las DH de las primera y segunda décadas de diciembre y de la primera década de enero. Línea negra: segundo tercil (66%) de los porcentajes de disminución de los rendimientos observados. Los valores negativos menores a la línea azul corresponden a DHPC1 severas y los menores a la línea roja a DHPC2 severas.

En las figuras 10 y 11 se presenta la variación del rendimiento sin tendencia con respecto a los DH en la 2° década de noviembre, 2° y 3° década de diciembre y 1° de enero en el período 1974-2014. En estas figuras se puede observar cómo influye el DH sobre el rendimiento del cultivo, en coincidencia con los valores de correlación.

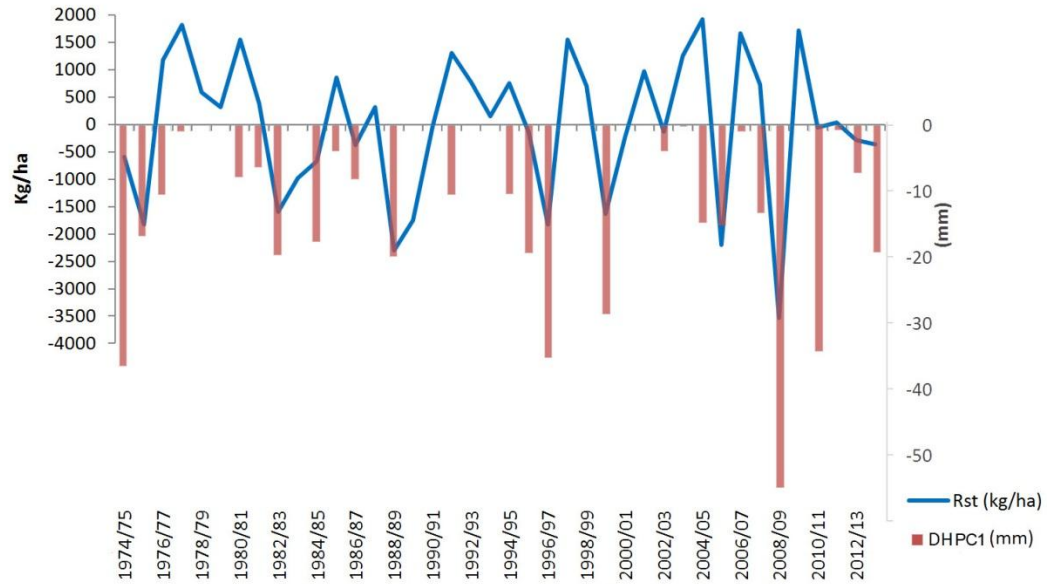


Figura 10: Variación del Rendimiento sin tendencia, kg.ha⁻¹ (Rst) y DHPC1. Período 1974-2014

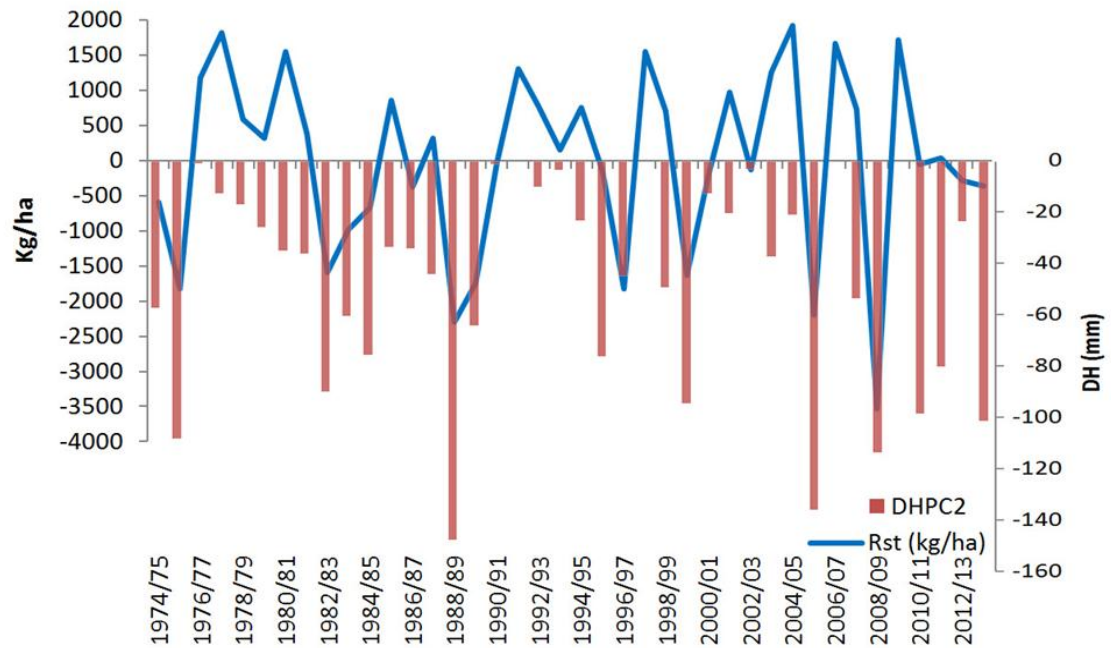


Figura 11: Variación del Rendimiento sin tendencia kg.ha⁻¹ (Rst) y DHPC2. Período 1974-2014

El momento de ocurrencia de las DH afecta al cultivo de diferente manera. Una DH durante el estado vegetativo (V6 a V8), período coincidente con el primer PC determinado en este capítulo (para fechas normales de siembra) tiene como consecuencia inmediata la pérdida de turgencia en sus tejidos resultando de este modo una menor tasa de crecimiento y menor tamaño final de los órganos los cuales en el momento de ocurrencia del estrés se encuentran en activo crecimiento. El efecto de las DH sobre la producción del cultivo opera, en gran parte, a través de la reducción de la expansión de las hojas y, en consecuencia, en la eficiencia de captación de radiación, aunque sequías intensas afectan también su eficiencia fotosintética (Dardanelli *et al.*, 2003). En el período estacional de gran crecimiento vegetativo cuando la generación de biomasa es óptima, se produce el mayor aprovechamiento de la energía disponible para la evapotranspiración (energía + agua). En este estadio la demanda de agua del cultivo es mayor, y cualquier DH es de gran impacto en la productividad final (Minetti *et al.*, 2007).

Las reducciones del rendimiento encontradas en situaciones de DHPC1 severas coinciden con los resultados hallados por Avendaño *et al.* (2008) y Cakir (2004) y se deben a la estrecha relación entre la reducción del área foliar con una reducción del rendimiento (Saini y Westgate 2000, citado por Avendaño *et al.*, 2008).

Frente a situaciones de estrés hídrico, el cultivo de maíz presenta estrategias para posponer la deshidratación limitando la pérdida de agua desde el follaje a través del acartuchamiento de las hojas, el cierre de estomas, la reducción de la expansión foliar y la senescencia foliar. El maíz presenta alta sensibilidad estomática frente al déficit hídrico, cerrando sus estomas para reducir las pérdidas de agua (Cirilo *et al.*, 2012).

Una DH severa durante el segundo PC encontrado, coincidente con la etapa de floración e inicio de llenado de granos para fechas normales de siembra, produce una pérdida de rendimiento severa ya que se ha podido observar que durante la formación de los gametos la planta es altamente sensible al déficit de agua; siendo el gametofito masculino la estructura más sensible, induciendo principalmente esterilidad (Avendaño *et al.*, 2008). Por otro lado durante el desarrollo reproductivo el estrés hídrico reduce el número de granos debido a caídas en las tasas de fotosíntesis y en el flujo de asimilados a los órganos en desarrollo (Schussler y Westgate, 1995) e incrementan la asincronía entre la liberación de polen y la emergencia de los estigmas lo cual provoca fallas en la polinización (Hall *et al.*, 1982).

Las disminuciones en los R son mayores cuando ocurren DH severas en ambos PC, llegando esta merma a un 56%, ya que es afectado tanto el crecimiento vegetativo como el número de granos. Estos valores son coincidentes con los hallados por Giménez (2012) para el Dpto. Paysandú (Uruguay).

El menor efecto en la reducción de los Rst de las DHPC1 va a depender de que el cultivo pueda recuperar área foliar una vez superado el estrés y llegar al período crítico (PC) de la floración con una buena cobertura del suelo (Abrecht y Carberry, 1993; Andrade *et al.*, 1996). En el caso en que las DH continúen, especialmente durante el PC2, y el cultivo no pueda recuperar su cobertura entonces sí se afectará fuertemente el crecimiento y por ende el número total de granos.

En el cultivo de maíz, la fecha de siembra (FS) es una de las prácticas más asociada a las variaciones del rendimiento. La elección de la FS depende de la distribución de PP, la temperatura del suelo, riesgo de heladas tardías y el momento de ocurrencia del PC y de la maduración del grano. Por lo tanto, el efecto de la temperatura y de las precipitaciones, durante el ciclo del cultivo, influyen sobre el resultado final. Cirilo (2015) menciona que “en la región, las fechas de siembra temprana presentan los mayores rendimientos potenciales, aunque en años en los que hay carencias hídricas, sumado a temperaturas altas, los rindes pueden caer drásticamente hasta la mitad. A pesar de que la siembra tardía tiene menos potencial, la disponibilidad de agua durante la floración determina mayor estabilidad interanual de los rindes alcanzables. En años secos, el atraso de la fecha de siembra expone a los cultivos a una mejor oferta de agua en floración”.

En las últimas campañas la fecha de siembra comenzó a desplazarse hacia principios y mediados de diciembre y con ello el PC se traslada hacia febrero. Debido a esto, el cultivo se enfrenta a condiciones climáticas que difieren con las esperadas para una FS normal con consecuencias en el rendimiento (Steccone *et al.*, 2012). Si bien en FS tardías las temperaturas y la radiación incidente durante el llenado de granos son menores, su impacto sobre el R es inferior en comparación con el producido por una DHS durante el PC (Steccone *et al.*, 2012).

Borrás y Gambín (2012) plantean que “los maíces tardíos (siembras de fines de noviembre a principios de enero) han adquirido importancia en los últimos años. El buen rendimiento obtenido a pesar de su menor potencialidad respecto a fechas tempranas (Otegui *et al.*, 2002;

Maddonni, 2012) ha convertido a las siembras de maíz tardías en una alternativa interesante dentro del sistema productivo”.

Cuando las precipitaciones aumentan desde la primavera la siembra de maíz en fecha tradicional o normal se ve favorecida. En cambio, en años donde las lluvias de primavera disminuyen, la tendencia que se acentúa es la siembra en el mes de diciembre. Las máximas lluvias de verano suelen ocurrir en el período enero-febrero-marzo, coincidiendo con la floración de los maíces tardíos (Ferraris y Couretot, 2014).

IV. CONCLUSIONES

Luego de analizarse las DH, brindados por BHSd, y los Rst del cultivo, se puede concluir que se determinaron dos PC de maíz, por orden de su impacto en la disminución del rendimiento uno ocurre entre la 2° década de diciembre y 1° década de enero (PC2), y el otro momento crítico (PC1) se presenta en la 2° década de noviembre.

En el caso de fechas normales de siembra para el Depto Rosario, el PC1 se ubicaría en la etapa fenológica emergencia y cambio de estado del meristema apical, dando por finalizada la etapa vegetativa. Mientras que el PC2 se encontraría en el estadio de floración e inicio de llenado de granos. Para siembras tardías el PC1 no abarca el ciclo del cultivo, y el PC2 abarcaría las etapas iniciales de crecimiento del cultivo, estadios fenológicos que no son sensibles a las DH.

Si bien no es común en la región, las siembras anticipadas, fines de agosto, presentaría su PC de floración durante el PC1.

Cuando ocurren DH severas en ambos PC los rendimientos de maíz pueden disminuir hasta un 56% respecto de los rendimientos esperados.

Si bien la metodología aplicada permite establecer los períodos críticos del cultivo en función de las DH, las décadas resultantes no coinciden con las planteadas en la primera hipótesis ya que se planteó un PC y se han determinado dos.

CAPITULO III

Caracterización de las masas de aire asociadas a la ocurrencia de DHS durante los PC de maíz

I. INTRODUCCIÓN

Las innumerables actividades que desarrolla el ser humano están enmarcadas dentro de un medio natural con características propias según su lugar de residencia. El clima de cada región es una característica importante que define muchas de estas actividades. Cuando se registran situaciones climáticas anómalas, las consecuencias se hacen sentir en la economía y el bienestar de los seres vivos. Un ejemplo de esto lo constituyen los casos de déficit de PP, que históricamente han traído como consecuencia pérdidas importantes en los R de los cultivos entre otras cuestiones adversas (Barrucand *et al.*, 2012)

Debido a la importancia de esta región en la producción agrícola mundial, es necesario estudiar los eventos climáticos y las condiciones meteorológicas relacionadas que tienen un fuerte impacto en la economía (Bischoff y Vargas, 2003).

La Climatología Sinóptica es una rama de la Climatología que busca explicar las interacciones entre la atmósfera y el ambiente, haciendo énfasis en como las variaciones en la circulación atmosférica inducen cambios en las variables en superficie (Gutiérrez *et al.*, 2005).

La clasificación de los procesos sinópticos puede realizarse a través de dos métodos, es posible establecer una relación circulación-a-ambiente, que se fundamenta en la descripción de los campos de las variables en superficie a través de la caracterización de los patrones sinópticos; y ambiente-a-circulación, en donde en primera instancia se caracterizan los campos de las variables en superficie para posteriormente asociarlos a patrones sinópticos (Gutiérrez *et al.*, 2005).

En el capítulo anterior se determinó que el cultivo de maíz presenta dos momentos críticos, uno de ellos ocurre en la segunda década de noviembre y el otro en la segunda década de diciembre-primera década de enero, encontrándose el cultivo en periodo vegetativo y floración-inicio de llenado de granos respectivamente. En este capítulo se realizará una clasificación de

los procesos sinópticos asociados a DHS durante los PC encontrados que afectan al rendimiento de maíz, mediante el método ambiente-a-circulación, en donde en primera instancia se caracterizan las combinaciones de las variables en superficie o masas de aire, para posteriormente asociarlos a patrones de circulación atmosférica.

HIPÓTESIS DE ESTE CAPÍTULO:

“La ocurrencia y persistencia de masas de aire con temperaturas mayores a lo normal, humedad relativa con valores menores a la media y alta insolación durante los periodos críticos del maíz provocan deficiencias hídricas severas que reducen significativamente los rendimientos del cultivo. La circulación atmosférica asociada a estas masas de aire presenta una inhibición de la entrada de aire húmedo proveniente del noreste del país y/o del factor dinámico de la precipitación”.

OBJETIVOS:

- ✓ Identificar las masas de aire diarias que ocurren en el periodo crítico del cultivo.
- ✓ Establecer la frecuencia y persistencia de masas de aire en años con deficiencia hídrica, y sus patrones medios de circulación asociados.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

II. 1. Información meteorológica

- Se analizaron las series diarias de temperatura media (T_{med} , °C), máxima ($T_{máx}$, °C) y mínima ($T_{mín}$, °C), humedad relativa media (HR_m , %), heliofanía efectiva (H_{ef} , horas), presión atmosférica media (P_{atm} , hPa) y precipitación (PP, mm) correspondiente a los meses de noviembre, diciembre y enero del período 1992-2014. La información pertenece a la estación agrometeorológica Zavalla (33°01'S, 60°53'O). Esta estación agrometeorológica es representativa de las condiciones climáticas de la región en estudio, además pertenece a la Red del SMN y del INTA.

Debido a la falta de instrumental de medición de la variable presión atmosférica en el periodo 1974 al 1991, el segundo objetivo de esta tesis se evaluó para el periodo 1992-2014. Si bien ha disminuido la cantidad de años de información respecto al capítulo anterior, el análisis se basó en 22 campañas agrícolas, lo cual se considera suficiente desde el punto de vista climático y estadístico.

- Base de datos del reanálisis del NCEP, provista por el NOAA Climate Diagnostic Center (Kalnay *et al.*, 1996), utilizando los campos de altura geopotencial de 1000 y 500 hPa, de temperatura en 1000 hPa, en un enrejado de 2,5° x 2,5° de latitud y longitud en el período 1992-2014.

II.2. Identificación de las masas de aire diarias que ocurren en los períodos críticos del cultivo.

a) La identificación de las masas de aire que afectan al Dpto. Rosario durante los PC para el período 1992-2014, se realizó mediante la técnica de análisis multivariado de conglomerados o cluster. El agrupamiento de objetos multivariados es frecuentemente utilizado como método exploratorio de datos con la finalidad de obtener mayor conocimiento sobre la estructura de las observaciones y/o variables en estudio. Se recurre a técnicas de agrupamiento cuando no se conoce una estructura de agrupamiento de los datos “a priori” y el objetivo operacional es identificar el agrupamiento natural de las observaciones. Las técnicas de clasificación basadas en agrupamientos implican la distribución de las unidades de estudio en clases o categorías de manera tal que cada clase (conglomerado) reúne unidades cuya similitud es máxima bajo algún criterio. Es decir los objetos en un mismo grupo comparten el mayor número permisible de características y los objetos en diferentes grupos tienden a ser distintos (Balzarini *et al.*, 2008). Este método busca agrupar elementos (o variables) tratando de lograr la máxima homogeneidad en cada grupo y la mayor diferencia entre los grupos. Cuando no se conoce *a priori* el número de grupos se pueden aplicar métodos de análisis de cluster jerárquicos. Sí la cantidad de grupos es conocida se puede utilizar el análisis de clusters de K-means (Spath 1980), que es un método no jerárquico.

El agrupamiento logrado dependerá no sólo del algoritmo de agrupamiento elegido sino también de la medida de distancia seleccionada, del número de grupos que deben ser formado (cuando

esta información existe), de la selección de las variables para el análisis y del escalamiento de las mismas.

En este trabajo se optó por aplicar la técnica de análisis de conglomerados K-means, considerando como medida de similitud la distancia euclídea. Para cada PC no se conocía a priori el número de clusters o tipos de masas de aire, de manera que se exploró la metodología con tres a seis grupos, teniendo en cuenta los resultados de Coronel y Castañeda (2010) y Bejarán y Camilloni (2003) quienes analizaron 4 y 6 tipos diferentes de masas de aire, respectivamente, con distintos objetivos. La elección final del número de grupos se basó en: *una muy buena discriminación de las masas de aire con mayores precipitaciones y las de precipitaciones nulas o muy bajas.*

El InfoStat (Balzarini *et al.*, 2008) calcula la distancia euclidiana como:

Sean dos datos: $x = (x_1, x_2, \dots, x_M)$ e $y = (y_1, y_2, \dots, y_M)$

Distancia euclidiana entre x e y :

$$d(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=M} (x_i - y_i)^2}$$

Para cada tipo de masa de aire identificado se determinaron los promedios, las desviaciones estándares (DS), los coeficientes de variación (CV) y las anomalías de las variables analizadas. Las anomalías fueron calculadas como la diferencia entre el valor medio para cada tipo de masa de aire menos el promedio climático correspondiente al período 1992-2014. A fin de determinar si los valores de anomalías son significativamente distintos de cero se les aplicó la Prueba T de Student.

Prueba T para un parámetro permite probar una hipótesis acerca de la esperanza de una variable aleatoria, del tipo $H_0: \mu = \mu_0$. La prueba utiliza una estimación de la varianza de la variable respuesta.

El estadístico de la prueba es:

$$T = \left(\frac{\bar{X} - \mu_0}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \right)$$

que bajo H_0 tiene distribución ‘T de Student’ con $n-1$ grados de libertad.

Cuando el valor p es \leq que el nivel de significación nominal seleccionado ($\alpha = 0,05$) el estadístico pertenece a la región de rechazo, es decir la prueba sugiere el rechazo de la hipótesis nula (Balzarini *et al.*, 2008).

b) A fin de identificar si las categorías de masas de aire encontradas eran estadísticamente diferentes se aplicó el Test de Kruskal Wallis con un nivel de significancia al 5% a cada variable, para todas las posibles combinaciones de pares de diferentes tipos de masas de aire.

La prueba de Kruskal-Wallis (1952), es el método más adecuado para comparar poblaciones cuyas distribuciones no son normales. Incluso cuando las poblaciones son normales, este contraste funciona muy bien. Este Test no-paramétrico para el análisis de la varianza, para k muestras aleatorias independientes es análoga a la prueba paramétrica ANOVA.

Las hipótesis para esta prueba son:

- H_0 : Las medias o medianas de los n grupos son iguales.
- H_1 : Hay diferencia en al menos una de las medias o medianas.

El estadístico de la prueba (H) se basa en la suma de los rangos asignados a las observaciones dentro de cada tratamiento. Su distribución exacta es obtenida a partir de la consideración de todas las configuraciones posibles de los rangos de N observaciones en a grupos de n_i observaciones cada uno (Balzarini *et al.*, 2008).

Cálculo de los rangos para cada observación

Para cada observación se le asigna el rango según el orden que ocupa la observación en el conjunto total de los datos, asignando el rango medio en caso de empates.

Cálculo de la suma de rangos R_m

Para cada grupo $m = 1, \dots, r$, siendo r el número de grupos, se define R_m como la suma de rangos de cada grupo m

Cálculo del valor medio de los rangos $E[R_m]$ y de los rangos medios \bar{R}_m

El valor medio de los rangos $E[R_m]$ se calcula como:

$$E[R_m] = \frac{n_m(n+1)}{2}$$

y el rango medio R_m como:

$$\bar{R}_m = \frac{R_m}{n_m}$$

El estadístico de contraste de Kruskal-Wallis H' se calcula como:

$$H' = \frac{\frac{12}{n(n+1)} \sum_{m=1}^r \frac{1}{n_m} [R_m - E[R_m]]^2}{\frac{\sum_{j=1}^k (d_j^3 - d_j)}{1 - \frac{1}{n^3 - n}}}$$

siendo d_j el número de empates en $j = 1, \dots, k$ siendo k el número de valores distintos de la variable respuesta, que sigue una distribución Chi-Cuadrado con $r - 1$ grados de libertad.

II.3. Establecer la frecuencia y persistencia de masas de aire en años con deficiencia hídrica severa, y sus patrones medios de circulación asociados.

A partir de las series de DHPC1 y DHPC2, consideradas en este capítulo con signo positivo:

a) Se calcularon sus terciles, a partir de los cuales se obtuvieron los años con deficiencia hídrica leve (primer tercil) (DHL), deficiencia moderada (segundo tercil) (DHM) y deficiencia severa (tercer tercil) (DHS).

En este trabajo se utilizaron los terciles con la finalidad de crear tres situaciones de DH:

Situación de DHL: $x <$ primer tercil

Situación de DHM: primer tercil $\leq x <$ segundo tercil

Situación de DHS: $x \geq$ segundo tercil

b) Se analizaron la *frecuencia y la persistencia* (días consecutivos con la misma masa de aire) de las masas de aire durante los años con DHS, para cada PC. De este modo se detectó qué tipo/s de masas de aire (y los rangos característicos de las distintas variables atmosféricas clasificatorias) ocurrieron con mayor frecuencia y persistencia durante los años con DHS en el PC1 y en el PC2.

c) Este estudio se complementó con la determinación de los patrones de circulación asociados a las masas de aire que ocurren con mayor frecuencia en situaciones de DHS. Dado que una misma masa de aire puede persistir por varios días, el análisis se estableció para el primer día de la secuencia y con el objeto de garantizar la independencia entre dos fechas consecutivas se eligieron a las mismas separadas al menos tres días entre sí (Coronel *et al.*, 2006).

Para estas fechas sobre el dominio de estudio de 20°S a 60°S de latitud y desde 40°O a 100°O de longitud se calcularon los campos medios y campos medios de anomalías de altura geopotencial de 1000 y 500 hPa y los patrones medios de anomalías y de temperatura del aire en 1000 hPa y de la tasa diaria de precipitación. Las anomalías diarias se determinaron como la diferencia entre el valor de la variable para cada día y cada punto de grilla y el valor promedio para el período 1992-2014.

III. RESULTADOS

III.1. Período Crítico 1: 2° década de Noviembre

Para este PC se detectan 3 agrupamientos que representan las principales masas de aire con características atmosféricas asociadas a estados de tiempo particulares.

Las masas de aire identificadas son (Tabla 1):

ma1: se caracteriza por ser templada ($T_{med} = 18,3^{\circ}\text{C}$) seca, sin PP, con valores de temperaturas y HRm inferiores a lo normal y P_{atm} mayores a lo normal. Es importante remarcar que la T_{min} de esta masa de aire tiene un rango de variación de 4,6-15,9°C, donde en general son inferiores a la T_{min} de noviembre que es de 15°C.

ma2: se diferencia de la anterior en que los valores de temperatura son mayores a lo normal, principalmente $T_{máx}$, que registró un valor máximo de 35,1°C, siendo estos registros elevados

para la 2° década de noviembre ya que la T_{máx} media es de 27°C. Los valores de PP no difieren estadísticamente del promedio, ya que tienen una anomalía de -0,4 mm y la P_{atm} es inferior a lo normal. Sin embargo estas masas presentan anomalías significativas y negativas de HR_m. Estas masas de aire representan las condiciones de máximas temperaturas y bajas humedades relativas.

ma3: se destaca de las otras dos, en que los valores de PP son mayores a lo normal, presentando un registro máximo de 87,4mm. Los valores de H_{ef} son significativamente inferiores a los normales, en promedio 3,4hs de duración de la luz solar y presenta los menores valores de presión atmosférica. Esta masa es característica de días con inestabilidad y precipitaciones.

A fin de identificar si las categorías de masas de aire encontradas son estadísticamente diferentes se realizó el Test Kruskal-Wallis al 5% a cada variable, para todas las posibles combinaciones de pares de diferentes tipos de masas de aire. De este análisis se puede observar que las tres masas de aire difieren estadísticamente en las variables PP, T_{máx} y T_{med}. En cuanto a las T_{min} y P_{atm}, la ma1 se diferencia significativa de las otras dos. En cuanto a la variable H_{ef} y HR_m, la m3 se diferencia de la ma1 y ma2 (Tabla 2). Se observa que entre dos tipos diferentes de masas de aire detectadas en este trabajo, al menos cinco variables presentan diferencias significativas al 5%, por lo que se puede concluir que estos tres tipos de masas de aire son estadísticamente diferentes.

Luego de este análisis a estas masas de aire se las llamará:

ma1: masa de aire templada seca (mTS)

ma2: masa de aire cálida seca (mCS)

ma3: masa de aire templada húmeda (mTH)

Del total de días analizados en este período, 1992-2014, el 39% corresponde a la mTS, el 42% a la mCS y el 19% restante a la mTH, por lo que se observa un leve predominio de las masas de aire cálidas y secas sobre las templadas y secas (Figura 1). Es de destacar que el 81% de los días presentaron masas de aire secas.

Tabla 1: Caracterización de las masas de aires presentes en el PC1. 1992/2014.

Ref.: *significativamente distinto a 0 (cero) al 5%

	Precipitación (mm)	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Media (°C)	Humedad relativa (%)	Presión Atmosférica (hPa)	Heliofanía (hs)
Promedio ma1	0,1	25,3	11,2	18,3	61,6	1011,5	10,4
Rango	0 - 4,6	17 - 29,4	4,6 - 15,9	12,1 - 21	35 - 80	1003,5 - 1018,7	0,5 - 13,1
DS	0,5	2,5	2,0	1,8	7,9	3,8	3,8
CV	7,7	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,4
Anomalía	-4,2*	-1,7*	-2,9*	-2,3*	-4,6*	3,6*	1,1*
Promedio ma2	3,9	30,2	16,0	23,1	61,7	1005,9	10,4
Rango	0 - 47,8	25,4 - 35,1	11,9 - 22,7	19,9 - 27	36 - 82	995,2 - 1015,1	0 - 12
DS	10,1	2,3	2,1	1,7	10,0	3,8	3,0
CV	2,6	0,1	0,1	0,1	0,2	0,0	0,3
Anomalía	-0,4	3,2*	1,9*	2,6*	-4,5*	-2,0*	1,1*
Promedio ma3	13,8	23,4	15,8	19,6	86,0	1004,9	3,4
Rango	0 - 87,4	16 - 26,8	11 - 20,2	14,6 - 23,4	74 - 98	995,7 - 1015,0	0 - 12,1
DS	24,6	2,4	2,2	2,0	6,9	4,3	3,1
CV	1,8	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,9
Anomalía	9,6*	-3,6*	1,7*	-1,0*	19,8*	-3,0*	-5,9*

Tabla 2: Análisis estadístico: Prueba Kruskal-Wallis.
Ref.: Letras distintas significan diferencias significativas (5%) entre masas de aire

Masa de aire	Precipitaciones (mm)	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Media (°C)	Humedad Relativa (%)	Presión Atmosférica (hPa)	Heliofanía (hs)
ma1	a	a	a	a	a	a	a
ma2	b	b	b	b	a	b	a
ma3	c	c	b	c	b	b	b

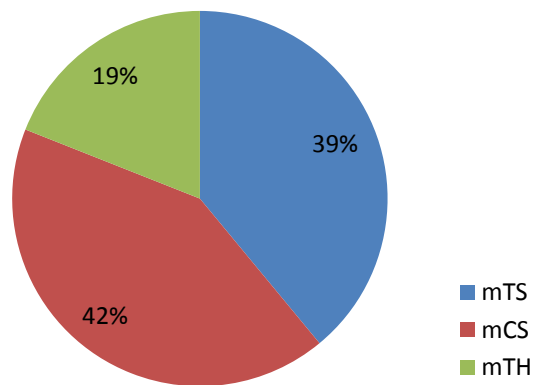


Figura 1: Porcentaje con días con las distintas masas de aire en PC1. 1992-2014

A partir del análisis de los terciles de las DHPC1, en la Figura 2 se observa que de 22 campañas analizadas 8 no presentan DH, 6 presentan DHM y el resto presenta DHS (superiores a 13 mm).

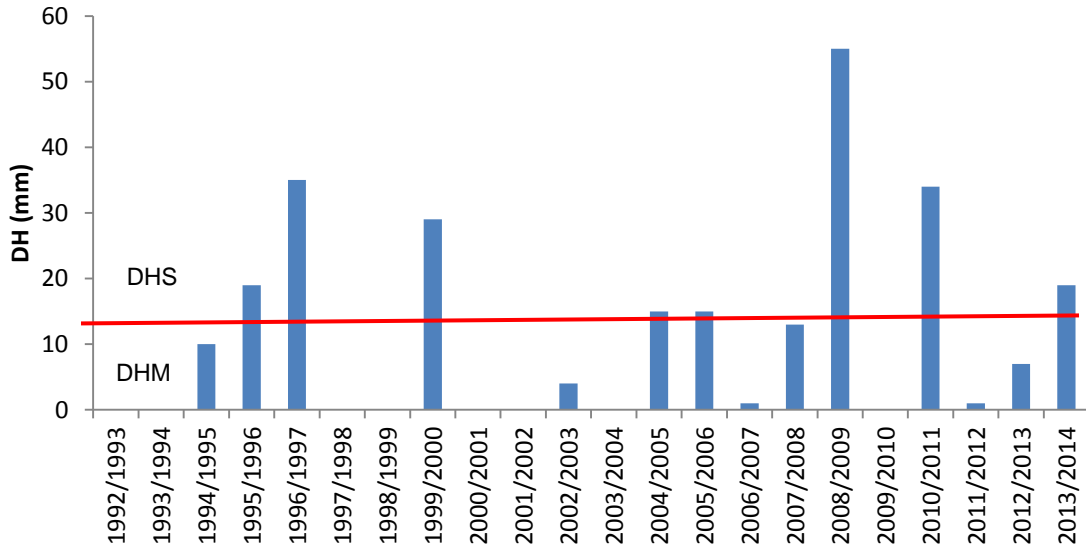


Figura 2: Deficiencias Hídricas en la 2° década de noviembre. Línea horizontal: segundo tercil de la serie. 1992-2014.

Como se puede observar 8 campañas presentan DHS, lo cual representa el 36% de las campañas evaluadas y sus valores de DHS se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Campañas con DHS para el PC1

Campañas	DHS (mm)
1995/96	19
1996/97	35
1999/00	29
2004/05	15
2005/06	15
2008/09	55
2010/11	34
2013/14	19

La campaña 2008/09, presenta las mayores DHS de la serie de datos seguidos por la campaña 1996/97 y 2010/2011, y las que presentaron valores menores de DHS fueron la campañas 2005/06 y 2004/05.

Los Rst de estas campañas con DHS se presentan en la Tabla 4, donde se puede observar que la campaña 2008/09 presenta la mayor diferencia entre el rendimiento obtenido y el esperado, por lo que el DHS habría afectado considerablemente el rendimiento de esta campaña.

Tabla 4: Rendimiento sin tendencia (Rst) y las deficiencias hídricas severas (DHS) de las 8 campañas con esta última característica

Campañas	Rst (kg.ha⁻¹)	DHS (mm)
1995/96	-163	19
1996/97	-1830	35
1999/00	-1628	29
2004/05	1927	15
2005/06	-2201	15
2008/09	-3527	55
2010/11	-54	34
2013/14	-365	19

La campaña 2005/2006 es la segunda campaña con menor rendimiento, si bien la DHS no representa un valor elevado como en la campaña 2008/09. La disminución significativa del R se debe a que la mayor parte del ciclo del cultivo estuvo bajo condiciones de DHS, DHM o DHL, de manera que la persistencia de DH afectó considerablemente el R en mayor medida que su intensidad durante el PC1 (Figura 3).

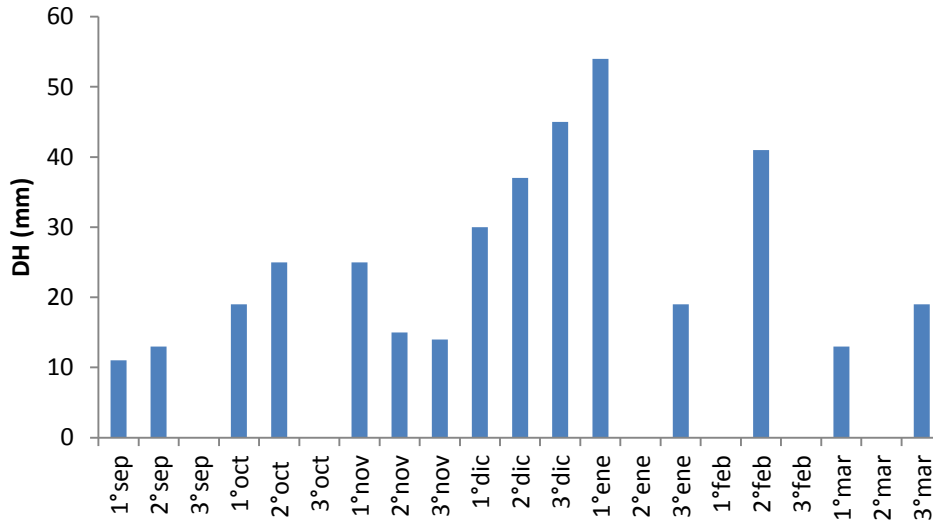


Figura 3: Deficiencias hídricas decádicas durante el ciclo del cultivo de maíz, para cada década de la campaña 2005/06.

La campaña 2004/05 si bien presenta DHS, su Rst es positivo, por lo tanto no se incorporará en el análisis posterior.

Dentro de estas campañas se analizó la presencia de las masas de aires determinadas, donde se encuentra que en 5 campañas predomina la mCS, presentando en promedio el 70% de días con dicha masa de aire. En las otras dos campañas predomina la mTS, donde en la campaña 2010/11, el 90% de los días presentaron esta masa de aire. Cabe resaltar que la presencia de la mTH es nula en 4 campañas y en el resto a lo sumo 2 días presentan estas masas (Tabla 5). Por lo que se puede concluir que en este período, entre el 80% y el 100% de los días presentan masas de aire secas, ya sean templadas o cálidas.

En las campañas con Rst más bajos, la masa de aire predominante es la mCS. Pero no solo es importante su frecuencia sino que hay que considerar su persistencia, es decir cuantos días consecutivos permaneció la misma masa de aire, debido a que esto nos determinará su impacto en el rendimiento final.

Tabla 5: Número de días con los distintos tipos masas de aires para el PC1

Campañas	mTS	mCS	mTH
1995/96	5	3	2
1996/97	2	8	0
1999/00	3	6	1
2005/06	1	7	2
2008/09	3	7	0
2010/11	9	1	0
2013/14	2	8	0

En la Tabla 6 se presentan la distribución y persistencia de las masas de aire en las campañas consideradas, donde las más relevantes son las campañas: 2010/11 que presenta 10 días consecutivos con la mTS, y la campaña 2013/14 con 10 días consecutivos de mCS. Las campañas 1996/97 y 2005/06, presentan 9 días consecutivos con mCS. En el resto de las campañas las persistencias máximas de estas masas de aire oscilan entre 3 y 7 días.

De manera que en las campañas con DHS durante el PC1, período que corresponde a la etapa vegetativa del cultivo de maíz considerando fechas normales de siembra, las masas de aire predominantes corresponden a las masas de aire cálidas secas y en menor proporción las templadas secas.

Tabla 6: Secuencia y persistencia de las distintas masas de aire presentes en el PC1, en las campañas con DHS del período 1992-20014. Ref.: 1: mTS; 2: mCS; 3: mTH

	11/11/1995	12/11/1995	13/11/1995	14/11/1995	15/11/1995	16/11/1995	17/11/1995	18/11/1995	19/11/1995	20/11/1995
Masa de aire	3	1	1	1	2	2	3	1	1	2
Persistencia				3		2			2	1
	11/11/1996	12/11/1996	13/11/1996	14/11/1996	15/11/1996	16/11/1996	17/11/1996	18/11/1996	19/11/1996	20/11/1996
Masa de aire	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2
Persistencia										9
	11/11/1999	12/11/1999	13/11/1999	14/11/1999	15/11/1999	16/11/1999	17/11/1999	18/11/1999	19/11/1999	20/11/1999
Masa de aire	1	1	2	2	2	2	2	3	2	1
Persistencia									7	
	11/11/2005	12/11/2005	13/11/2005	14/11/2005	15/11/2005	16/11/2005	17/11/2005	18/11/2005	19/11/2005	20/11/2005
Masa de aire	1	2	3	2	2	3	2	2	2	2
Persistencia										9
	11/11/2008	12/11/2008	13/11/2008	14/11/2008	15/11/2008	16/11/2008	17/11/2008	18/11/2008	19/11/2008	20/11/2008
Masa de aire	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2
Persistencia				4			3			3
	11/11/2010	12/11/2010	13/11/2010	14/11/2010	15/11/2010	16/11/2010	17/11/2010	18/11/2010	19/11/2010	20/11/2010
Masa de aire	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1
Persistencia										10
	11/11/2013	12/11/2013	13/11/2013	14/11/2013	15/11/2013	16/11/2013	17/11/2013	18/11/2013	19/11/2013	20/11/2013
Masa de aire	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2
Persistencia										10

III. 2. Periodo Crítico 2: 2° década de Diciembre - 1° década de Enero

En el segundo periodo crítico (PC2), ordenado por época de ocurrencia, que abarca desde la 2° década de diciembre hasta la 1° década de enero, el cual corresponde al estadio floración-inicio de llenado de granos, se identificaron 5 masas de aire.

Las masas de aire identificadas (Tabla 7) son:

ma1: caracterizada principalmente por presentar la mayor cantidad de PP, entre 23,9mm y 128,7mm, esto se nota claramente en su anomalía que, presenta un alto valor positivo. La HRm es mayor a lo normal y la Patm y la Hef son menores a lo normal. En cuanto a la temperatura se la puede clasificar como una masa templada, ya que se observa una anomalía negativa en cuanto a la Tmáx.

ma2: se caracteriza por presentar anomalías negativas para las variables PP y HRm; esto le confiere la característica de una masa de aire seca debido a la falta de PP y al bajo contenido de HRm. Las Tmed son normales para este período y los valores de Patm y Hef son mayores a los normales.

ma3: se caracteriza por ser también una masa de aire seca, pero en menor grado que la anterior (anomalías de: PP ma2= -3,4 mm versus -0,9 mm= ma3 y HRm ma2= -10,4% versus -6%= ma3). A su vez se destaca del resto de las masas de aires por las elevadas temperaturas donde su anomalía es mayor a la media y su rango de variación es 29,9°C-39,9°C, otorgándole las característica de una masa de aire cálida seca.

ma4: presenta valores de precipitaciones menores a los normales, las Tmed son similares a la media histórica, se puede destacar que la Tmin es mayor a los valores normales y la Tmáx es inferior; al igual que la Patm y Hef. Las anomalías negativas de la Tmáx estarían asociadas a las anomalías negativas de Hef. Con estas características esta masa de aire se clasifica como templadas con elevado porcentaje de HRm.

ma5: se distingue de las anteriores por presentar valores de temperaturas, en sus tres categorías (max, min y med) menores a lo normal. Las Tmin varían entre 5,6 y 18°C y las Tmed entre 15,9°C y 22,5 °C. Las PP son menores a lo normal y la Patm es mayor a lo normal. Esta masa de aire se caracteriza por ser más fría que las anteriores, si bien se la puede considerar seca.

Tabla 7: Caracterización de las masas de aires presentes en el PC2. 1992/2014. Ref.: significativamente distinto a 0, al 5%

	Precipitación (mm)	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Media (°C)	Humedad relativa (%)	Presión Atmosférica (HPa)	Heliofanía (hs)
Media ma1	47,2	27,7	19,0	23,4	85,8	1002,7	5,4
D.E.	22,2	3,9	2,1	2,6	10,3	3,5	4,5
CV	47,0	14,1	11,2	11,0	12,0	0,4	83,7
Rango	23,9 - 128,7	19,9 - 35,1	14,5 - 21,6	17,2 - 27,7	55 - 98,0	995 - 1008,5	0 - 12,9
Anomalía	43,0*	-2,3*	1,5*	-0,3	16,0*	-3,0*	-3,9*
Media ma2	0,7	31,2	16,4	23,8	59,4	1007,0	11,1
D.E.	2,9	1,8	1,5	1,2	7,4	3,5	3,3
CV	397,2	5,7	9,2	4,9	12,5	0,4	30,1
Rango	0 - 20,3	27,2 - 35,7	11,6 - 20,2	21,4 - 26,6	40 - 75,0	998,5 - 1015,7	0 - 13,4
Anomalía	-3,4*	1,3*	-1,1*	0,1	-10,4*	1,4*	1,9*
Media ma3	3,3	34,5	20,3	27,4	63,8	1002,4	9,6
D.E.	7,5	2,1	1,9	1,5	9,9	7,6	3,9
CV	229,0	6,0	9,4	5,5	15,5	0,8	40,7
Rango	0 - 35,0	29,9 - 39,9	14,8 - 26,6	22,8 - 31,4	37 - 91	942,6- 1010,6	0 - 13,6
Anomalía	-0,9	4,5*	2,9*	3,7*	-6,0*	-3,2*	0,4
Media ma4	2,2	28,7	19,0	23,9	81,7	1004,3	7,1
D.E.	4,2	2,1	1,8	1,5	7,1	3,6	4,1
CV	196,6	7,4	9,3	6,1	8,7	0,4	58,7
Rango	0 - 22,1	22,3 - 33,3	14,3 - 24	20,5 - 27,5	67 - 99,0	994,1 - 1013,8	0 - 13,4
Anomalía	-2,0*	-1,3*	1,6*	0,1	11,8*	-1,4*	-2,2*
Media ma5	0,9	26,2	13,6	19,9	69,9	1009,6	9,9
D.E.	3,6	2,3	2,2	1,5	10,3	3,4	4,4
CV	392,4	8,9	16,0	7,7	14,8	0,3	44,5
Rango	0 - 24,3	20 - 30,9	5,6 - 18,0	15,9 - 22,5	45 - 96,0	1000,9 - 1019,6	0 - 13,4
Anomalía	-3,3*	-3,8*	-3,9*	-3,8*	0,0	4,0*	0,6

A fin de identificar si las categorías de masas de aire encontradas son estadísticamente diferentes se realizó el Test Kruskal-Wallis al 5% a cada variable, para todas las posibles combinaciones de pares de diferentes tipos de masas de aire.

De este análisis se puede observar que en cuanto a la variable PP la ma1 se diferencia de las otras 4 masas; la ma2 y ma5 no difieren estadísticamente entre sí pero si difieren de la ma3 y ma4.

En la variable Tmax, la ma1 y ma4 no difieren estadísticamente entre sí, el resto de las masas de aire si presentan diferencias estadísticas; similar situación se da en Tmin. En cuanto a Tmed, la ma1, ma2 y ma4 no presentan diferencias estadísticas.

Si se observa la HRm, la ma1 y ma4 son similares estadísticamente y en el resto de las masas de aire son distintas. La ma1, ma3 y ma4 no presentan diferencias estadísticas en cuanto a la variable Patm. Si analizamos la Hef la ma2 se diferencia de las 4 masas de aire. La ma1 y ma3 son similares y se diferencian a su vez de la ma4 y ma5 (que estas últimas no presentan diferencias significativas)

Tabla 8: Análisis estadístico: Prueba Kruskal-Wallis.
Ref.: Letras distintas significan diferencias significativas (5%) entre masas de aire

	Precipitación (mm)	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Media (°C)	Humedad relativa (%)	Presión Atmosférica (HPa)	Heliofanía (hs)
ma1	a	a	a	a	a	a	a
ma2	b	b	b	a	b	b	b
ma3	c	c	c	b	c	a	c
ma4	c	a	a	a	a	a	a
ma5	b	d	d	c	d	c	c

Este número de agrupamientos de masas de aire, 5 grupos, es el que representa en un conglomerado específico a las masas de aire con las mayores anomalías positivas en las PP. Esta característica no se diferenciaba con un menor número de masas de aire.

Se observa que entre dos tipos diferentes de masas de aire detectadas en este trabajo, al menos cinco variables presentan diferencias significativas al 5%, con la excepción de la combinación m1 - m4 que solo presentan diferencias en la variable PP. Dado que esta variable es fundamental en el análisis se puede concluir que estos cinco grupos de masas son estadísticamente diferentes, si bien las diferencias no son tan acentuadas como en las masas de aire encontradas en el PC1; esto es consecuencia del mayor número de tipos de masas de aire determinadas.

Luego de este análisis a estas masas de aire se las llamará a la ma1 como masa templada húmeda con PP (mTHP); a la ma2: masa templada seca (mTS); ma3: masa cálida seca (mCS); ma4: masa templada con elevada humedad relativa sin PP (mTHsP), cabe destacar que en esta masa de aire puede ocurrir días con PP pero de menor cantidad que la mTHP y por último, la ma5: masa fría seca (mFS).

Del total de días analizados en este periodo, 1992-2014, el 25% de los días presentan la mTHsP, el 24% la mTS, las mCS y mFS se presentan en un 23% respectivamente y el 5% restantes de los días son caracterizados como mTHP.

Se observa, al igual que en el PC de noviembre, un predominio de masas de aire secas (Figura 4). De este análisis se destaca que el 70% de los días presentaron masas de aire secas. Si consideramos a la mTHsP como una masa de aire seca por tener valores de PP del mismo orden que mTS, mCS y mFS, este porcentaje se eleva al 95% de días con masas de aire secas.

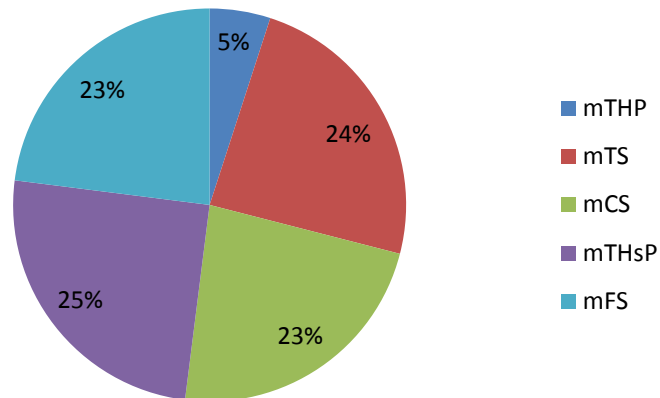


Figura 4: Porcentaje de días con las distintas masas de aire en el PC2. 1992-2014

A partir del análisis de los terciles de las DHPC2, en la Figura 5 se observa que de las 22 campañas, 2 no presentan DH, 7 manifiestan DHL (menores a 22 mm), 6 exhiben DHM (entre 22 y 58 mm) y el resto (7 campañas) presenta DHS (mayores o iguales a 58 mm). Por lo que se puede concluir que el 90% de las campañas presentan algún grado de DH, y dentro de este porcentaje, el 35% corresponde a DHS.

Las campañas que presentan DHS, se presentan en la Tabla 9, la campaña 2005/06 presenta el mayor valor de DH seguida por la campañas 2008/09 y 2013/14, en contraposición, la campaña 1995/95 es la que presenta el menor valor de DHS.

En los análisis siguientes, se incorpora la campaña 1996/97. Si bien la DH que presenta en este PC2 es moderada (46mm), en el PC1 su DH es severa y su Rst es negativo.

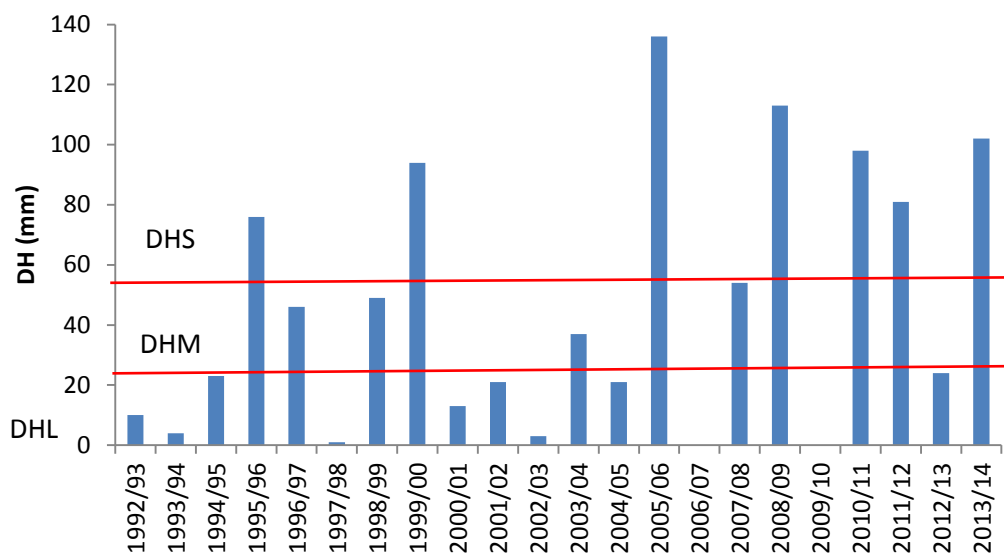


Figura 5: Deficiencias Hídricas en periodo crítico 2° y 3° década de diciembre -1° década de enero. Campañas 1992-2014. Ref.: DHL: Deficiencias hídricas leves, DHM: Deficiencias hídricas moderadas, DHS: Deficiencias hídricas severas

Tabla 9: Deficiencias hídricas severas (DHS) en el periodo 2° y 3° década de diciembre-1° década de enero. 1992-2014. Ref.: valor resaltado corresponde al máximo valor obtenido.

Campañas	DHS (mm)
1995/96	76
1999/00	94
2005/06	136
2008/09	113
2010/11	98
2011/12	81
2013/14	102

Los Rst de estas campañas con DHS se presentan en la Tabla 10, donde se observa que las campañas 2005/06 y 2008/09 presentan las mayores DHS y los menores Rst, por lo que las DH en este PC habrían afectado el rendimiento del cultivo.

La campaña 2011/12, presenta DHS, pero su Rst es positivo por lo tanto no se la considera en el análisis ya que su rendimiento es mayor al esperado para esa campaña.

Tabla 10: Rendimiento sin tendencia (Rst) y las deficiencias hídricas severas (DHS) de las 8 campañas con esta última característica.

Campañas	Rst (kg.ha⁻¹)	DHS (mm)
1995/96	-163	76
1996/97	-1860	48
1999/00	-1628	94
2005/06	-2201	136
2008/09	-3527	113
2010/11	-54	98
2011/12	40	81
2013/14	-365	102

La campaña 1996/97 (Tabla 10), no presenta DHS en este período, pero su Rst es el tercero más bajo, esto se puede relacionar con que en el desarrollo del ciclo productivo todas las décadas analizadas presenta DH ya sean leves, moderadas o severas, con la excepción de la 1° década de octubre y 1° década de noviembre, que no presentan DH (Figura 6). Las DH en el mes de septiembre crea un escenario poco favorable para la implantación del cultivo ya que las condiciones edafo-ambientales no son las óptimas. Durante el período que abarca desde la 2° década de noviembre a marzo se presentan DH en distintos niveles, por lo que desde el PC1 hasta madurez fisiológica, transcurre en situaciones de limitaciones hídricas. Desde septiembre a marzo se registra una DH de 358 mm, esta deficiencia se manifiesta en la reducción de la producción de este cereal.

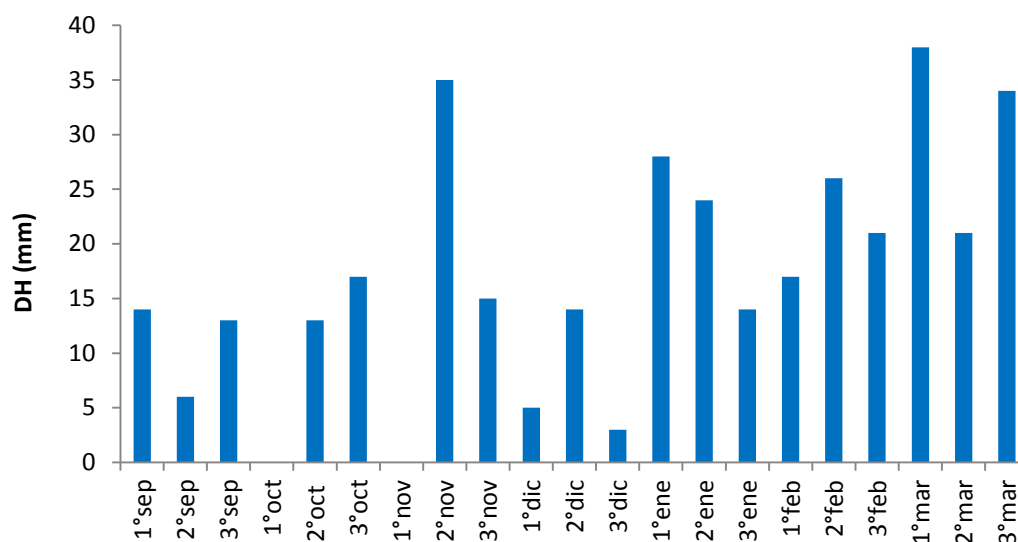


Figura 6: Deficiencias hídricas decádicas durante el ciclo del cultivo de maíz, Campaña 1996/97

Dentro de estas campañas con DHS, se analizó la presencia de las distintas masas de aire, resultando que en el 72% de las campañas hay un marcado predominio de la mTS, y en el 28% restante predomina la mCS (Tabla 11).

La mTS, en las campañas donde es predominante, varía entre un 39 y 65% de días con esta masa de aire, siendo la campaña 2008/09 la que presenta mayor presencia de dicha masa de aire.

La mCS, solo predomina en 2 campañas y su presencia en PC2 varía entre un 35% en 1996/97 y 71% en la campaña 2013/14.

La mTHP es la menos frecuente ya que solo en 2 campañas se presenta con 1 día en cada una y en el resto es nula. Cabe recordar que esta masa de aire está caracterizada principalmente por presentar los días con mayores precipitaciones.

La mTHsP y la mFS se presentan en una situación intermedia con un promedio del 16% y 10% de días respectivamente, en cada campaña. El ciclo productivo 1996/97 se caracteriza por presentar el 32% de los días con mTHsP.

Tabla 11. Días con las distintas masas de aire en campañas con deficiencias hídricas severas en PC2 y Rst negativos. Ref.: máximos valores en negrita

Campaña	mTHP	mTS	mCS	mTHsP	mFS
1995/96	0	12	11	7	1
1996/97	1	5	11	10	4
1999/00	1	14	7	8	1
2005/06	0	14	11	1	5
2008/09	0	20	3	3	5
2010/11	0	13	10	4	4
2013/14	0	3	22	4	2

En la Tabla 12a y 12b se presenta la secuencia y duración de las masas de aire detectadas en este PC2, la campaña 2006/07 es la que presenta la máxima duración de la mTS (masa de aire 2 en la tabla), con un total de 11 días consecutivos, en las otras campañas donde predomina esta masa de aire varía entre 6 y 8 días. La mCS, masa de aire 3 en la tabla, manifiesta su máxima duración, con un total de 19 días, en la campaña 2013/14. En las campañas 1996/97 y 2010/11 esta masa de aire persistió como máximo 7 días consecutivos en cada PC.

En las campañas con DHS durante PC2, asociado a la etapa de floración e inicio de llenado de granos, las masas de aire predominantes son las masas de aire cálidas secas seguidas por masas secas pero templadas.

Tabla 12a: Secuencia y persistencia de las distintas masas de aire presentes en el PC2, en las campañas con DHS del período 1992-20014.

Ref. 1: mTHP; 2: mTS; 3: mCS; 4: mTHsP; 5: mFS. S: secuencia, P: persistencia

PC	S	P	PC	S	P	PC	S	P
11/12/1995	2		11/12/1996	5		11/12/1999	1	
12/12/1995	2		12/12/1996	5		12/12/1999	4	
13/12/1995	3		13/12/1996	5	3	13/12/1999	4	
14/12/1995	2		14/12/1996	2		14/12/1999	2	
15/12/1995	2		15/12/1996	3		15/12/1999	2	
16/12/1995	3		16/12/1996	4		16/12/1999	2	3
17/12/1995	3		17/12/1996	5		17/12/1999	3	
18/12/1995	3		18/12/1996	3		18/12/1999	4	
19/12/1995	3		19/12/1996	4		19/12/1999	2	
20/12/1995	3	5	20/12/1996	2		20/12/1999	2	
21/12/1995	4		21/12/1996	4		21/12/1999	2	
22/12/1995	5		22/12/1996	2		22/12/1999	2	
23/12/1995	4		23/12/1996	2	2	23/12/1999	5	
24/12/1995	4		24/12/1996	3		24/12/1999	2	6
25/12/1995	4		25/12/1996	1		25/12/1999	3	
26/12/1995	4	6	26/12/1996	4		26/12/1999	3	
27/12/1995	2		27/12/1996	3		27/12/1999	4	
28/12/1995	2		28/12/1996	4		28/12/1999	4	
29/12/1995	2		29/12/1996	3		29/12/1999	4	
30/12/1995	2		30/12/1996	3	7	30/12/1999	2	
31/12/1995	3		31/12/1996	4		31/12/1999	2	
01/01/1996	2	6	01/01/1997	4		01/01/2000	2	
02/01/1996	3		02/01/1997	4	3	02/01/2000	2	
03/01/1996	3		03/01/1997	3		03/01/2000	2	
04/01/1996	4		04/01/1997	3		04/01/2000	2	6
05/01/1996	2		05/01/1997	3		05/01/2000	3	
06/01/1996	2		06/01/1997	3	4	06/01/2000	3	
07/01/1996	2	3	07/01/1997	4		07/01/2000	3	
08/01/1996	3		08/01/1997	4		08/01/2000	4	
09/01/1996	4		09/01/1997	2		09/01/2000	3	
10/01/1996	3		10/01/1997	3		10/01/2000	4	

Tabla 12b: Secuencia (S) y persistencia (P) de las distintas masas de aire presentes en el PC2, en las campañas con DHS 1992-20014. Ref. 1: mTHP; 2: mTS; 3: mCS; 4: mTHsP; 5: mFS. S: secuencia, P: persistencia

	S	P		S	P		S	P		S	P
11/12/2005	5		11/12/2008	2		11/12/2010	4		11/12/2013	5	
12/12/2005	5		12/12/2008	2		12/12/2010	5		12/12/2013	2	
13/12/2005	2		13/12/2008	2		13/12/2010	5		13/12/2013	2	
14/12/2005	2		14/12/2008	2		14/12/2010	2		14/12/2013	3	
15/12/2005	2		15/12/2008	2		15/12/2010	2		15/12/2013	3	
16/12/2005	4		16/12/2008	2		16/12/2010	2		16/12/2013	3	
17/12/2005	2		17/12/2008	2		17/12/2010	3		17/12/2013	3	
18/12/2005	3		18/12/2008	2	8	18/12/2010	4		18/12/2013	3	
19/12/2005	5		19/12/2008	3		19/12/2010	5		19/12/2013	3	
20/12/2005	2		20/12/2008	3		20/12/2010	2		20/12/2013	3	
21/12/2005	2		21/12/2008	4		21/12/2010	2		21/12/2013	3	
22/12/2005	3		22/12/2008	5		22/12/2010	3		22/12/2013	3	
23/12/2005	2	11	23/12/2008	4		23/12/2010	3		23/12/2013	3	
24/12/2005	5		24/12/2008	2		24/12/2010	3		24/12/2013	3	
25/12/2005	5		25/12/2008	3		25/12/2010	2		25/12/2013	3	
26/12/2005	3		26/12/2008	2		26/12/2010	3		26/12/2013	3	
27/12/2005	3		27/12/2008	4		27/12/2010	3		27/12/2013	4	
28/12/2005	2		28/12/2008	2		28/12/2010	3	7	28/12/2013	3	
29/12/2005	3		29/12/2008	2		29/12/2010	2		29/12/2013	3	
30/12/2005	2		30/12/2008	2		30/12/2010	2		30/12/2013	3	
31/12/2005	2		31/12/2008	2	8	31/12/2010	2		31/12/2013	4	
01/01/2006	2		01/01/2009	5		01/01/2011	3		01/01/2014	3	19
02/01/2006	2		02/01/2009	5		02/01/2011	2		02/01/2014	4	
03/01/2006	3		03/01/2009	5		03/01/2011	3		03/01/2014	5	
04/01/2006	2		04/01/2009	2		04/01/2011	4		04/01/2014	2	
05/01/2006	2	9	05/01/2009	2		05/01/2011	4		05/01/2014	3	
06/01/2006	3		06/01/2009	2		06/01/2011	2		06/01/2014	3	
07/01/2006	3		07/01/2009	5		07/01/2011	2		07/01/2014	3	
08/01/2006	3		08/01/2009	2		08/01/2011	3		08/01/2014	4	
09/01/2006	3		09/01/2009	2		09/01/2011	2		09/01/2014	3	
10/01/2006	3		10/01/2009	2	7	10/01/2011	5		10/01/2014	3	6

Las campañas 1995/96, 2010/11, 2011/12 y 2013/14 presentaron en alguno de los PC DHS pero sus rendimientos no se vieron afectados en igual magnitud que las campañas estudiadas en este trabajo. Según resultados de ensayos e informes publicados, para la campaña 1996/1996, esto podría deberse a que en el año 1995 se registraron muy bajas temperaturas mínimas, las cuales fueron inferiores a la temperatura base del cultivo en el periodo comprendido entre el 15 y el 28 de septiembre lo que provocó el retraso de la emergencia de las plántulas del cultivo (Milera et al., 2005), y por lo tanto el corrimiento del ciclo del cultivo y en particular del PC.

Para la campaña 2010/2011, las lluvias de octubre, noviembre y diciembre de 2010 se mantuvieron siempre por debajo de la media histórica; las precipitaciones de enero y febrero permitieron que el llenado de granos se realice con buena humedad y que los lotes sembrados tardíamente pudieran tener buena humedad en los meses de mayor demanda del cultivo. Las temperaturas máximas elevadas y las mínimas bajas de diciembre favorecieron el desarrollo del maíz. Estas condiciones beneficiaron a los rindes (Albrecht et al., 2011).

Las precipitaciones ocurridas durante la campaña 2011/12 no se ajustaron a los promedios históricos para esta zona; durante el período crítico las lluvias fueron escasas, puntualmente durante el mes de diciembre y primeros días de enero, coincidiendo con altas temperaturas, lo que ocasionó que muchos híbridos no expresen su potencial de rendimiento. La presencia de napa freática en la zona de exploración de las raíces en los lotes de producción del departamento permitió mitigar los efectos del stress (Cimadomo et al., 2012).

En la campaña 2013/14, la falta de precipitaciones que se produjo al inicio de la campaña impidió que se sembrara en la época habitual de siembra para esta zona, obligando a realizarla los primeros días de diciembre; la buena disponibilidad de agua en la etapa de floración y llenado de grano, y temperaturas favorables, permitieron que los híbridos completaran su ciclo normalmente, contribuyeron a que los materiales sembrados expresaran su potencial de rendimiento, obteniéndose excelentes rendimientos (Romero et al., 2014).

La Bolsa de Cereales y Productos de Bahía Blanca (2014) informó que: el adverso clima que acompañó la campaña 2013-14 de maíz en el sudoeste bonaerense podría haber resultado en rendimientos aún menores. El factor que limitó las pérdidas productivas fue el manejo agronómico aplicado por los productores de la región, como por ejemplo el atraso en la fecha de implantación, bajas densidades de siembra y elección de híbridos.

III.3. Patrones sinópticos

Retomando el resultado encontrado en el capítulo II respecto a cuáles fueron las campañas con una disminución del R severa (1983/84 (26%), 1999/00 (27%), 2005/06 (30%), 1996/97 (33%), 1989/90 (39%), 1982/83 (43%), 2008/09 (44%), 1988/89 (54%), 1975/76 (56%)), se seleccionaron las correspondientes al período analizado en este capítulo (1992-2014) con el fin de analizar los patrones sinópticos asociados a DHS en los dos PC o en algunos de ellos pero que incidan de tal forma en el rendimiento que su disminución sea significativa. De estas 9 campañas las seleccionadas son: 1999/00 (27%), 2005/06 (30%), 1996/97 (33%) y 2008/09 (44%). No se analiza la circulación asociada a las otras tres campañas con DHS (1995/96, 2010/11 y 2013/14) ya que como se determinó en el capítulo anterior la merma del R solo es menor al 4%.

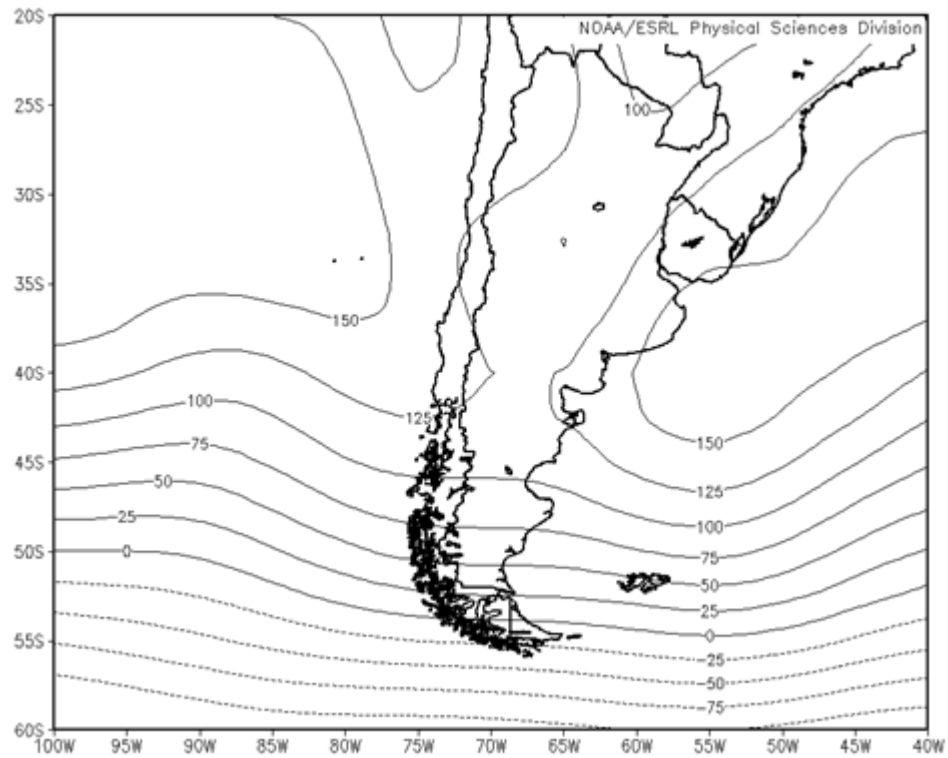
III.3.1. Patrones sinópticos asociados a mCS durante el PC1

El campo de anomalías de 1000 hPa. está caracterizado por una estructura con un dipolo entre ambos océanos, con un centro de anomalías positivas sobre el Océano Atlántico y un centro de anomalías negativas sobre el Océano Pacífico, ambos en aproximadamente 45°S. Por otro lado se destacan anomalías positivas sobre todo el país. Esta configuración intensifica el flujo de aire desde el noroeste hacia el sudeste del continente (Figuras 13 y 14).

De acuerdo al campo de circulación de 500 hPa. la región de estudio se encuentra en la parte delantera de cuña, y en el campo de anomalías de 500 hPa. se observan también dos centros de anomalías opuestos uno localizado sobre el Océano Pacífico y el otro sobre Argentina, extendiéndose hacia el Océano Atlántico, cuyos signos inducen a un flujo anómalo desde el norte. El centro de anomalías positivas sobre la Patagonia implica una disminución del flujo oeste sobre esta región (Figuras 15 y 16).

El acople de estos patrones de circulación de superficie y de la tropósfera media estarían asociados a una disminución de llegadas de frentes fríos a la Argentina y en particular a la región de la pampa húmeda, y una subsidencia sobre la zona lo cual impide el ascenso de las masas de aire. Este patrón sinóptico es inhibitorio de la precipitación, ya que la presencia de cuñas o anticiclones en la tropósfera media y superior impiden la formación de nubes y lluvia (Celemín, 1984).

Como consecuencia del flujo de aire desde el norte se observan las intensas anomalías de temperatura del aire, que llegan hasta 3°C en el centro del país. A su vez se determina una tasa diaria negativa de precipitación en el centro y norte de Argentina y sobre Uruguay (Figura 17 y 18).



**Figura 13: Campo medio de altura geopotencial de 1000 hPa. para las mCS del PC1.
Campañas: 1996/97; 1999/00; 2005/06 y 2008/09**

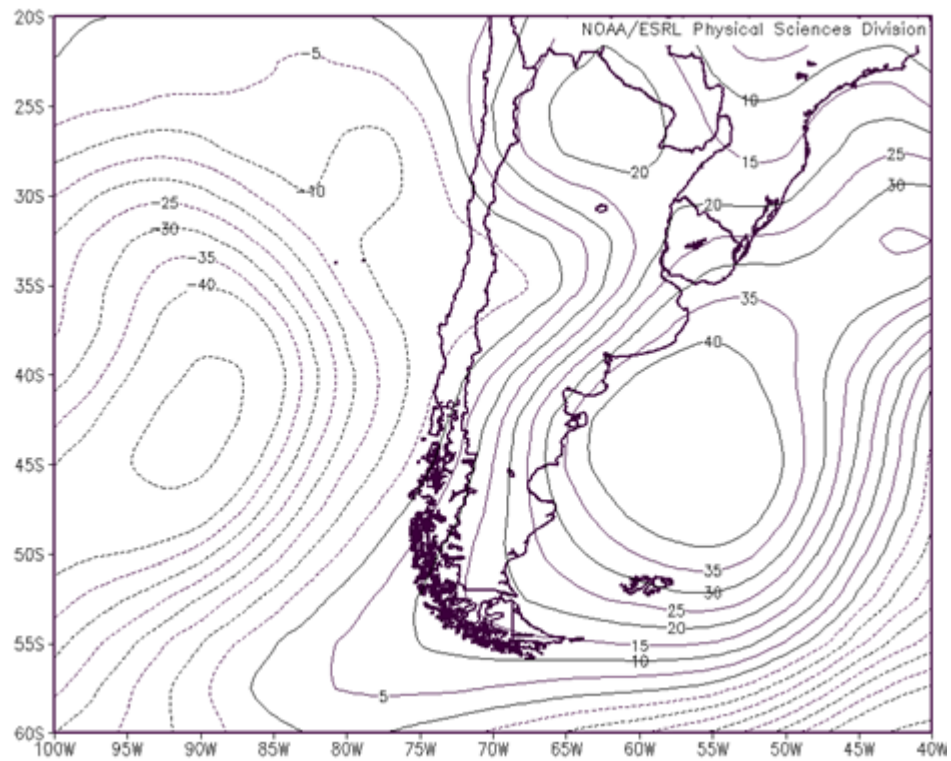


Figura 14: Campo medio de anomalías de altura geopotencial de 1000 hPa. para las mCS del PC1. Campañas: 1996/97; 1999/00; 2005/06 y 2008/09

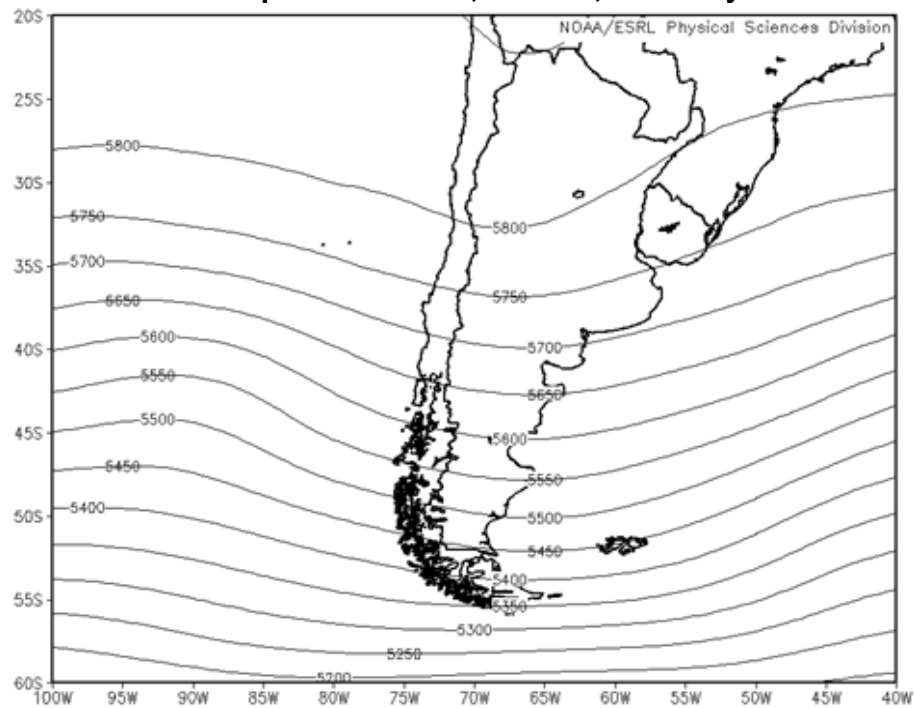


Figura 15: Idem Figura 13 en 500 hPa.

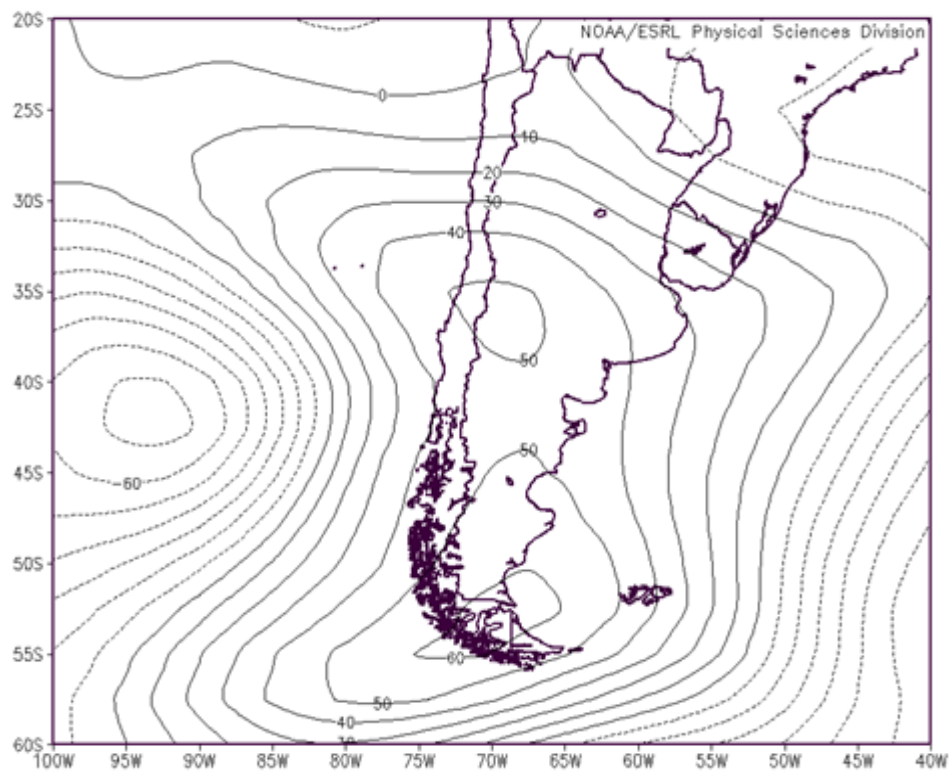


Figura 16: Idem Figura 14 en 500 hPa.

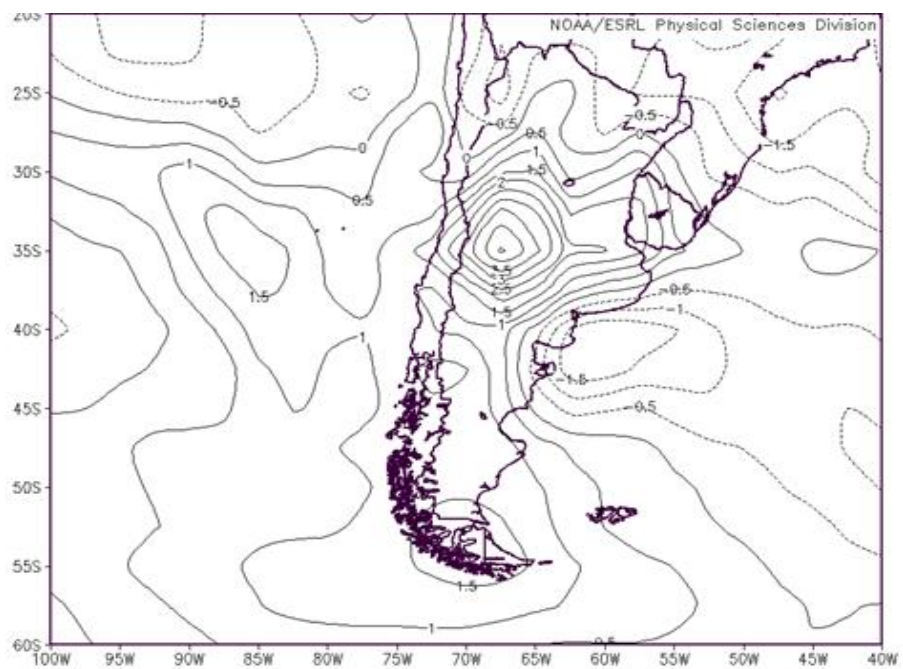


Figura 17: Campo medio de anomalías de temperatura en superficie. Campañas: 1996/97; 1999/00; 2005/06 y 2008/09

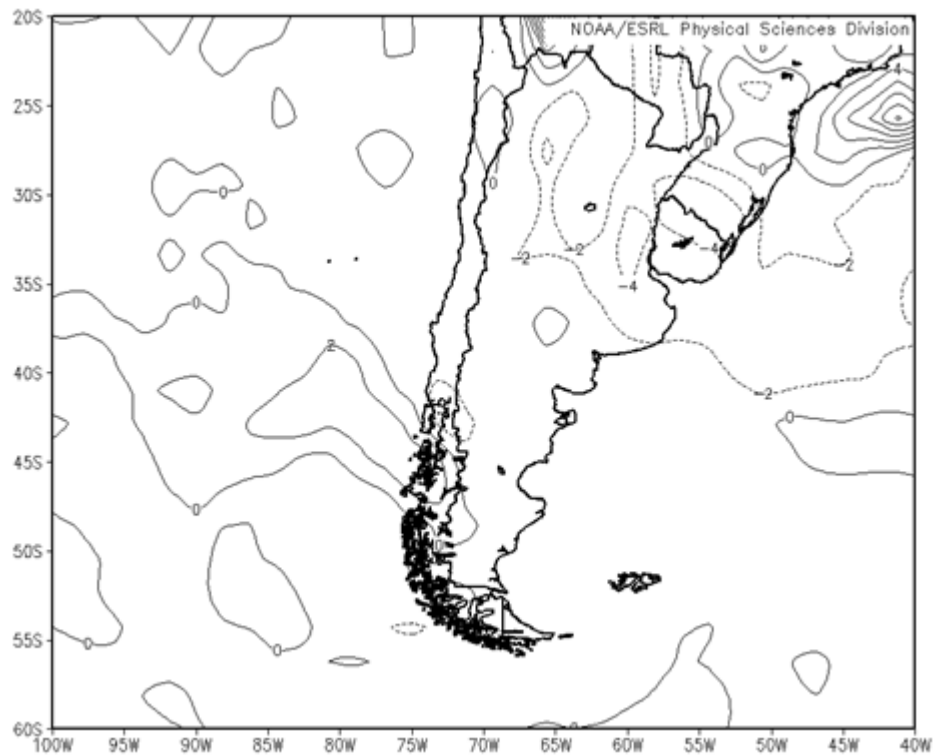
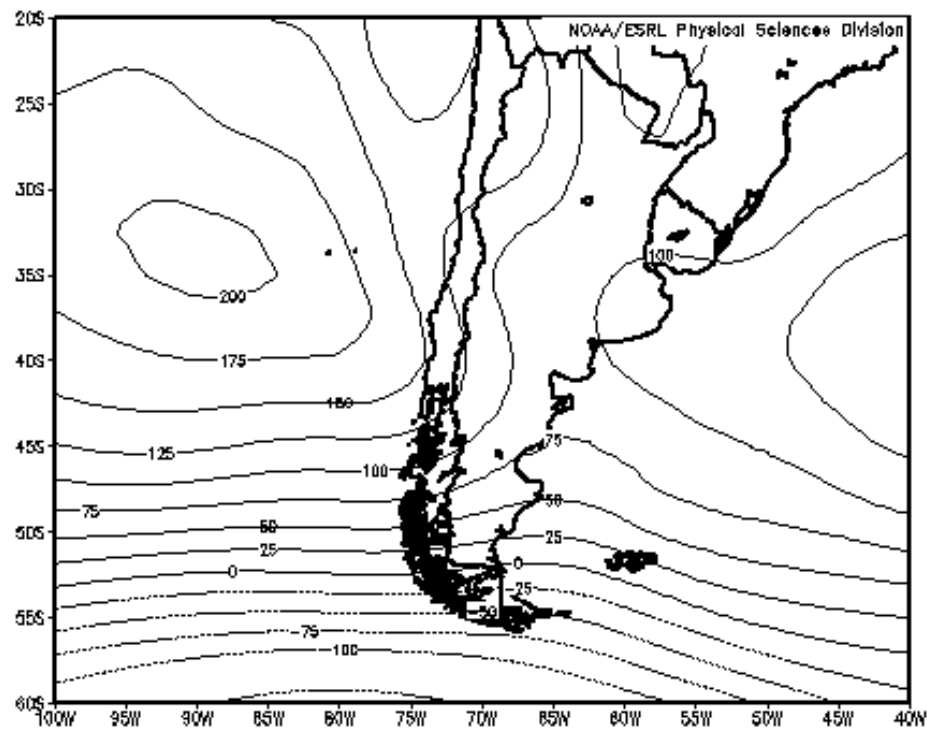


Figura 18: Campo medio de anomalías de tasa diaria de precipitación. Campañas: 1996/97; 1999/00; 2005/06 y 2008/09

III.3.2. Patrones sinópticos asociados a mTS durante el PC2

En el campo de circulación de 1000 hPa correspondiente a la mTS se observa una intensificación del anticiclón del Pacífico y un debilitamiento del anticiclón del Atlántico, respecto a lo hallado para la mCS del PC1 (Figura 19 y 20). Sin embargo prevalecen sobre el continente las anomalías positivas tanto en 1000 como en 500 hPa., dando en consecuencia una fuerte subsidencia en prácticamente todo el país (Figura 21 y 22). Si bien la advección de aire cálido desde el norte está presente en esta configuración de alturas geopotenciales, la presencia de un centro de anomalías negativas en el sur de Brasil en ambos niveles debilitan esta advección respecto a la que puede ocurrir en las mCS del PC1, dando como consecuencia masas de aire con menores temperaturas y que se reflejan en anomalías negativas de temperatura del aire (Figura 23).

Al igual que en la masa de aire anterior la zona de estudio se ubica en la parte delantera de cuña en el nivel de 500 hPa lo cual implica condiciones de buen tiempo. A su vez se determina una tasa diaria negativa de precipitación en el centro – este de Argentina (Figura 24).



**Figura 19: Campo medio de altura geopotencial de 1000 hPa. para las mTS del PC2.
Campañas: 1996/97; 1999/00; 2005/06 y 2008/09**

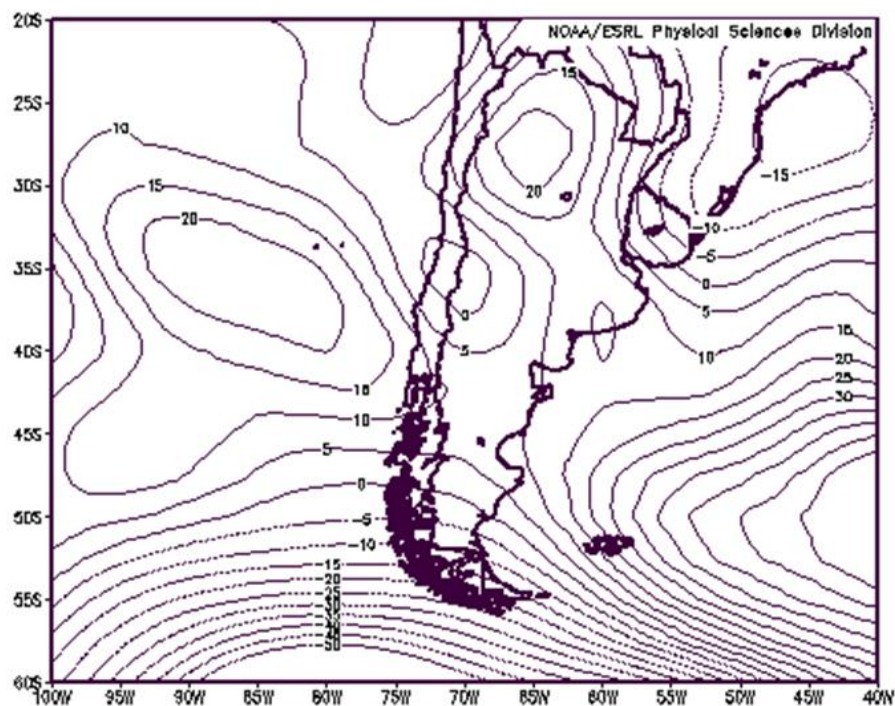


Figura 20: Campo medio de anomalías de altura geopotencial de 1000 hPa. para las mTS del PC2. Campañas: 1996/97; 1999/00; 2005/06 y 2008/09

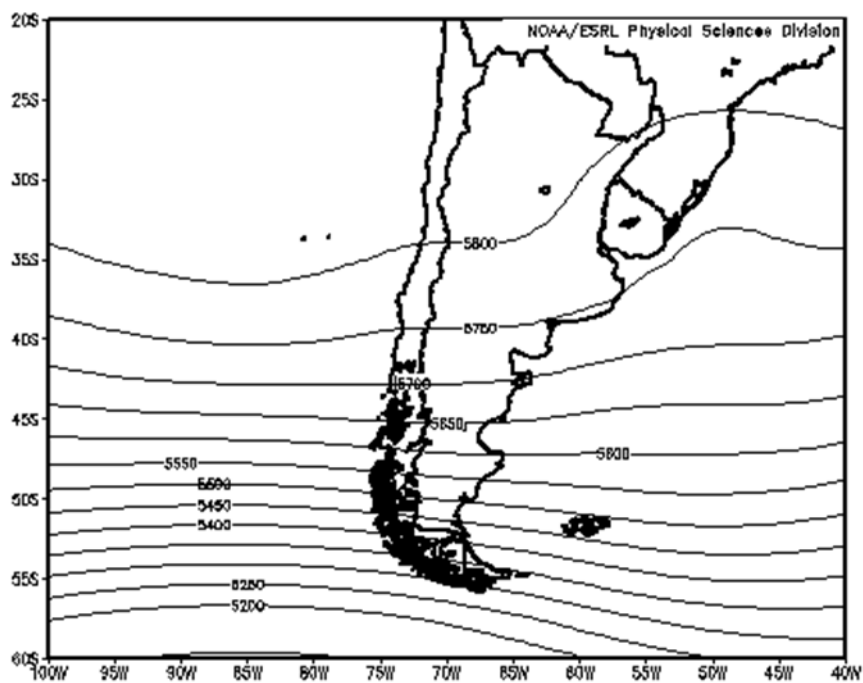


Figura 21: Idem Figura 19 en 500 hPa.

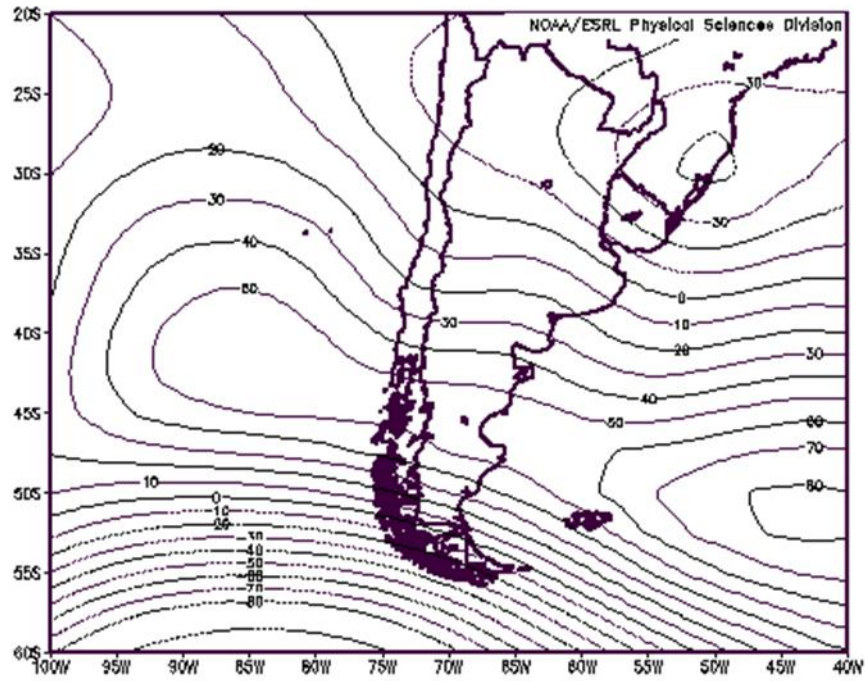


Figura 22: Idem Figura 20 en 500 hPa.

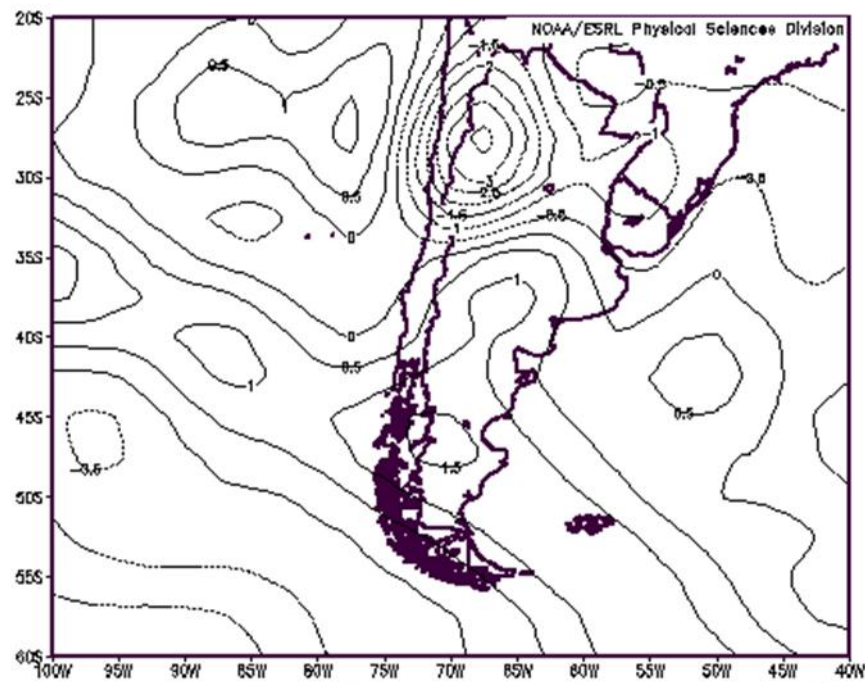


Figura 23: Campo medio de anomalías de temperatura en superficie. Campañas: 1996/97; 1999/00; 2005/06 y 2008/09

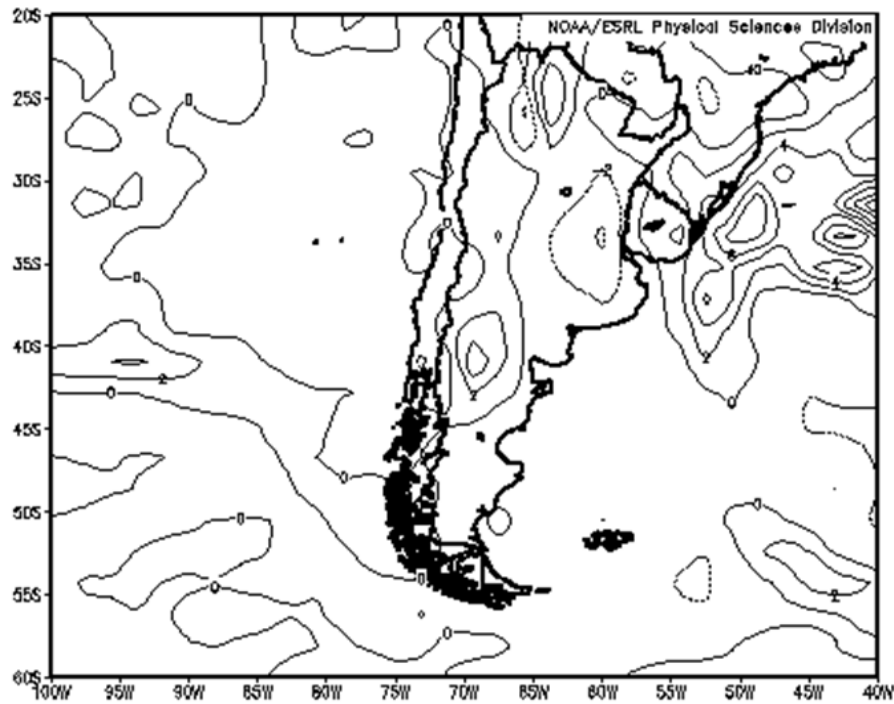


Figura 24: Campo medio de anomalías de tasa diaria de precipitación. Campañas: 1996/97; 1999/00; 2005/06 y 2008/09

III.3.2. Patrones sinópticos asociados a mCS durante el PC2

Las masas de aire mCS del PC2 presentan una variación en los campos de anomalías, ya que se observa un dipolo sobre la parte continental con anomalías positivas en el litoral y norte del país para 1000 hPa. y una mayor extensión que abarca el centro y norte de Argentina para 500 hPa. El resto del país presenta anomalías negativas de altura geopotencial en ambos niveles. La permanencia de anomalías positivas sobre la región de estudio implica la presencia de subsidencia que inhibe la precipitación (Figuras 25, 26, 27 y 28).

Se advierte que la dirección del flujo aporta bajo contenido de humedad al provenir fundamentalmente del sur, debido a las anomalías negativas de altura geopotencial, o del oeste. Este flujo del oeste está asociado a masas de aire cálidas con cielos despejados y baja o nula precipitación, dando como consecuencia un centro de anomalías positivas de temperatura del aire sobre la región de estudio y una anomalía negativa en la tasa de precipitación de -3 mm.día^{-1} (Figuras 29 y 30).

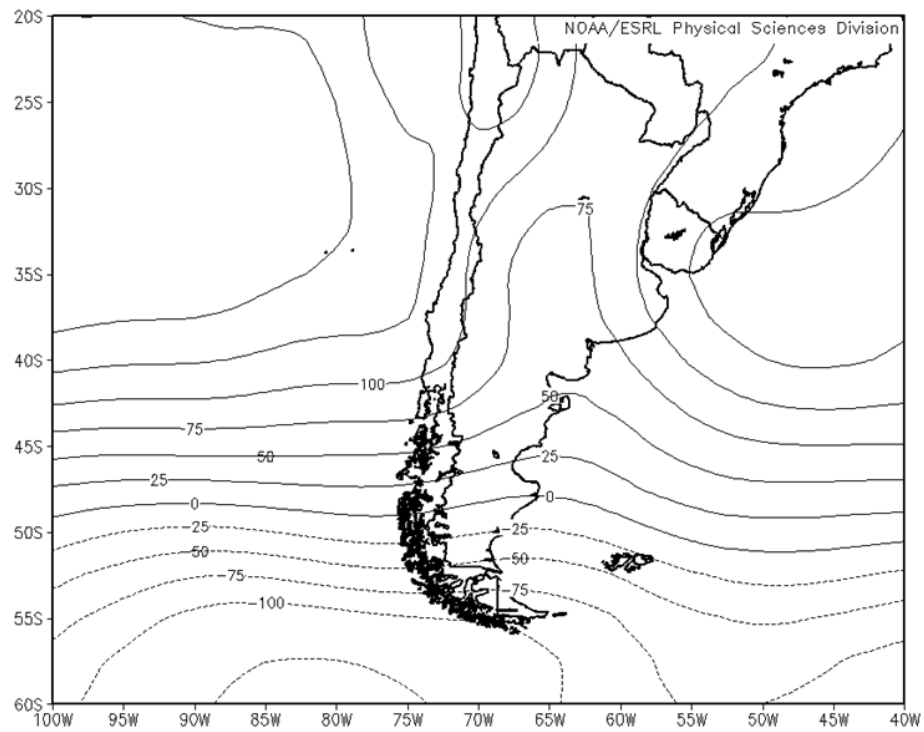


Figura 25: Campo medio de altura geopotencial de 1000 hPa. para las mCS del PC2. Campañas: 1996/97; 1999/00; 2005/06 y 2008/09

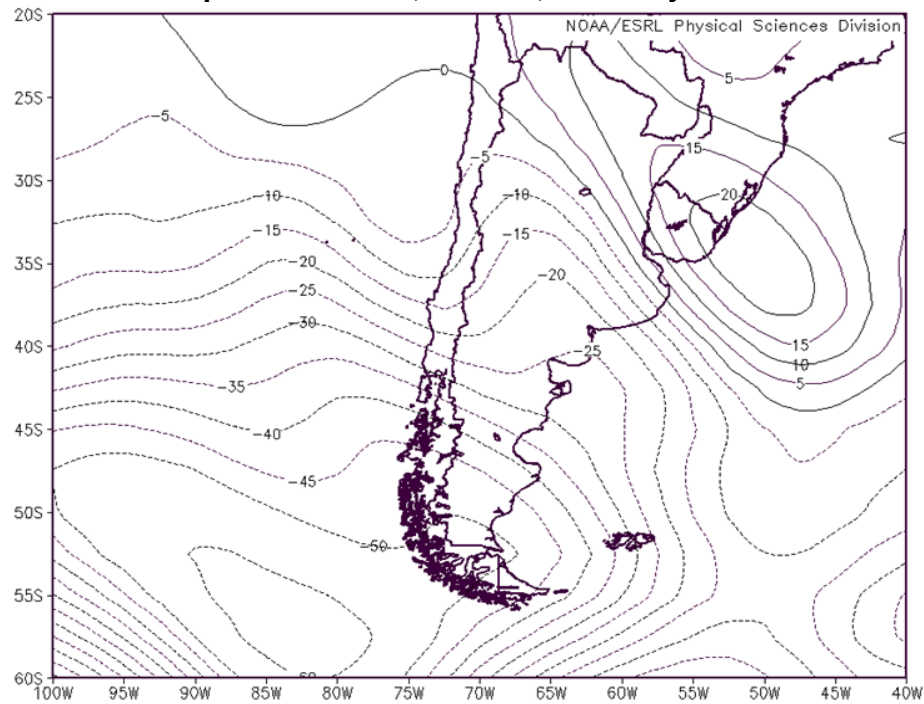


Figura 26: Campo medio de anomalías de altura geopotencial de 1000 hPa. para las mTS del PC2. Campañas: 1996/97; 1999/00; 2005/06 y 2008/09

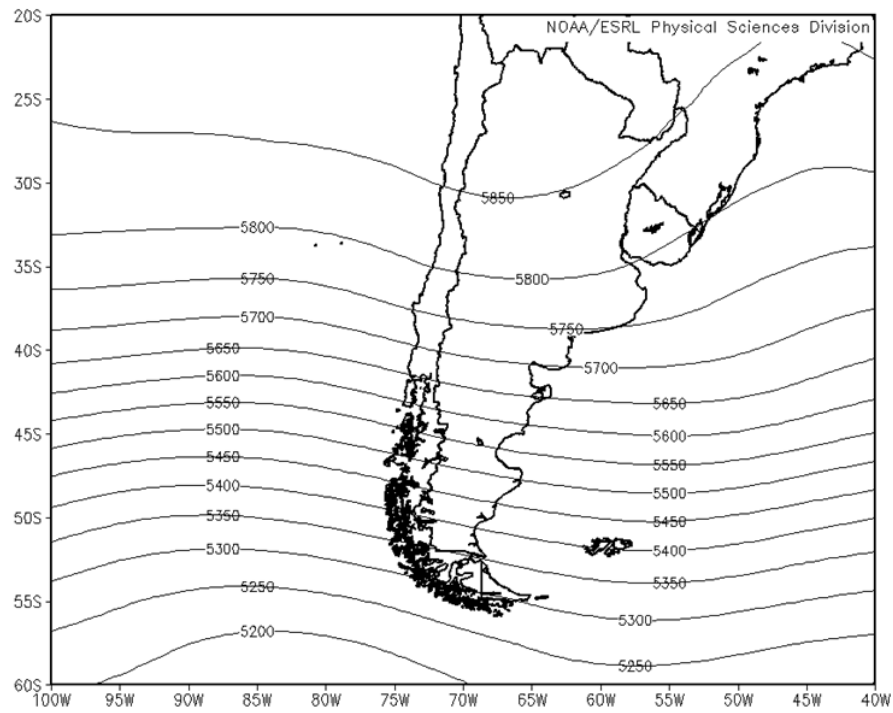


Figura 27: Idem Figura 25 en 500 hPa.

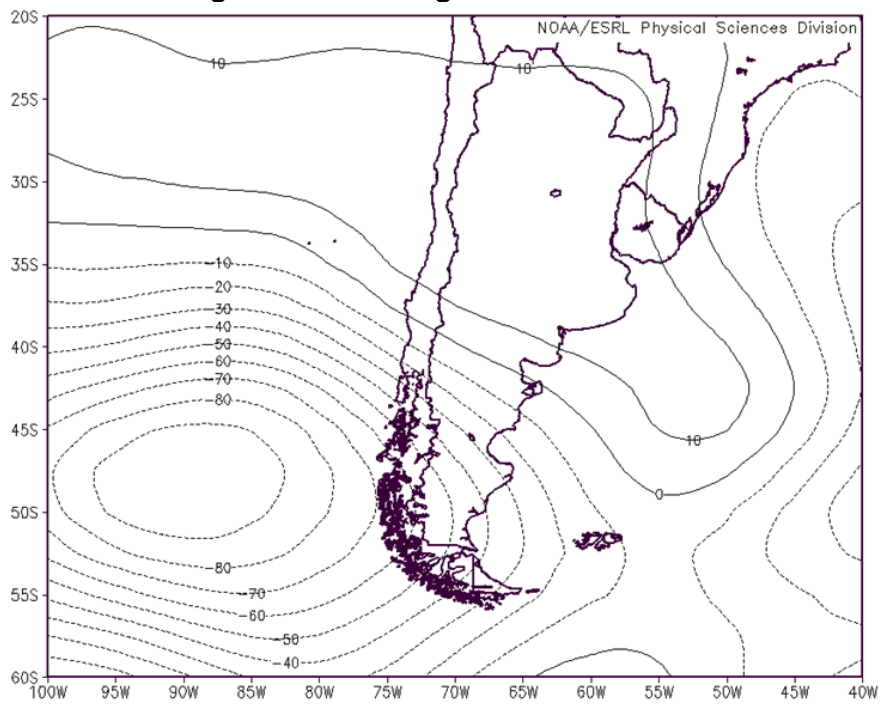


Figura 28: Idem Figura 26 en 500 hPa.

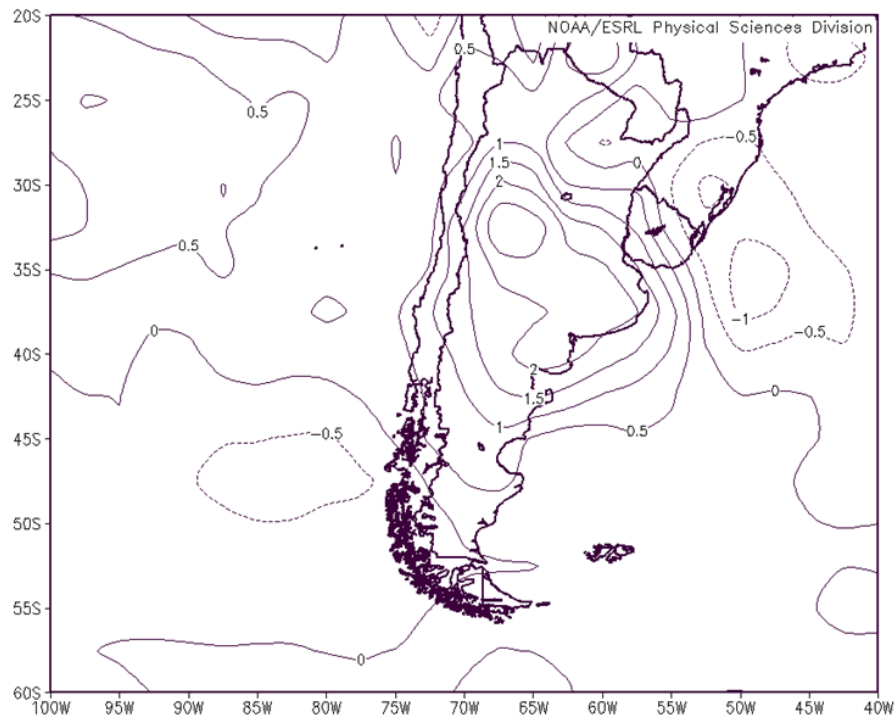


Figura 29: Campo medio de anomalías de temperatura en superficie. Campañas: 1996/97; 1999/00; 2005/06 y 2008/09

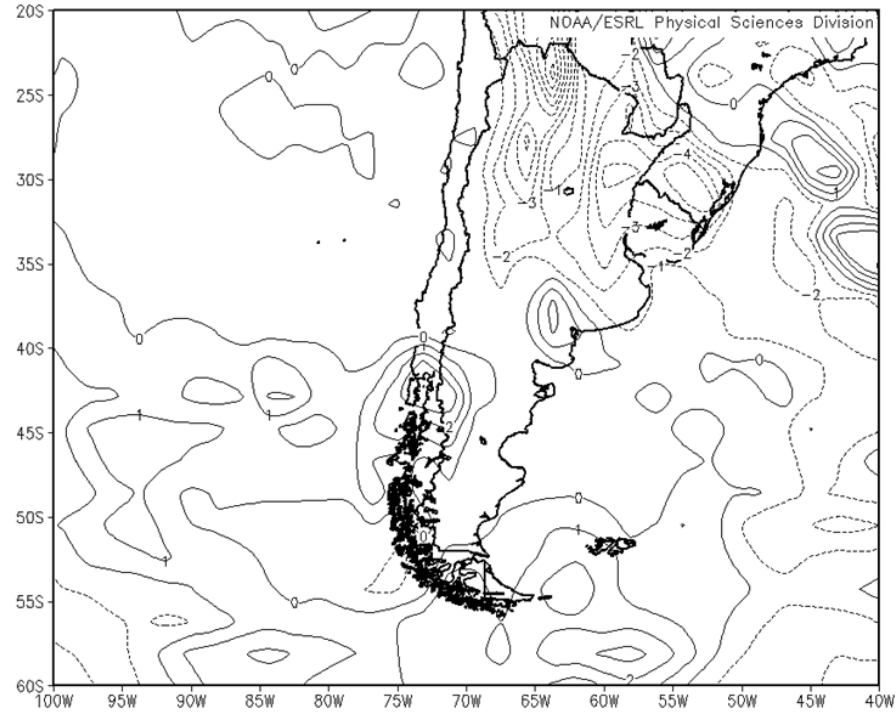


Figura 30: Campo medio de anomalías de tasa diaria de precipitación. Campañas: 1996/97; 1999/00; 2005/06 y 2008/09

III. DISCUSIÓN

De las 22 campañas correspondientes al período 1992-2014, 10 campañas, o sea un 45%, presentaron una disminución del R. De esas 10 campañas se determina que en el 60% se manifiestan DHS tanto en el PC1 como en el PC2, mientras que la campaña 1996/97 solo presenta DHS en el PC1. El 30% restante, campañas 2000/01, 2002/03 y 2012/13 presentaron mermas en el R pero no ocurrieron DHS en sus PC, si bien hay que destacar que en estos casos las disminuciones de los R corresponden a la categoría leve (menor al 4%) (Figuras 2 y 5). Por lo tanto las DH severas durante los PC encontrados están relacionadas a las disminuciones de los R del 70% de las campañas analizadas, lo cual es coincidente con los resultados hallados en el capítulo anterior respecto a la relación lineal entre Rst y las DH en los PC. De estas 7 campañas analizadas solo cuatro impactaron considerablemente en el rendimiento final, destacándose las mayores DHPC1 y/o las mayores DHPC2 (Figura 31).

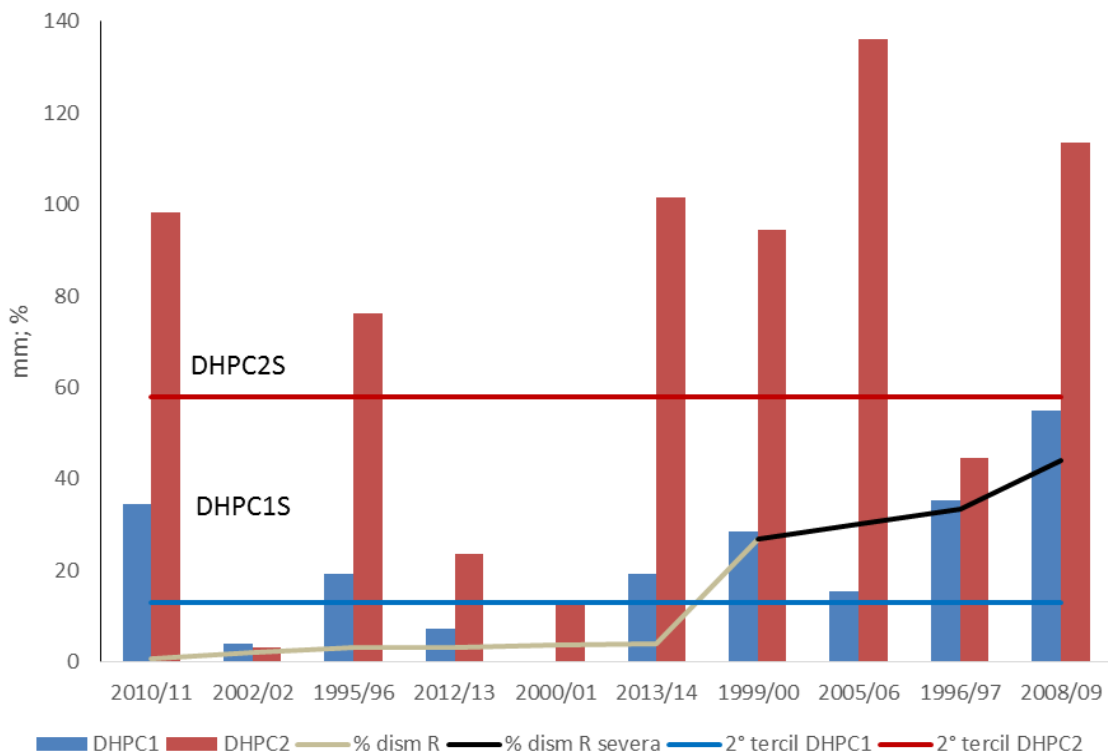


Figura 31: Porcentaje de disminución del rendimiento respecto del estimado ordenado de menor a mayor, DH del PC1 y DHPC2. Línea negra: porcentajes severos de disminución de los rendimientos observados.

Estas campañas, 1996/97; 1999/00, 2005/06 y 2008/09, se destacan por presentar en el PC1 un 60% a un 80% de días con mCS. Esta masa de aire se caracteriza por las T_{med} y $T_{máx}$ más altas, llegando a 27°C y 35°C respectivamente. Por otro lado, si bien no son las masas de aire que manifiestan las menores PP promedio diarias, la anomalía de su HRm es significativamente menor a cero, de manera que son masas de aire que combinan altas temperaturas y bajas humedades relativas.

Las condiciones térmicas asociadas a las masas de aire afectan la fenología de las plantas, ya que en años fríos el desarrollo de las fases fenológicas se atrasa mientras que en años cálidos se adelanta. La fotosíntesis es uno de los procesos más sensibles al calor, siendo disminuida significativamente en maíz a temperaturas foliares superiores a 30°C, debido a la inactivación de la enzima rubisco, hasta su casi completa inactivación a 45°C (Crafts-Brandner y Salvucci, 2002; Jull *et al.*, 1999, citados por Rincón-Tuexi *et al.*; 2006). El desarrollo del maíz depende directamente de la temperatura en la medida en que no se modifique la evolución fisiológica de las plantas por efectos de la ocurrencia de valores muy bajos o muy altos de aquella, o cambios en el fotoperíodo (Totis de Zeljkovich, 2012).

La combinación de altas temperaturas y DH causan una mayor reducción de la fotosíntesis y en consecuencia del rendimiento del cultivo, que los efectos de ambos estreses por separado (Rincón-Tuexi *et al.*; 2006).

En el PC2 la masa de aire predominante en la campaña 1996/97 es la mCS y en el resto de las campañas es la mTS. Las temperaturas de estas masas de aire son importantes de considerar ya que afectan al rendimiento del cultivo, siendo los valores máximos de las mismas 39,8°C y 35,7°C respectivamente. A su vez dichas masas de aire presentan los valores menores de HRm.

Santibáñez y Fuenzalida (1992) han determinado que las condiciones más favorables para la obtención de rendimientos elevados de maíz se obtienen en climas con alta radiación solar y temperaturas elevadas, pero no extremadamente cálidos, con una prolongada estación de crecimiento y con temperaturas diurnas entre 20 y 28° C. Las masas de aire más frecuentes en el PC1 como en PC2 se caracterizan por valores de H_{el} superiores a los valores medios, lo cual implicaría condiciones de alta radiación solar, pero se caracterizan como ya se expresó anteriormente por elevadas temperaturas principalmente en las $T_{máx}$ que normalmente ocurren durante las horas diurnas.

La ocurrencia de temperaturas altas, frecuentemente asociadas con sequías, durante las etapas de floración y llenado de granos, pueden afectar los procesos de polinización, fecundación y desarrollo del grano. Esto es consecuencia de la desecación de estigmas y/o de los granos de polen y la reducción de la tasa y/o duración del período de llenado de grano, que afectan el número y peso individual de los mismos (Bassetti y Westgate, 1993; Suzuki *et al.*, 2001; Wilhelm *et al.*, 1999). Temperaturas mayores a 35°C acompañadas con una baja humedad relativa provoca desecación de los estigmas, y temperaturas superiores a 38°C reducen la viabilidad del polen. Algunos autores sugieren que por cada grado centígrado (°C) que se incrementa la temperatura por encima del óptimo (25°C), se reduce un 3 a 4 % el rendimiento de grano (Cheikh y Jones, 2001).

Además de los valores extremos de temperatura y humedad de las masas de aire, su persistencia es otra de las características condicionantes del rendimiento. Durante las campañas con mayor impacto en el R, en el PC1 las mCS persisten hasta 9 días y en el PC2 las mTS hasta 8 días y para las mCS su duración máxima alcanza los 7 días. Según Pedrol *et al.*, (2005 y 2009) los rendimientos de maíz en la localidad de Oliveros, sur de Santa Fe, resultaron más deprimidos cuanto mayor fue el número de días con temperaturas máximas superiores a 30°C desde seis días antes hasta seis días después de R1. Cuando se acumulan días con temperaturas máximas superiores a 28° C, el período de llenado de granos se acorta y por consiguiente el rendimiento disminuye (Totis de Zeljkovich, 2012).

En las regiones con fuertes contrastes estacionales en el clima, es decir en las latitudes medias, la fenología de las plantas es impulsada por los cambios diarios en la hidrósfera y la atmósfera. Las condiciones atmosféricas en estas regiones regulan las respuestas fenológicas de las plantas que en última instancia determinan el resultado final (rendimiento y calidad) de la mayoría de los cultivos. En estas latitudes, los grandes cambios estacionales y diarios en el tiempo están relacionados con cambios en la secuencia de masas de aire procedentes de las regiones polares y subtropicales. Teniendo en cuenta el acoplamiento de las masas de aire y la circulación, el estudio de las frecuencias diarias de masas de aire y los distintos patrones de circulación que controlan sus movimientos resultan útiles en la comprensión de las variaciones anuales en la fenología y en el rendimiento y calidad final de los cultivos (Jones y Davis, 1999).

Los patrones de circulación asociados a las masas de aire que provocan DHS, muestran claramente una inhibición de las precipitaciones, ya sea por la disminución de la entrada de

frentes fríos que es el principal factor dinámico de las lluvias en la región de estudio, y/o debido a la subsidencia sobre el área analizada que impide el ascenso de las masas de aire y por lo tanto la formación de nubosidad y precipitación. Por otro lado se observa una fuerte advección de aire cálido desde el norte o noroeste en las mCS de ambos PC que provoca temperaturas superiores a lo normal. Estos patrones sinópticos son coincidentes con los hallados por Bischoff y Vargas (2003) Barrucand *et al.* (2007) y Bettolli *et al.* (2010) para situaciones de sequía, quienes analizaron la circulación asociada a extremos de precipitación y de temperatura en distintas regiones del país, a condiciones de sequía en el centro – norte de Argentina, y a la precipitación diaria en la zona núcleo de producción agrícola de nuestro país, respectivamente.

Los efectos de las masas de aire encontradas y de la circulación asociada a las mismas no tienen simplemente un efecto puntual sino que sus consecuencias son regionales. Esto puede observarse en la Figura 32 a, b, c y d donde se muestran los aumentos y disminuciones de los R de maíz para los distintos departamentos de las provincias de Santa Fe, Entre Ríos y Buenos Aires.

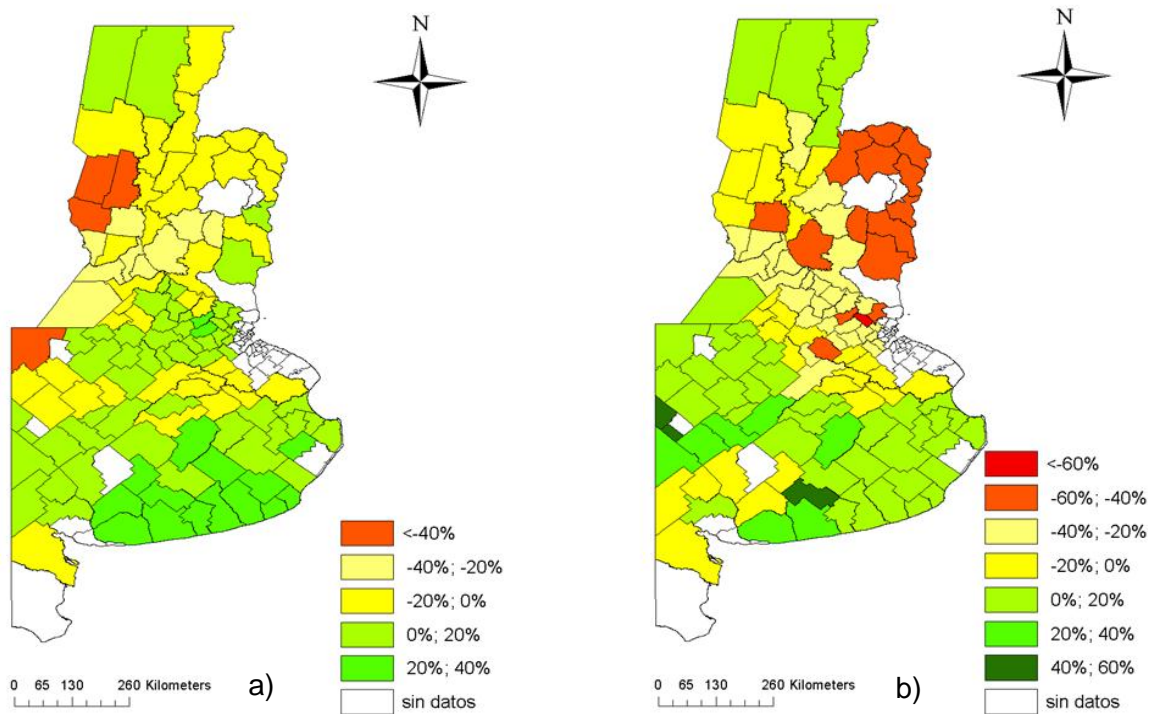
En la campaña 1996/97 en casi todos los departamentos de la provincia de Santa Fe, con la excepción de 9 de Julio y Vera se observa una disminución de los R. Igual situación se muestra en la provincia de Entre Ríos. En Buenos Aires se presenta un mayor número de departamentos con aumentos en los R respecto a las otras provincias.

En la campaña 1999/00 los departamentos que presentan disminuciones se encuentran en toda la provincia de Entre Ríos, en el centro y sur de la provincia de Santa Fe, y en el NE de la provincia de Buenos Aires. En esta campaña la disminución de los R alcanza mayores valores que en la campaña anterior.

En la campaña 2005/06 se acentúa la cantidad de departamentos que presentan disminuciones del R en la provincia de Buenos Aires. Durante el año 2005 la recarga hídrica concretada a principios de febrero, permitió mejorar aquellos maíces que – sembrados tardíamente- aún estaban en etapa vegetativa. En los más avanzados, esas lluvias llegaron tardíamente y provocaron caídas del rendimiento de hasta un 30%. En algunas zonas, los productores optaron por transformar en forraje al maíz en pie mediante el picado, lo que aumentó la proporción de área que no se destinó a la obtención de grano (Bolsa de Comercio de Rosario, 2006).

Y por último se destaca la campaña 2008/09 por presentar fuertes mermas de los R en toda la región, solo con la excepción de dos departamentos en el extremo sur de la provincia de

Buenos Aires. Según FAO (2012) la sequía ocurrida durante esta campaña produjo una merma en la producción de maíz de 8,9 millones de toneladas, un 40% menor que lo producido en la campaña anterior.



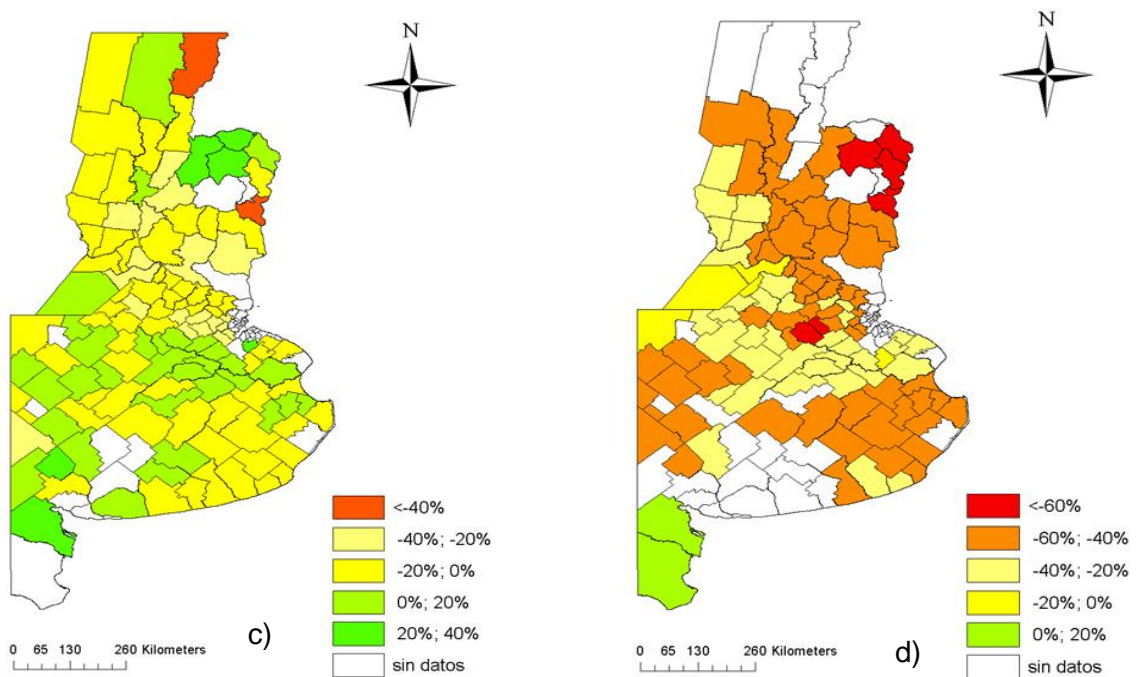


Figura 32: Disminuciones y aumentos porcentuales de los R departamentales de maíz, respecto a los Raj, en las provincias de Santa Fe, Entre Ríos y Buenos Aires. Campañas: a) 1996/97; b) 1999/00; c) 2005/06 y d) 2008/09

Los resultados encontrados muestran que las estructuras atmosféricas (masas de aire y patrones de circulación) favorecen o desfavorecen los rendimientos de maíz, ya que condicionan fuertemente la ocurrencia e intensidad de DH durante los PC del cultivo. El seguimiento de estas masas de aire durante la campaña es una herramienta adicional para el pronóstico de los rendimientos.

IV. CONCLUSIONES

Las masas de aire más frecuentes y de mayor persistencia durante ambos períodos críticos del cultivo de maíz están caracterizadas en general por condiciones de altas temperaturas, bajas humedades relativas, y en cuanto a las precipitaciones las mismas pueden ser nulas o de pocos mm. A su vez la heliofanía efectiva muestra situaciones de cielos despejados, que junto a las altas temperaturas y bajas humedades relativas favorecen la evapotranspiración del cultivo, incrementando las deficiencias hídricas. Estas condiciones ambientales afectan al crecimiento y

desarrollo del cultivo, ya que la combinación de altas temperaturas y DH causan una mayor reducción de la fotosíntesis y en consecuencia del rendimiento del cultivo.

Las condiciones predominantes de los patrones de circulación relacionados a estas masas de aire, evidencian por un lado una fuerte subsidencia sobre el centro norte del país que impide el ascenso de las masas de aire y una advección de aire cálido desde el norte y noroeste. Para las masas de aire mCS del PC1 y mTS del PC2 el patrón de anomalías positivas sobre la Patagonia impide la entrada de frentes fríos al país, y en particular su llegada a la región analizada, de manera que disminuye fuertemente el factor dinámico de las precipitaciones.

El análisis de las masas de aire y de sus campos de circulación asociados en casos de DHS presenta un alcance regional en la merma de los rendimientos de maíz, ya que se extiende a un número importante de departamentos de las provincias de Santa Fe, Entre Ríos y Buenos Aires.

Se acepta la hipótesis planteada, si bien hay que destacar que las masas de aire presentan advección de aire desde el norte, pero con bajos contenidos de humedad.

BIBLIOGRAFÍA

Aalto, T., Hatakka, J., Viisanen, Y. 2003. Influence of air mass source sector on variations in CO₂ mixing ratio at a boreal site in northern Finland. *Boreal Environmental Research*, 8, 385-393.

Abrecht, D., Carberry, P. 1993. The influence of water deficit prior to tassel initiation on maize growth, development and yield. *Field Crops Res.*, 31, 55-69.

Adame, J. y Solé, J. 2008. The application of an air masses classification to interpret ozone exceedances at Ebre Observatory (northeast Spain). *Geophysical Research (Abstract)*, 10, 2365-2365.

Albrecht, J., Ruffino, P., Meroi, G. 2011. CAMPAÑA 2010 – 2011. Gacetilla del departamento técnico AFA, 16, 2-5. Disponible en:

<http://diario.afascl.coop/afarpt/Gacetilla%20Tecnica%20AFA%20%20Agosto%202011.pdf>

Allen, R., Pereira, L., Raes, B, Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. Disponible en: http://www.engr.scu.edu/~emaurer/classes/ceng140_watres/handouts/FAO_56_Evapotranspiration.pdf.

Andrade, F.H. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crops Res.*, 41, 1-12.

Andrade, F.H., Cirilo, A.G., Uhart, S.A., Otegui M.E. 1996. *Ecofisiología del Cultivo de Maíz*. Editorial La Barrosa-EEA Balcarce, CERBAS, INTA-FCA, UNMP (Eds.). Dekalb Press. Buenos Aires. 292 p.

Avendaño-Arrazate, H.C., Molina-Galan, J., Trejo-López, C., López-Castañeda Cadena-Iñiguez, J. 2008. Respuesta a altos niveles de estrés hídrico en maíz. *Agronomía Mesoamericana*, 19(1), 27-37.

Baier, W., Robertson, G.W. 1966. A new versatile soil moisture budget. Canadian Journal Plant Sci, 46, 299-315.

Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M., Casanoves, F., Di Rienzo, J.A., Robledo, C.W. 2008. Manual del Usuario, Editorial Brujas, Córdoba, Argentina.

Barry, R.G., Perry, A.H. 1973. Synoptic Climatology: Methods and Applications. Methuen, 555 p.

Barrucand, M., Vargas, W., Rusticucci, M. 2007: Dry conditions over Argentina and the related monthly circulation patterns. Meteorology and Atmospheric Physics. DOI 10.1007/s00703-006-0232-5.

Bartolomé, M., Caputo, M. G., Celis A., Herzer, H., Rodríguez, C. 2004. El clima y otros factores de riesgo productivo en la pampa húmeda argentina. Realidad Económica, 202, Instituto Argentino de Desarrollo Económico (IADE), Buenos Aires, 88–107.

Barrucand, M, Vargas, W., Bettolli, M. 2012. Estructura térmica de meses secos y la circulación asociada en la región húmeda y semi-húmeda argentina. 7 p.

Bassetti, P., Westgate, M.E. 1993. Water deficit affects receptivity of maize silks. Crop Sci., 33, 279-282.

Bejarán, R., Camilloni, I. 2003. Objective method for classifying air masses: an application to the analysis of Buenos Aires´ (Argentina) urban heat island intensity. Theor. Appl. Climatol., 74, 93–103.

Bergeron, T.1930. Richtlinien einer dynamischen klimatologie. Meteorol. Z., 47, 246-262.

Bermúdez, D. 2012. Funciones Estadísticas con Microsoft Excel 2010. Disponible en: http://www.misapuntes.info/Funciones_Microsoft_Excel_2010/Funcion_PERCENTIL_EXC_Excel_2010.pdf

Bettolli, M.L., Penalba, O.C., Vargas, W.M. 2010. Synoptic weather types in the south of South America and their relationship to daily rainfall in the core crop-producing region in Argentina. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal*, 60, 37-48.

Bischoff, S., Vargas, W. 2003. The 500 and 1000 hpa weather type circulations and their relationship with some extreme climatic conditions over southern South America. *International Journal of Climatology*, 23, 541–556.

Bojanich, M., Baigorria, T., Lardone, A., Cazorla, C. 2010. Análisis económico del cultivo de maíz sobre vicia utilizada como cultivo de cobertura. INTA Marcos Juárez. Disponible en: http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-analisis_economico_cultivo_de_maz_sobre_vicia.pdf

Bolsa de Comercio de Rosario. 2006. Informativo semanal, 1246, 48 p. Disponible en: http://www.bcr.com.ar/Publicaciones/Informativo%20semanal/bcr2006_03_17.pdf

Bolsa de Cereales y Productos de Bahía Blanca. 2014. Maíz. Campaña Gruesa 2013-14. Estimaciones Agrícolas, 2 p. Disponible en: <http://www.acopiadores.com/sites/default/files/noticias/MAIZ%20Estimacion%20Cosecha%202013-14.pdf>

Borrás, L., Gambín, B. 2012. Resultados de la red de ensayos de maíces tardíos 2011/12, Zona Núcleo Pampeana. AAPRESID 2012, 17-22. Disponible en: http://www.aapresid.org.ar/sistemachacras/wpcontent/uploads/sites/6/2013/02/RMT12_001.pdf

Bryson, R. 1966. Air masses, streamlines and the Boreal fores. *Geogr. Bull.*, 8, 228-269.

Burgos, J., Corsi, W. 1970. Comprobación de métodos de simulación de Balances de agua computados con datos meteorológicos. *Bol. Tec.* 57 La Estanzuela, Uruguay.

Busso, A., Ausilio, A. 1989. Mapa de suelos del Campo Experimental José F. Villarino. *Publicación Técnica N° 5.* FCA-UNR.

Cakir, R. 2004. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research*, 89, 1-16.

Carcova, J., Borrás, L., Otegui, M.E. 2003. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad del maíz. En: *Producción de Granos: Bases funcionales para su manejo*. Facultad de Agronomía, UBA (ed) Bs As., Arg. 135-157.

Capurro, J., Dickie, M.J., Ninfi, D. Zazzarini, A., Fiorito, C. 2013 a). Cultivos de Cobertura en Maíz. Análisis económico de su inclusión. Siembra directa. Cultivos invernales Aapresid. 105-113.

Capurro, J., Dickie, M.J., Surjark, J., Monti, J., Ninfi, D., Zazzarini, A., Tosi, E., Andreani, J., Gonzalez, M.C. 2013 b). Cultivo de cobertura en el sur de la provincia de Santa Fe. En: *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción*, Cap. 13, 92-104.

Carvalho, M. R., Soratto, M., Athayde, O., Arf, O., de Sá, M. 2004. Produtividade do milho em sucessão a adubos verdes no sistema de plantio direto e convencional. *Pesq. Agropec. Brás.*, 39(1), 47-53.

Casas, R. 2016. El suelo: un recurso estratégico para la Argentina. INTA Informa. Disponible en: <http://intainforma.inta.gob.ar>

Cátedra de Edafología. 2015. Material de apoyo didáctico.

Celemín, A., 1984. *Meteorología Práctica*. Edición del autor. Mar del Plata. 320 p.

Cheikh, N., Jones, R.J. 1994. Disruption of maize kernel growth and development by heat stress. Role of cytokine/abscisic acid balance. *Plant Physiol*, 106, 45-51.

Christensen, W.I.Jr., Bryson, R.A. 1966. An investigation of the potential of component analysis for weather classification. *Mon. Wea. Rew.*, 94 (12), 697-709.

Cimadomo, F., Zucco, O., Giacomoni, M., Vitelli, D., Gorandi, D., Balzi, R., Gentili, O. 2012. CAMPAÑA 2011/12. Gacetilla Técnica AFA, 18, 5-7. Disponible en:

<http://diario.afascl.coop/afarpt/Gacetilla%20Tecnica%20AFA%20Septiembre%202012.pdf>

Cirilo, A. 2004. Fecha de Siembra y Rendimiento en Maíz. IDIA XXI del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 122-127.

Cirilo, A. 2012. ¿Cómo afecta al rendimiento la fecha de siembra? Disponible en <http://www.agritotal.com/0/vnc/nota.vnc?id=2386>

Cirilo, A. 2015. Maíz tardío, una elección que aporta estabilidad. INTAinforma 2015 Disponible en <http://intainforma.inta.gov.ar/?p=29979>

Coronel, A., 2001. Climatología sinóptica de las masas de aire que afectan a la República Argentina. Tesis doctoral, Dpto. Cs. De la Atmósfera y los Océanos, 184 p. Disponible en: http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_3416_Coronel.pdf

Coronel, A., Bischoff, S., Lara, M. 2006. Estructura vertical, temporal y espacial de las masas de aire extremas en la República Argentina en invierno. Meteorológica, 31(1 y 2), 37-48.

Coronel, A., Sacchi O. 2006. Climatología de eventos secos y húmedos en el sur santafesino. Rev. De Inv. De la Fac. De Cs. Agrarias (UNR), 9,15-24.

Coronel, A. y Castañeda, E. 2010. Las masas de aire que afectan el sur de la provincia de Santa Fe y su relación con la precipitación diaria en enero. Meteorológica, 35(1), 29-40.

Coronel, A., Dickie, M.J, Costanzo, M., Sacchi, O., Skindzier, N., Kehoe, F. 2011. Incidencia del cambio climático en Zavalla y sus impactos en la producción agropecuaria. Agromensajes de la facultad 32.

Coronel, A., Sacchi, O., Costanzo, M. 2012. Variabilidad climática de los componentes del balance hídrico seriado en el sur de Santa Fe. Ciencias Agronómicas, XIX, 007–011.

Crafts-Brandner, S.J., Salvucci, M.E. 2002. Sensitivity of photosynthesis in a C4 plant, maize, to heat stress. *Plant Physiol*, 129(4), 1773–1780.

Crowe, P.R. 1971. *Concepts in Climatology*. Longman, 589 p.

Damario, E.A. y J.A. Pascale. 1977. El balance hidrológico seriado y su utilización en estudios agroclimáticos. *Rev. Fac. Agron., La Plata*, 53(1-2), 15-34.

Dardanelli, J., Colino, D., Otegui, E., Sadras, O. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. En *Producción de Granos: Bases funcionales para su manejo*. Facultad de Agronomía, UBA (ed) Bs As., Arg., 377-434.

De Battista, J., Andriulo, A., Pecorari, C. 1992. El perfil cultural: un método para la evaluación de los sistemas de cultivo. *Ciencia del Suelo*, 10-11, 89-93.

Della Maggiora, A., Irigoyen, A., Malena, L., Cambareri, M.A. 2012. Deficiencias hídricas para el cultivo de maíz en el centro-sudeste bonaerense según fecha de siembra. *Anales XIV Reunión Argentina de Agrometeorología*. Malargüe, Mendoza, 45-46.

Dickie, M.J., Sacchi, O., Coronel, A. 2012. Relación entre el rendimiento de maíz y variables del balance hídrico seriado en el departamento Rosario, Santa Fe. *Anales XIV Reunión Argentina de Agrometeorología*. Malargüe, Mendoza, 85-86.

Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M., Robledo, C.W. *InfoStat versión 2011*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

Echarte, L., Della Maggiora, A.I., Irigoyen, A.I., Dosio, G. 1998. Disminución del rendimiento en el cultivo de maíz debido a los déficits hídricos ocurridos en la localidad de Balcarce. X Congreso Brasileiro de Meteorología y VIII Cong. de la Fed. Lat e Ibérica de Soc. de Meteorología. Brasilia. Brasil.

FAO, 2010. FaoStat - Producción - Productos por región - Argentina. Disponible en: <http://faostat3.fao.org/home/index.html>

FAO, 2012. FAOSTAT data. Statistics Division. Disponible en: <http://faostat3.fao.org/home/index.html>)

Fealy, R., Sweeney, J. 2007. Identification of frequency changes in synoptic circulation types and consequences for glacier mass balance in Norway. Norsk Geografisk idsskrift _Norwegian Journal of Geography, 61, 76-91.

Fenalce (Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas) 2010. El cultivo del maíz, historia e importancia. El Cerealista, 11-19.

Fernández-Long M.E; Spescha L, Hurtado R, Murphy G., 2011. Impacto del ENOS sobre los rendimientos de maíz en la región pampeana argentina. Agriscientia 28, 31-38.

Fernández-Long, M.E., Spescha, L., Barnatán, I., Murphy, G., 2012. Modelo de balance hidrológico operativo para el agro (BHOA). REV. Facultad de Agronomía UBA, 32(1-2), 31-47.

Ferrante, D. 2011. Distribución del agua en el suelo y su relación con la estructura radical y producción de biomasa de tres tipos funcionales, en un pastizal de la Estepa Magallánica seca. Santa Cruz. Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires, Área Recursos Naturales. 84 p.

Ferraris, G. y Couretot, L. 2014. Elección de ambientes, rendimiento y fertilización de maíz según fecha de siembra. INTA EEA Pergamino. Informe técnico. 7 p.

Fischer, K.S., Palmer, F.E. 1984. Tropical maize. In P.R. Goldsworthy & N.M. Fisher (Eds.). The physiology of tropical field crops. Wiley. 213- 248.

Forjan, H. 2012. Maíz, un cultivo imprescindible en la rotación. INTA informa. Disponible en <http://intainforma.inta.gob.ar>

Forte Lay, J.A., Aiello, J.L., Kuba, J. 1995. Software AGROAGUA Versión 4.0. Congreso Agrosoft'95. Juiz de Fora (Brasil). Resumen publicado en revista Agrosoft'95. Disponible en: <http://www.agrosoft.com.br/eventos/agrosoft95/trabalhos.htm>.

Freebairn, D.M., Hamilton, N.A., Cox, P.G., Holzworth, D. 1994. HOWWET? Estimating the storage of water in your soil using rainfall records. A computer program-©. Agricultural Production Systems Research Unit, CSIRO, Toowoomba, Queensland. Disponible en: <http://www.apsim.info/How/HowWet/how%20wet.htm>

Garabatos, M. 1991. Temas de Agrometeorología, Tomo 1 y 2. (1º ed. en español). Consejo Profesional de Ingeniería agronómica. Argentina.

Giménez, L. 2012. Producción de maíz con estrés hídrico provocado en diferentes etapas de Desarrollo. Agrocienca Uruguay, 16(2), 92-102.

Greene, J., Kalkstein, L. 1996. Quantitative analysis of summer air masses in the eastern United States and an application to human mortality. *Climate Research*, 7, 43-53.

Gutiérrez, Q., Estatio, J. Varga, S., Carlos, I. 2005. Climatología sinóptica de los patrones circulatorios de la estación lluviosa venezolana en el período 1978-1999. 465 p.

Hall, A.J., Lemcoff, J.H., Trapani, N. 1981. Water stress before and during flowering in maize and its effects on yield, its components, and their determinants. *Maydica*, 26, 19-38.

Hall, A.J., Vilella, F., Trapani, N, Chimenti, C.A. 1982. The effects of water stress and genotype on the dynamics of pollen-shedding and silking in maize. *Field Crops Research*, 5, 349 - 363.

Hoffmann, J.A. 1971. Frentes, masas de aire y precipitaciones en el norte argentino. *Meteorológica*, 2(1, 2, 3), 130-149.

Holmes, R.M., Robertson., S.W. 1959. A modulated soil moisture budget. *Monthly Weather Rev.*, 87(3), 101-106.

Hurtado, R., Specha, L., Fernandez-Long, M.E., Murphy, G. M. 2003. Evaluación del ENSO como predictor de los rendimientos de maíz en la Región Pampeana (Argentina). *Rev. Fac. de Agronomía*, 23, 131-139.

Jamason, P., Kalkstein, L., Gergen, P. 1997. A Synoptic Evaluation of Asthma Hospital Admissions in New York City. *Am J Respir Crit Care Med*, 156, 1781–1788.

Jones, G., Davis, R. 1999. Using a synoptic climatological approach to understand climate–viticulture relationships. *International Journal of Climatology*, 20, 813–837.

Jull, L.G., Ranney, T.G., Blazich, F.A. 1999. Heat tolerance of selected provenances of atlantic white cedar. *J Am Soc Hort Sci*, 124, 492-497.

Kalkstein, L., Corrigan, P.I. 1986. A synoptic climatological approach for geographical analysis: assessment of sulfur dioxide concentrations. *Ann. Assoc. Am. Geogr.*, 76 (3), 381-395

Kalkstein, L., Dunne, P., Vose, R. 1990. Detection of climatic change in the western North American Arctic using a synoptic climatological approach. *J. Climate*, 3(10), 1153-1167.

Kalkstein, L.S., Nichols, M.C., Barthel, C.D., Greene, J.S. 1996. A New Spatial Synoptic Classification: Application to Air Mass Analysis. *International Journal of Climatology*, 16(8), 983-100.

Kalkstein, L., Greene, J. 1997. An Evaluation of Climate/Mortality Relationships in Large U.S. Cities and the Possible Impacts of a Climate Change. *Environmental Health Perspectives*, 105 (1), 84-93.

Kalkstein, L.S., Yarnal, B.M., Scheraga, J.D. (eds). 1998. *Regional Assessments of Climate Change and Policy Implications*, *Climate Research Special*, 11(1).

Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, B., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins,

W., Janowiak, J., Mo, K., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R., Joseph, D. 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 437–471.

Kiniry, J.R., Ritchie, J.T. 1985. Shade-sensitive interval of kernel number in maize. Agron. J., 77, 711-715.

Kruskal, W. H., Wallis, W. A. 1952. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis Journal of the American Statistical Association, 47, (260), 583-621.

Maddonni, G.A. 2012. Analysis of climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina – a probabilistic approach. Theor. Appl. Climatol., 107, 325-345.

Maizar, 2013. La cadena del maíz y las oportunidades para desarrollo en la Argentina. 137 pp. Disponible en: www.maizar.org.ar/documentos/1.argentina-final-ago.docx

Mancini, M., Coronel, A., Sacchi, O., Costanzo, M. 2006. Las heladas en Zavalla: ¿Sufrieron modificaciones en los últimos años? Agromensajes de la facultad, 20.

McGregor, G., Walters, S., Wordley, J. 1999. Daily hospital respiratory admissions and winter air mass types, Birmingham, UK. Int J Biometeorol., 43, 21–30.

Milera, S., Crotti, C. 2005. Implementación del modelo Cropsyst para la simulación del rendimiento del cultivo de maíz en una región de Argentina. 9 p. Disponible en: <http://hum.unne.edu.ar/revistas/geoweb/Geo4/archivos/milera2.pdf>

Minetti, J.L., Vargas, W.M., Vega, B., Costa, M.C. 2007. Las sequías en la Pampa Húmeda: impacto en la productividad del maíz. Revista Brasileira de Meteorologia, 22, 218-232.

Murphy y Hurtado eds. 2011. Agrometeorología. Fac. de Agronomía, UBA. 512 p.

Otegui, M.E., Bonhomme, R. 1998. Grain yield components in maize. I. Ear growth and kernel set. Field Crops Res., 56, 247-256.

Otegui, M.E., Mercau, J.; Menéndez, F. 2002. Estrategias de manejo para la producción de maíz tardío y de segunda. En Guía Dekalb del cultivo de maíz, Ed. Satorre, Dekalb, 293 p.

Paruelo, J. M., Sala, O.E..1995. Water losses in the Patagonian Steppe: a modelling approach. Ecology, 76, 510-20.

Pedrol, H., Castellarín, J., Salvagiotti, F. 2004. Importancia del maíz en la rotación de los Cultivos Sustentabilidad y Diversificación de Riesgos Productivos. Rev. IDIA XXI del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 141-146.

Pedrol, H. M., Castellarín, J. M., Rosso, O., Dignani, D. 2005. Fechas de siembra y rendimientos en maíz. Oliveros, campaña 2004 - 05. En: Para Mejorar la Producción, 29, 8-14.

Pedrol, H. M.; Castellarín, J. M., Rosso, O. 2006. Las condiciones climáticas y el cultivo de maíz en Oliveros (Dpto. Iriondo) Santa Fe. Campaña 2005 - 06. Para Mejorar la Producción, 32, 8-11.

Pedrol, H. M., Castellarín, J. M., Ferraguti, F., Rosso, O. 2009. Fechas de siembra y rendimientos de maíz en Oliveros (Santa Fe), campaña 2008 - 09. Para Mejorar la Producción, 41, 41 - 49.

Perera, E.M., Sanford, T., White-Newsome, J.L., Kalkstein, L.S., Vanos, J.K., Weir, K. 2012. Heat in the Heartland: 60 Years of Warming in the Midwest. Union of Concerned Scientists Publication Series Climate Change and Your Health. 38p.

Perrier, A. 1977. Projet de définitions concernant l'évapotranspiration on fonction de considerations théoriques et pratiques. Rapports francais présentés au colloque de la C.I.I.D., Budapest, 1977. La Météorologie (6e. serie), 11, 7-16.

Puech, J.; Hernández, M. 1973. Evapotranspiration comparée de différentes cultures et etude de quelques facteurs influencant les rithmes de consommation. Annales. Agronomiques, 24 (4), 435-437.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C, Fereres, E. 2009. AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agronomy Journal*, 101(3), 438-447.

Rasilla Álvarez, D. 2003 Aplicación de un método de clasificación sinóptica a la Península Ibérica. *Investigaciones Geográficas*, 30, 27-45.

Rincón-Tuexi, J.A., Castro-Nava, S., López-Santillán, J., Huerta, A., Trejo-López, C., Briones-Encinia, F. 2006. Temperatura alta y estrés hídrico durante la floración en poblaciones de maíz tropical, 75, 31-40.

Ritchie, J.T. y Hanway, J.J. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service, Ames, Iowa. Special Report N° 48.

Rhoads, F., Bennett, J.M. 1990. Corn. Stewart, B. A. and D. R. Nielsen (Eds). *Agronomy*, 30. Madison USA, 569-590.

Romero, R., Giuliani, D., Nafissi, G., Miranda, R., Proccacini, C. 2014. Gacetilla Técnica AFA Campaña 2013-2014, 22, 11-12. Disponible en:

<http://diario.afascl.coop/afarpt/AFA%20Web%20Gacetilla%20Gruesa%20Oct%202014.pdf>

Rossi, D. 2007 Evolución de los cultivares de maíz utilizados en la Argentina. *Agromensajes de la facultad*, 22.

Sacchi, O., Dalla Marta, N., Costanzo, M., Coronel, A. 2002. Caracterización de las precipitaciones en la zona de Zavalla. *Rev. de Inv. de la Fac. de Cs. Agrarias-UNR*, 2, 91-103.

Saini, S.H., Westgate, M.E. 2000. Reproductive development in grain crops during drought. *Advances in Agronomy*, 68, 59-96.

Santibañez, Q. F., Fuenzalida, P. 1992. Conferencia: Modelos ecofisiológicos para el análisis de los potenciales de producción del maíz. 5° Congreso Nacional de Maíz, Reunión Sudamericana. Pergamino.

Saxton, K.E., Willey, P.H. 2006. The SPAW model for agricultural field and pond hydrologic simulation. Chapter 17. In: *Mathematical Modeling of Watershed Hydrology*, V. P. Singh and D. Frevert, Editors; CRC Press, 401-435.

Schussler, J.R., Westgate, M.E. 1995. Assimilate flux determines kernel set at low water potential in maize. *Crop Science*, 35, 1074–1080.

Schwartz, W., Skeeter, P. 1994. Linking air mass analysis to daily and monthly mid-tropospheric flow pattern. *Int . Journal of Climatology*, 14, 439-464.

Secretaria de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos (SAGPyA). 2010. *Agricultura - Series y estadísticas - Maíz*. En: <http://190.220.136.179/index.php/series-por-tema/agricultura>.

Secretaria de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos (SAGPyA). 2015. *Estimaciones agrícolas*. Disponible en: www.sagpya.gov.ar

Senay, G.B. 2008. Modelling landscape evapotranspiration by integrating land surface phenology and a water balance algorithm. *Algorithms*, 1, 52-68; 10.3390/a1020052.

Sheridan, S.C., Lee, C.C., Allen, M., Kalkstein, L.S. 2012a. Future heat vulnerability in California, Part I: projecting future weather types and heat events. *Climatic Change*, 115, 291-309.

Sheridan, S.C., Allen, M., Lee, C.C., Kalkstein, L.S. 2012b. Future heat vulnerability in California, Part II: projecting future heat-related mortality. *Climatic Change*, 115, 311-326.

Sierra, E.M. y Porfido, O.D, 1980: Factores que afectan los rendimientos en la región maicera Argentina. *Rev.Fac. Agr.*, 1 (2), 49-64.

Smith, M. 1992. CROPWAT A computer program for irrigation planning an management. FAO, *Irrigation and drainage paper N° 46*, 133 p. 92-5-103106-1.

Spath, H. 1980. Cluster analyses algorithms for data reduction and classification of objects. Chichester: Ellis Horwood. 226 p.

Steccone, L., Dickie, M.J., Costanzo, M., Coronel, A. 2013. Relación entre las precipitaciones y la fecha de siembra de maíz en Cañada de Gómez. Jornada de Ciencia y Tecnología de la UNR. Rosario.

Suzuki, K., Tsukaguchi, T., Takeda, H., Egawa, Y. 2001. Decrease of pollen stainability of green bean at high temperatures and relationship to heat tolerance. *J Am Soc Hort Sci*, 126 2001, 571-574.

Tan, J., Kalkstein, L., Huang, J., Songbai Lin, J., Yin, H., Shao, D. 2004. An Operational heat/health warning system in Shanghai. *Int. J. Biometeorol.*, 48, 157–162.

Thornthwaite, C. W. 1948: An approach towards a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, 38, 55–94.

Thornthwaite, C.W. and J.R. Mather. 1955. The water balance. *Climatology VIII (1)*, 104 p. Drexel Inst. of Tech., New Jersey. USA.

Thornthwaite, C.W., Matter, J.R. 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Drexel Institute of Technology Climatology*, 10(3), 185-311.

Totis de Zeljkovich, L.E. 2012. Requerimientos agroclimáticos del cultivo de maíz (Capítulo 1). En: Eyherabide, G. (Ed.), Bases para el manejo del cultivo de maíz. Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires Argentina. 7-24

Westgate, M. E., Boyer, J. S. 1986. Reproduction at low silk and pollen water potentials in maize. *Crop Science.*, 26, 951-956.

Wilhelm, E.P., Mullen, R.E., Keeling, P.L., Singletary, G.W. 1999. Heat stress during grain filling in maize. Effects on kernel growth and metabolism. *Crop Sci.*, 39, 1733-1741.

ANEXO I

Líneas Futuras de Investigación

En función de los resultados y conclusiones de esta tesis surgen las siguientes líneas futuras de investigación:

- ✓ Extender el estudio a otros departamentos de la provincia de Santa Fe.

- ✓ Buscar índices predictores, anteriores a la siembra, de la ocurrencia de deficiencias hídricas en los períodos críticos, con el fin de que sea un aporte en la toma de decisión en cuanto a la selección de la fecha de siembra óptima. Dado que lo que se pretende es un pronóstico a mediano plazo, se necesita analizar el acople entre las condiciones de la atmósfera y de la hidrosfera, por lo cual estos índices estarían relacionados con el evento ENOS, con la circulación océano – atmosférica sobre el Océano Pacífico y sobre el Océano Atlántico.

- ✓ Relacionar los resultados encontrados con esta metodología con aquellos obtenidos a partir de modelos de simulación del ciclo del cultivo, como por ejemplo el DSSAT.