

Trabajo Final de Graduación para optar por el
título de: Ingeniero agrónomo

“Potencial impacto del cambio climático en
cultivos de soja y maíz en la región de Coronel
Suárez, Buenos Aires”

Autor: Martin Schon

Profesor Tutor: Gabriela Lakkis

Agradecimientos:

- A mis padres por darme la posibilidad de estudiar una carrera universitaria.
- A la profesora Gabriela Lakkis por guiarme durante el trabajo de investigación.
- Al Ministerio de Agroindustria y al INTA por el aporte de datos relevantes para la realización del trabajo.
- A la facultad de Ciencias Agrarias por todos estos años de carrera.

Índice

Capítulo	
4.....	53
4.	
Conclusiones.....	53
Capítulo	
5.....	56
5.	
Bibliografía.....	56

Lista de Figuras/Tablas/abreviaciones

Figura 1. (a) Cambios en olas de calor basados en simulaciones multimodales. (b) Proyecciones de variación de temperatura y precipitaciones a escala global hasta el 2100.....	14
Figura 2. (a) Emisiones totales de Gases de Efecto Invernadero en el mundo (b) Origen de las Emisiones.....	17
Figura 3. Probables cambios en América del Sur debido al Cambio Climático.....	18
Figura 4. Ubicación geográfica del partido de Coronel Suárez.....	21
Figura 5. Precipitaciones medias de Coronel Suárez.....	22
Figura 6.: Probabilidad diaria de precipitación.....	22
Figura 7. Evolución de la superficie de cultivos genéticamente modificados en Argentina.....	24
Figura 8. Superficie sembrada de soja en Coronel Suárez.....	25
Figura 9. Superficie sembrada (has) de maíz a nivel nacional (del 69-70 hasta 17-18).....	27
Figura 10. Producción de maíz en Argentina.....	27
Figura 11. Superficie sembrada de maíz en Coronel Suárez en últimas 50 campañas.....	28
Figura 12. Datos de Agroindustria.....	29
Figura 13. Evolución del rendimiento de soja y maíz (a,b) y las variables meteorológicas (c)	35,36,37

Tabla 6. Correlación múltiple entre la soja y las variables climáticas	39
Figura 14 Coeficientes estandarizados de cada variable climática para la regresión múltiple de soja	39
Figura 15. (a) Tabla de funciones de ACP, (b) Gráfico Biplot.....	42
Figura 16. Proyecciones para las variables climáticas involucradas en la ecuación 2 hasta el 2024 con ARIMA.....	44
Figura 17. Tendencia de los valores de rendimiento para la serie temporal original de la soja.....	45
Figura 18. Proyecciones para el rendimiento de la soja a partir de la ecuación 2 de regresión multivariable	45
Figura 19. Proyección del rendimiento de Soja a partir de la serie de datos.....	46
Figura 20. Rendimiento de Maíz en función de la temperatura mínima y la humedad relativa.....	49
Figura 21. (a) Tabla de funciones de componentes principales en Maíz. (b) Gráfico Biplot.....	50
Figura 22. Tendencia de la serie original de datos de maíz.....	51
Figura 23. Proyecciones hasta el 2024 de las series de datos originales de maíz con ARIMA.....	52
Figura 24. Rendimiento proyectado hasta el 2024 del maíz por ARIMA a la ecuación de regresión múltiple.....	52
Tabla 1. Límites de Coronel Suárez.....	19
Tabla 2. Temperaturas medias, mínimas y máximas de Coronel Suárez	21
Tabla 3. Valores de rendimiento de cultivos y variables analizadas.....	34
Tabla 4. Valores descriptivos de los datos.....	38
Tabla 5. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson entre el rendimiento de la soja y las variables ambientales.....	38
Tabla 6. Correlación múltiple entre la soja y las variables climáticas.....	39
Tabla 7. Datos descriptivos de la muestra de variables obtenidos por ACP.....	40

Tabla 8. Matriz de correlación del ACP.....	41
Tabla 9. Valores para las variables climáticas proyectadas con ARIMA hasta el 2024.....	43
Tabla 10. Valores proyectados del rendimiento de Soja a partir de la ecuación 2 por ARIMA y serie original.....	47
Tabla 11. Valores descriptivos de las variables analizadas.....	47
Tabla 12. Matriz de correlación entre las variables climáticas y el rendimiento del maíz.....	48
Tabla 13. Matriz de correlación de regresión lineal multivariable.....	48
Tabla 15. Valores proyectados del rendimiento de Maiz a partir de la ecuación 3 por ARIMA y serie original.....	53

Resumen

El cambio climático altera la dinámica natural de la atmósfera e impacta en la variabilidad del clima, por lo tanto, debe ser entendido no sólo como un fenómeno concerniente a la atmósfera sino como uno que afecta también directamente a la vida en el planeta, influyendo en todos los aspectos vinculados con el desarrollo social, económico, ambiental y cultural a una escala global y local.

Según un reciente estudio de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), *el mundo necesitará producir casi tres veces más de víveres para alimentar los 9.600 millones de personas que tendrá en el año 2050 el planeta tierra*. Una buena parte de esa población vulnerable estaría ubicada en América Latina. Es por eso que el rol de una agricultura estable con bases fuertes es fundamental para alimentar esta población. En Argentina el sector agrícola aporta alimentos para 450 millones de personas, lo que representa el 7,2 por ciento del PBI un número alto comparado con el promedio de 5,2 por ciento del resto de los países de América latina; a su vez, las exportaciones del sector, representan un 58 por ciento a nivel país. Es por esa importancia económica que cualquier alteración climática no solo afectaría al sector, sino que, también, a la economía a nivel general. Por lo tanto, es necesario evaluar y analizar los potenciales impactos en el sector debido a los cambios climáticos proyectados, tanto para los responsables del sector, así como para los tomadores de decisión. En este sentido, el presente trabajo final de graduación, estudió el potencial impacto del cambio climático sobre los cultivos de soja y maíz en el Partido de Coronel Suarez, Provincia de Buenos Aires. Los resultados obtenidos a partir de correlaciones hechas por medio de análisis de componentes principales y proyecciones con el modelo ARIMA, mostraron que las variables climáticas explican sólo el 50% y el 20% de la varianza de la producción de soja y maíz cuando se evalúan series de datos de los rendimientos de cultivo a partir del año 1989 y 2011. Esta tendencia podría indicar que, en la región, el rendimiento de los cultivos está fuertemente vinculado no sólo al clima sino a las características naturales del suelo, al aporte de tecnología, fertilización empleada, entre otras variables.

Palabras Clave: Cambio Climático, Soja, Maíz, Componentes Principales, ARIMA

Abstract

Climate change alters the natural dynamic of the atmosphere and impacts in the climate's variability; therefore, it should be understood not only as a phenomenon concerning the atmosphere but also as a phenomenon that affects life on the planet, influencing aspects related to social, economic, environmental and cultural development in a global and local scale.

According to a recent study of the United Nations (UN), the global food production will have to triplicate in order to feed the 9.600 million of people that will be living in the Earth. A big part of these people vulnerable population would be located in Latin America.

That is why the role of a stable agriculture is essential for the production of staple foods to feed this population. In Argentina, the agricultural industry provides foods for 450 million people, which represents 7.2 percent of GDP, a high number compared to the average of 5.2 percent in the rest of Latin American countries; in turn, exports from the sector represent 58 percent at the country level.

In this way, the present graduation study, analyzed the potential impact of climate change in soybean and corn in the party of Coronel Suarez, Buenos Aires Province. The results obtained from correlations made through principal component analysis and the projections with the ARIMA model, showed that climatic variables explain just the 50 and 20 % of the variance of the soybean and corn when evaluating data series from the year 1989 and 2011. This trend could indicate that in the region, the crop yield is strongly linked to not only the climate, but also natural characteristics of the soil, contribution of technologies, fertilization applied, between some variables.

Keywords: Climate change, Soybean, Corn, Principal component analysis, ARIMA

Introducción al tema

El Cambio climático no es un concepto nuevo, sino que comenzó a desarrollarse a fin del siglo XX. A partir de allí ha ido adquiriendo importancia y protagonismo, para convertirse en el mayor desafío ambiental de la actualidad. Si bien es cierto que la Tierra ha experimentado cambios ambientales importantes como parte de su evolución, el calentamiento global, el aumento de fenómenos meteorológicos extremos y los cambios en los ecosistemas, son una clara consecuencia directa e indirecta de las actividades humanas (Herrán, C. 2012). Algunas de estas manifestaciones del cambio climático, ya hoy en día tienen un efecto inmediato en la vida en el planeta, influyendo en aspectos de desarrollo social, económicos y ambientales a escala global; otras, tendrán un gran impacto en el futuro.

Una de las principales consecuencias del cambio climático, es el aumento de la temperatura media del planeta. El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el

Cambio Climático (IPCC)¹, pronostica que a medida que la temperatura media siga en aumento, las precipitaciones cambiarán sus patrones, generando impactos significativos en los rendimientos agrícolas. Inevitablemente esto traerá pérdidas económicas significativas, y pondrá en jaque la producción de alimentos en el futuro (Altieri & Nicholls, 2008)

Conforme a los estudios realizados por las Naciones Unidas (Baéz *et al.*, 2018), la población mundial actual ronda los 7.550 millones de personas, con un aumento potencial para el año 2050 a 9.700 millones. Este crecimiento demográfico se da principalmente en regiones en vía de desarrollo, especialmente en África, Medio Oriente y América Latina entre otras. Debido al rápido crecimiento de la población hacia el 2050, se deberá triplicar la producción actual de alimentos y mejorar su distribución con el fin de garantizar la seguridad alimentaria² de toda la población mundial.

La Argentina tiene la capacidad de producir alimento para 440 millones de personas, es decir, diez veces su población actual. Los cultivos de soja y maíz son las principales fuentes de ingresos del sector (en especial el complejo oleaginoso, donde el país se ubica como principal exportador de harina y aceite de soja a nivel mundial) ya que su alto contenido proteico y energético respectivamente, los convierten en fuentes de alimentación muy importantes. La producción de ambas especies se encuentra distribuida en gran parte del país, pero principalmente se cultivan en las provincias de Buenos Aires, Santa Fe y Córdoba.

Considerando la importancia de la producción de alimentos en el futuro, y el rol clave que tendrá la Argentina por su capacidad y potencialidad productiva, en este trabajo se analizará el impacto que puede tener el cambio climático en la producción de los cultivos de soja y maíz en el partido de Coronel Suárez, Provincia de Buenos Aires.

¹ El IPCC es el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (por sus siglas en inglés), una organización internacional con el mandato de evaluar la información científica, técnica y socioeconómica actual sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta.

² La FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) define seguridad alimentaria como la capacidad de la población mundial de tener acceso físico, social y económico permanente a alimentos seguros, nutritivos y en cantidad suficiente para satisfacer sus requerimientos nutricionales y preferencias alimentarias, y así poder llevar una vida activa y saludable

Objetivos del trabajo

Objetivo General:

- Estudiar las interacciones entre las variables climáticas y la agricultura, y analizar si posibles cambios en estas variables pueden comprometer la producción de alimentos en el futuro.

Objetivos Específicos:

- Analizar la relación entre las variables climáticas y los cultivos de soja y maíz en Coronel Suárez.
- Interpretar correctamente las correlaciones efectuadas para determinar la vinculación entre los factores propuestos.
- Proyectar escenarios futuros posibles sobre las variables estudiadas.
- Proyectar y analizar el posible impacto de las variables climáticas en el rendimiento de los cultivos a futuro
- Obtener conclusiones acordes a la problemática en cuestión.

Capítulo 1

1. Introducción

1.1 Marco Teórico

La actividad agrícola de la República Argentina se destaca en el mundo por la cantidad y variedad de cultivos de granos. Las condiciones climáticas de la región la posicionan entre las áreas más productivas del mundo y han convertido a la Argentina en uno de los pocos países capaces de producir alimentos para habitantes de regiones menos favorecidas (Marini, 2008). Es por eso, que los sistemas productivos nacionales registraron un cambio hacia una agricultura continua y un desplazamiento de la frontera agrícola hacia zonas tradicionalmente mixtas o ganaderas (Cruzate y Casas, 2009).

Sin embargo, las adversidades causadas por el cambio y variabilidad del clima están afectando en forma creciente a los principales países productores de productos agropecuarios y forestales (Parry *et al.*, 2005; Rosenzweig y Hillel., 2005) y Argentina es uno de ellos.

Como demostraron Feo *et al.*, (2009), el cambio climático es percibido como un fenómeno que afecta la vida sobre nuestro planeta y por lo tanto el mayor reto que enfrenta el ser humano en la actualidad es combatir y adaptarse a las variabilidades climáticas. Si no logramos disminuir y mitigar las causas del cambio climático, sus consecuencias pueden ser dramáticas. Rosenzweig *et al.* (1994) afirman que es probable que el cambio climático reduzca el potencial alimentario mundial y que el riesgo de hambre aumente en las economías más marginadas.

La agricultura depende de las condiciones ambientales y de la disponibilidad y calidad de los recursos naturales, siendo muy sensible a la variabilidad climática y al cambio

climático (Downing, 1996; Watson *et al.*, 1996). Según la FAO (2016) esto puede tener consecuencias significativas sobre la producción de alimentos, sobre los medios de vida de las personas que dependen de la agricultura, y sobre la seguridad alimentaria y nutricional de la población en general. A pesar de los grandes cambios biotecnológicos y al aumento en los potenciales de rendimiento de los cultivos en la última década, la producción de alimentos todavía es muy dependiente del clima, ya que la radiación solar, la temperatura y las precipitaciones son los principales motores del crecimiento de los cultivos (Rosenzweig *et al.*, 2001).

El concepto de cambio climático ha cobrado gran importancia en el manejo sustentable de los agroecosistemas (Bazzaz y Sombroek, 1995; Wall y Smit 2005). En algunas regiones del mundo, la producción de ciertos cultivos puede lograr beneficiarse con el cambio climático; sin embargo, se espera que el impacto sea negativo en la mayoría de las regiones agrícolas (Nelson, 2009). En el cuarto informe del IPCC (IPCC-WGII, 2007) se informó que si la temperatura global promedio aumenta entre 1.5 a 2.5°C, entre el 20 y el 30% de las especies vegetales y animales probablemente aumentarán su riesgo de extinción. En el caso de latitudes bajas se proyecta que la productividad de granos básicos disminuya aún en zonas donde los aumentos de temperatura sean menores (1-2°C). Por el contrario, en latitudes altas la productividad de granos puede aumentar si los incrementos de temperatura son entre 1 a 3°C, pero decrecerá si el aumento de temperatura es mayor.

Es de suma importancia resaltar el rol que tendrá la agricultura en el futuro. Según presentó el geo político francés Oliver Antoine en el “*Simposio del sur al mundo en 2030: seguridad alimentaria global y bioenergía*”, la agricultura será un vector de estabilidad geopolítica y tendrá un rol clave en las próximas décadas, brindándoles a los países productores de alimentos, tener el control de los mismos en el futuro (<https://www.agro.uba.ar/delsuralmundoen2030/wp-content/uploads/2016/04/Oliver-Antoine.pdf>)

Ante el cambio climático, los sistemas agrícolas, no solo deben adaptarse para aumentar el suministro de alimentos frente a una población creciente y con patrones alimenticios cambiantes, sino también para mitigar los impactos ambientales en el planeta (Kumar 2016).

1.1 Cambio Climático

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), define cambio climático como “el cambio de clima atribuible directa o indirectamente a la

actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables” (Solomon et al., 2007). Este cambio, originado con un fuerte aporte antropogénico de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, impacta de diferentes formas en el sistema climático. Las más claras y medibles según el IPCC (2014) son el calentamiento y acidificación de los océanos, el aumento de temperaturas continentales, la modificación en el patrón de las precipitaciones, el derretimiento de hielos árticos, el incremento del nivel del mar, y el incremento de concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

Hasta el momento los cambios sucedidos en la atmósfera pueden resumirse en un aumento general de la temperatura de la tierra, alrededor de 0,85 °C (0,65 a 1,06) °C para el periodo 1880-2012. Si tomamos en cuenta el calentamiento sucedido desde el periodo 1850-1990 al periodo 2003-2012, la temperatura se ha incrementado en alrededor de 0,78°C (0,72 a 0,85) °C. A nivel planetario, el océano se ha calentado a nivel superficial (75m) alrededor de 0,11 °C (0,09 a 0,13) °C por decenio en el periodo 1971 y 2010. Desde el inicio de la era industrial el pH de las aguas del océano disminuyó 0,1 por la absorción de CO₂, lo que corresponde a un aumento del 26% de la acidez (IPCC, 2014).

En las últimas 2 décadas la criósfera planetaria se ha visto afectada; Groenlandia y la Antártida han perdido masa con glaciares en retroceso y la temperatura del permafrost se ha incrementado en el hemisferio norte. Estos cambios han contribuido al aumento del nivel del mar y en un futuro afectarán seriamente la disponibilidad de agua dulce en las regiones que depende del deshielo de nevadas (IPCC, 2014).

El nivel medio del mar a escala planetaria durante el periodo 1901-2010 se elevó en promedio 0,19 m. Esta elevación del mar, que puede responder a la combinación de pérdida de masa de los glaciares y la expansión térmica del océano, no es homogénea a nivel global ya que en el océano pacífico occidental la elevación es 3 veces superior al promedio global; mientras que en el océano oriental la elevación es cercana a 0 o incluso negativa (IPCC, 2014).

En el futuro, simulaciones realizadas por el IPCC (2001) a nivel global, predicen un calentamiento global medio entre 1.5 a 5.8° C para finales de siglo, con aumentos de eventos extremos como olas de calor. Debido a que una atmósfera más cálida puede contener más vapor de agua, también con lleva a un aumento en la precipitación media global del 5 al 15% (Figura 1). Este aumento en la temperatura terrestre y el aumento estimado en las precipitaciones, se cree que también impactará en una mayor proliferación de plagas y enfermedades que afecten el ciclo de los cultivos (Altieri y Nichols, 2008).

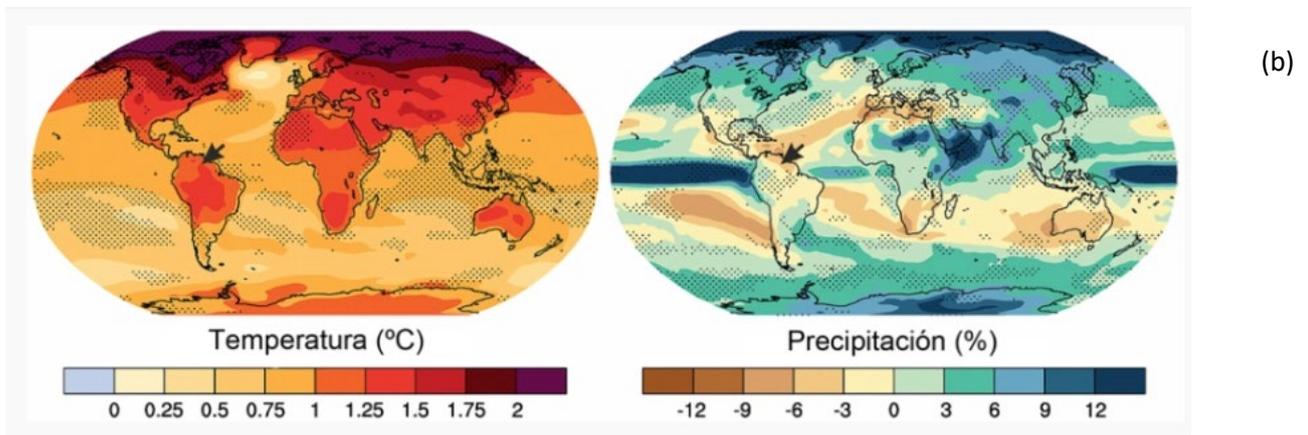
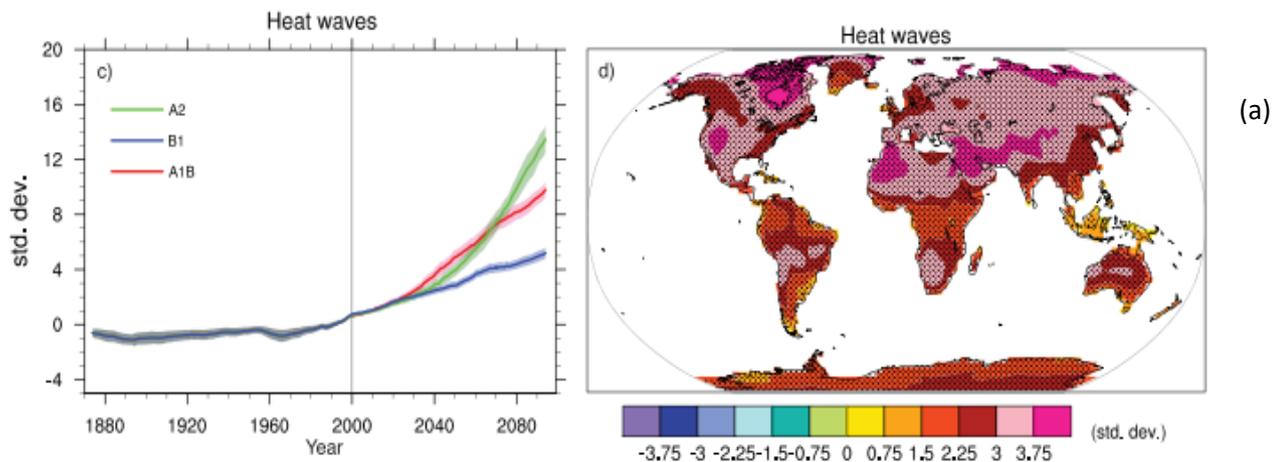


Figura 1. (a) Cambios en olas de calor basados en simulaciones multimodales. Tres escenarios fueron planteados (A2: extremo; B1: medio; A1b: bajo (Tebaldi *et al.*, 2006); (b) Proyecciones de variación de temperatura y precipitaciones a escala global hasta el 2100 según ensamble de modelos del IPCC (IPCC, 2007)

Por otro lado, el aumento de la temperatura del mar con su consecuente aumento de nivel, afectará el drenaje de agua superficial y subterránea de las zonas costeras y podría darse la introducción de agua de mar en estuarios y acuíferos dulces salinizándolos; el aumento de temperatura del aire, además, acelera la descomposición de la materia orgánica en el suelo, disminuyendo la cobertura vegetal y aumentando su vulnerabilidad a la erosión (Altieri y Nichols, 2008).

1.3 Cambio Climático en América Latina y Argentina

América Latina y el Caribe se han caracterizado históricamente por la inestabilidad de su crecimiento económico, con importantes períodos de limitada disponibilidad de recursos financieros. Esta situación no es generalizada, pero en distintos períodos ha afectado significativamente a algunas regiones (Martínez *et al.*, 2009). Esto, sumado a sus particulares condiciones geográficas y topográficas, y la escasa innovación en tecnologías que generen una adecuada adaptación a los cambios, llevan a América Latina a ser una de las regiones más expuestas y vulnerables del planeta (Honty, 2007; Samaniego, 2009).

Esta situación es particularmente importante y distintiva si se tiene en cuenta que mientras los países desarrollados son los que principalmente generan la externalidad global resultante de las emisiones y también la sufren, la región de América Latina y el Caribe contribuyen poco a generarla, pero la sufre de manera desproporcionada. Si se toman en cuenta las emisiones regionales, América Latina y el Caribe solo emite más que África, que ocupa el último lugar. Según Honty (2007) las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por el hemisferio sur representan un 8% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI), un dato que resulta bajo si lo ponemos en contexto con su población y área geográfica. La mayor parte de las emisiones son provenientes de del uso de suelos y energía (Figura 2). No obstante, la región sufrirá el impacto del Cambio climático y en particular del calentamiento global ya que figura entre las más vulnerables, por estar localizada dentro de la franja de huracanes y por tener numerosos estados insulares y zonas costeras bajas, por depender de los deshielos andinos para el suministro de agua a los sectores urbanos y agrícolas y por estar expuesta a inundaciones e incendios forestales, entre otras particularidades.

En las últimas décadas la región ha evidenciado cambios en sus precipitaciones, aumentos de temperatura, variaciones en el periodo de heladas, olas de calor, tormentas de granizo y cambios en uso del suelo, como deforestación y ampliación de la frontera agrícola acelerando la erosión de los mismos (Figura 3). Se espera además que un mayor aumento de temperatura a finales de siglo, implique mayores problemas en la región (Conde y Saldaña, 2007; Ortiz, 2012).

Este tipo de amenazas de origen hidrometeorológico se ven agravadas cíclicamente por efecto de El Niño Oscilación del Sur (ENOS). Existen referencias bibliográficas que indican que el fenómeno de ENOS genera escenarios climáticos muy variables en América Latina, especialmente en lo que hace al régimen de precipitaciones (Berlato y Fontana, 1999; Kane, 2001; Berlato y Fontana, 2003). Dichos escenarios pueden influir tanto por defecto como por exceso. En 2015 por efecto del ENOS, se vivió una de las

sequías más severas de la última década, afectando a más de 3,5 millones de personas en Mesoamérica y el Caribe, comprometiendo tanto su seguridad alimentaria y nutricional como sus medios de vida (FAO 2015). Las inundaciones son cada vez más recurrentes en la región y son las principales causantes de los mayores impactos económicos en América del Sur y Centroamérica. Por otro lado, las sequías que afectan a la región se manifiestan regularmente en el nordeste de Brasil, en la región del Chaco, en la zona centro-norte de Chile, en el Corredor Seco Centroamericano (que cubre amplias regiones de El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua y parte de Costa Rica), y en el Arco Seco Panameño (FAO 2016). Según datos de la FAO, se estima que entre el 2006 y el 2016 en América Latina, el 23% de los daños y pérdidas causados por los desastres de mediana y alta intensidad afectaron de forma contundente al sector agrícola (FAO 2018). El informe redactado por el Banco Mundial sobre el desarrollo mundial y cambio climático (2010), asegura que las consecuencias del cambio climático tendrán un mayor impacto sobre el hemisferio sur en comparación con el hemisferio norte. Esto se debe principalmente a la dependencia excesiva y persistente que existe en el hemisferio sur sobre los recursos y productos naturales (Samaniego, 2009). Existe además evidencia aportada por CEPAL (2014) que sugiere que los efectos del cambio climático sobre la agricultura no son lineales y dependen de un conjunto de varios factores como la disponibilidad de agua, la infraestructura para riego, las condiciones socioeconómicas de los agricultores y la zona geográfica. Es por eso que las actividades agrícolas en América Latina son especialmente sensibles en comparación con el resto del mundo.

Los modelos de simulaciones aplicados a los cultivos son la principal herramienta para evaluar el impacto del cambio climático en la producción de cultivos y sus consecuentes estrategias informativas para la toma de decisiones de adaptación a riesgos agrícolas (Fischer *et al.*, 2005). Zapata *et al.*, (2011) evaluaron los impactos del cambio climático en la región usando modelos SRES (IPCC 2007) y de nicho ecológico para el año 2050 sobre 25 cultivos de los Andes tropicales. El trabajo concluyó que los efectos negativos del cambio climático son ligeramente más altos que los efectos positivos, y que el porcentaje de área de cultivos que se verán potencialmente afectados serán: 83,2% frijol, 64% papa, 79,3% tomate y 74,3% trigo. Por su parte, Capurro (2009) analizó el posible efecto que podría tener el fenómeno ENOS sobre los rendimientos de soja en Brasil. Al analizar los estados mayormente sojeros ubicados en la región sur de Brasil, determinó que no hay evidencia significativa para explicar que la variabilidad de las precipitaciones, produzcan un aumento o una disminución de los rendimientos de soja en la región en estudio. De la Casa *et al.*, (2006) analizaron la influencia de El Niño oscilación Sur sobre las precipitaciones y el rendimiento de Maíz en la Provincia de Córdoba, Argentina. Concluyeron que durante los años Niño predominan anomalías positivas de rendimiento

departamental de maíz, aunque son de poca magnitud. Por el contrario, en los años bajo la influencia Niña ocurren anomalías negativas de rendimiento, más importantes y con una frecuencia distinta tanto a la de los años Niño como también a la de los años Neutros, es decir que se presentan de manera claramente diferenciada.

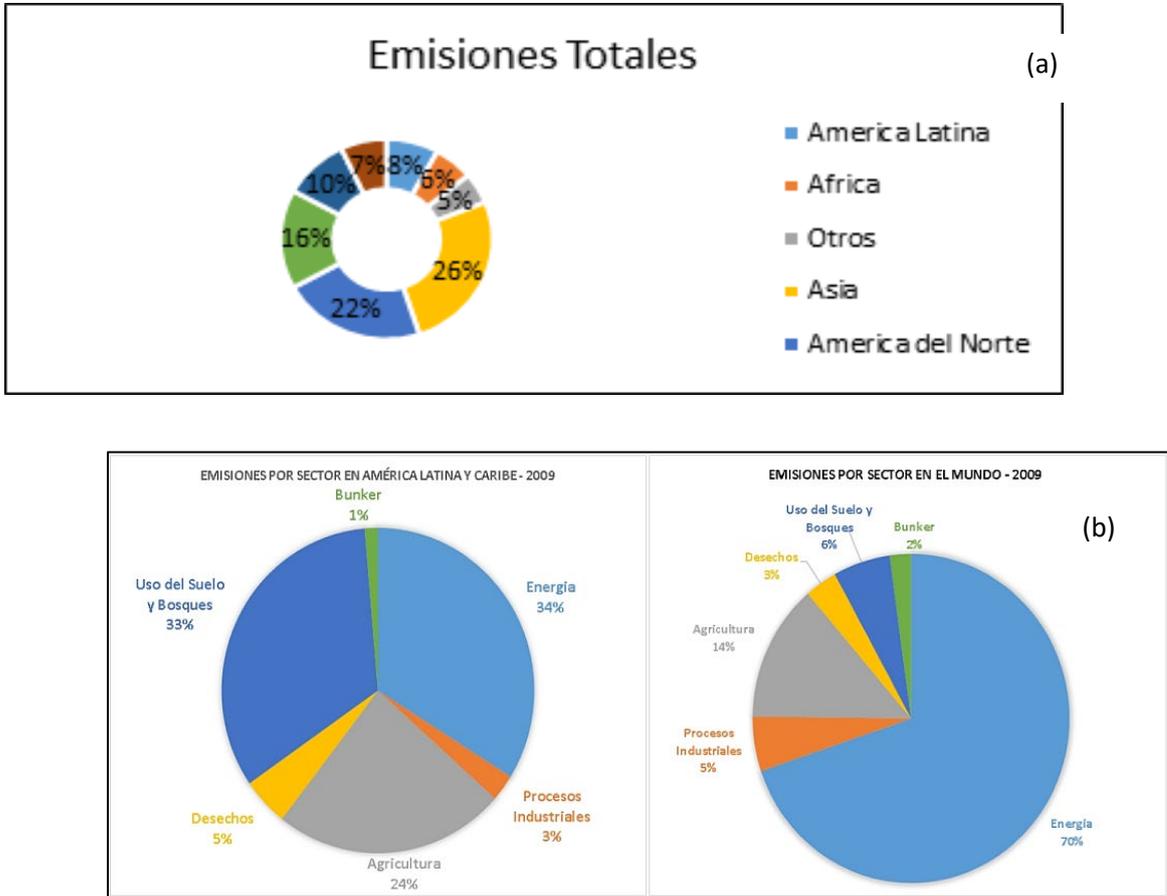


Figura 2. (a) Emisiones totales de Gases de Efecto Invernadero en el mundo. (b) Origen de estas emisiones



Figura 3. Probables cambios en América del Sur debido al Cambio Climático. IPCC, Quinto Reporte de Evaluación (2007)

A nivel nacional, los cambios en el clima de las regiones agropecuarias de la Argentina coinciden con lo observado en la Tercera Comunicación de Cambio Climático nacional (2015), informe en el que se detallan los efectos del cambio climático observados a nivel nacional y a partir del cual se realizan proyecciones. De acuerdo con la publicación, en el período 1961-2010 se observó un aumento en casi todo el país de la precipitación media a nivel anual, especialmente en la zona de Litoral, la región de Cuyo y el Norte del país. Además, determinaron que en la mayor parte del área continental no patagónica, hubo un aumento de temperatura de hasta medio grado. Los resultados muestran una tendencia significativa de aumento de las temperaturas mínimas, lo cual afecta a muchos cultivos que necesitan de ciertas condiciones de temperatura. A la par, hay un aumento de las lluvias de verano, lo que tiene efectos negativos y positivos en los cultivos, y una tendencia negativa en las heladas. Se evidencia un aumento en la frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos como lluvias intensas y olas de calor, lo que puede tener efectos destructivos sobre la producción agropecuaria. A ello se suma la

falta de lluvia en la región Este y los problemas que esto trae por falta de disponibilidad de agua para los cultivos.

La Tercera Comunicación Nacional evaluó también los posibles impactos de los cambios considerando dos escenarios; uno que corresponde a una situación de emisiones de gases de efecto invernadero bajas y otro que corresponde a una situación con la tendencia actual de emisiones altas, ambos aplicados al futuro cercano (2015-2039) y al lejano (2075-2099). Las predicciones basadas en dichos modelos muestran que la temperatura media aumentaría en todo el país en los dos escenarios, tanto para el futuro cercano como para el lejano y en ambos casos los aumentos de temperatura son mayores hacia fin de siglo. En el caso de la precipitación, los cambios proyectados no son de gran magnitud, excepto para el escenario de altas emisiones en el futuro lejano, donde se ubican entre -10 y 10 por ciento de aumento de las lluvias. El estudio estimó que el incremento en la frecuencia de eventos extremos ocasionaría una mayor erosión por viento y agua, compactación del suelo, salinización y finalmente, aumento en la desertificación, lo que pueden provocar cambios significativos en los cultivos. En la Tercera Comunicación, se analizaron modelos de simulación del crecimiento y desarrollo de cultivos en escenarios climáticos futuros. De allí se desprende que, en promedio y en la región pampeana, tanto el maíz como la soja se verían favorecidos. Si bien el rendimiento del cereal podría incrementarse levemente, la oleaginosa rendiría hasta un 50 por ciento más hacia fines de siglo.

1.4 Características del partido de Coronel Suárez

El partido de Coronel Suárez está ubicado en el sudoeste de la Provincia de Buenos Aires, con una superficie total de 5985 km² (lo que equivale a 600.000 hectáreas) siendo el 8^{vo} partido más grande de la Provincia. Está ubicado en las coordenadas 37° 27' 35" Sur, 61° 55' 57" Oeste y limita con los partidos de General Lamadrid, Daireaux, Guaminí, Adolfo Alsina, Saavedra, Tornquist y Coronel Pringles (Tabla 1, Figura 4). Se conecta con los partidos adyacentes a través de las rutas N°60, N°65, N°76 y N°85.

Límites	Partidos
Norte	Daireaux y Guaminí
Sur	Tornquist y Coronel Pringles
Este	Saavedra y Adolfo Alsina

Oeste	General Lamadrid
-------	------------------

Tabla 1: Límites de Coronel Suárez.

El partido está ubicado en el sudoeste de la Provincia de Buenos Aires y pertenece a la región Pampeana. Está compuesto principalmente por una extensa llanura interserrana, con excepción de la región sur, que pertenece al sistema de sierras de Ventania. En esta región se detectan picos de altura que alcanzan los 900 msnm (cerro Guanaco y cerro Providencia). La región de la llanura, son suelos de muy buena fertilidad que evolucionaron a partir del loess como materia parental (sedimento limoso proveniente de áreas peri glaciares de la Cordillera de los Andes transportados por el viento y cursos de agua) (cita)

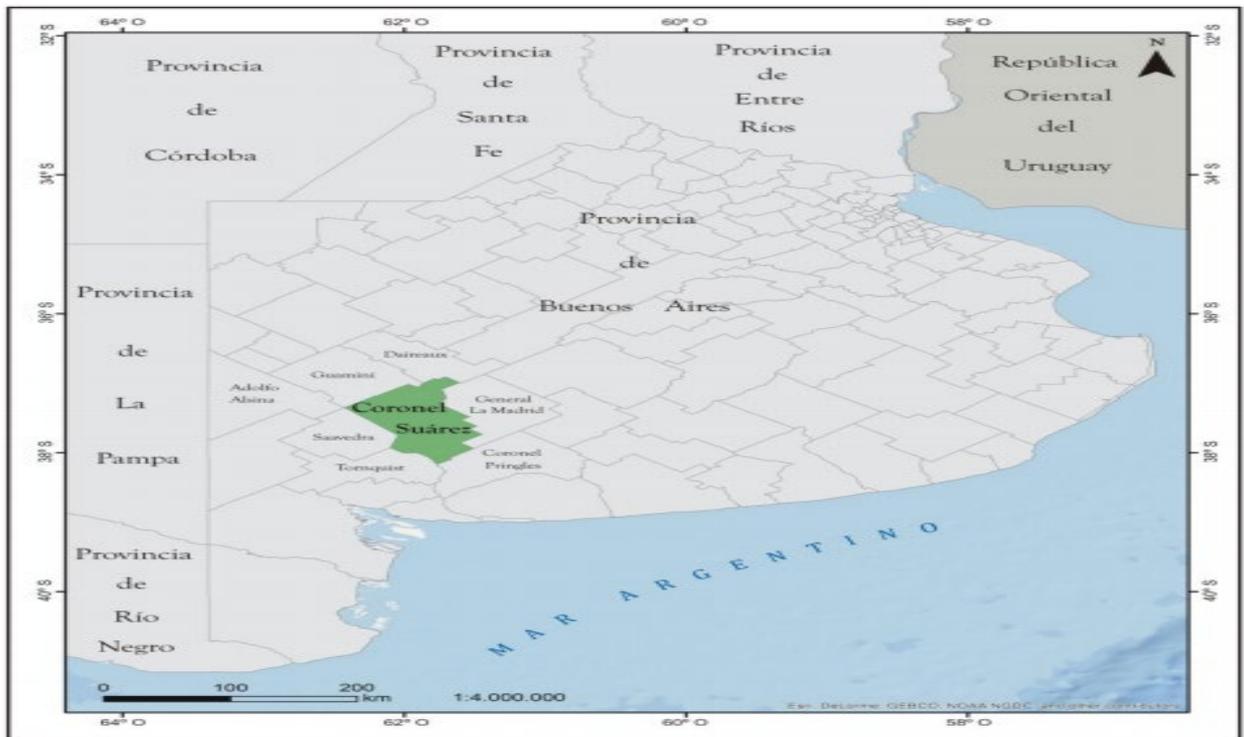


Figura 4. Ubicación geográfica del partido de Coronel Suárez. Pedelaborde, A., 2018, sobre la base de ArcGIS 10.3.1

En base a la información obtenida del Servicio Meteorológico Nacional, se clasifica al partido como una región subhúmeda. Los veranos suelen ser cálidos y mayormente despejados y los inviernos fríos, ventosos y parcialmente nublados. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía entre 2°C y 30 °C y rara vez baja a menos de los 4 °C bajo cero o sube a más de 35 °C.

A partir de la Tabla 2, que contiene información de valor medio de las temperaturas para el período 1981-2010, se puede observar en la región, dos periodos muy marcados. Un periodo caluroso que abarca los meses de diciembre, enero y febrero donde el promedio

de las temperaturas medias en el mes de enero, rondan los 21°C y las temperaturas máximas en el mismo mes, son de 28.7°C. El otro periodo marcado que hay en la región es una temporada fresca que principalmente se da en los meses de mayo, junio, julio y agosto, siendo el mes de julio el que posee temperaturas más bajas (en promedio la temperatura mínima ronda los 0.4°C y la temperatura máxima promedio ronda los 12.7°C) (Tabla 1).

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura media	21	19,8	17,5	13,3	9,5	6,6	5,9	7,9	10,3	13,5	16,6	20
Temperatura min.	13,8	12,7	11,1	7	3,8	1,3	0,4	1,4	3,4	6,6	9,3	12
Temperatura max.	28,7	27,4	24,8	20,4	16,1	12,7	12,3	14,9	17,1	20,3	23,9	27,4
Record temperatura min.	1	1,3	-1,1	-8,1	-9,5	-10,5	-13,5	-9,8	-9,6	-5	-3	1,5
Record temperatura max.	39,3	39,1	35,8	33,9	28,2	26,3	25,1	31,6	29,3	33,4	35,6	39

Tabla 2. Temperaturas medias, mínimas y máximas de Coronel Suárez (1981-2010; records: 1961 - al presente). Elaboración propia

Es importante resaltar las temperaturas extremas que se observaron a lo largo del periodo 1961 – 2018. Como se observa en la Tabla 2, se registraron temperaturas mínimas en el mes de julio de hasta – 13. 5° C. Por otro lado, en el mes de enero se registraron temperaturas máximas que alcanzaron los 39. 3° C. Los records observados en los extremos de temperatura son un dato importante analizar ya que pueden tener consecuencias directas en la productividad de los cultivos de la región.

En cuanto a las precipitaciones, la media anual ronda los 806 mm (milímetros). La distribución de las mismas no son parejas en todos los meses del año, sino que se observa una variación considerable de lluvia mensual por estación. El mes más húmedo en promedio es enero, con una precipitación media de 122.7 mm, y el mes más seco suele ser junio con 16.7 mm de precipitaciones en promedio (Figura 5). Esto demuestra que hay un marcado déficit de precipitaciones durante el periodo invernal, mientras que en verano la cantidad de milímetros alcanza a multiplicarse hasta por tres veces. Si consideramos un período de treinta años, se deduce (Figura 6) que el 26 de enero es el día con mayor probabilidad de precipitación (36%), mientras que el 18 de junio es el día con menor probabilidad (10%). Es importante aclarar que para considerarse un día mojado (día con precipitación presente) debe haber caído al menos un milímetro de líquido o precipitación equivalente a líquido.

Los meses de junio y julio son los meses con mayor humedad relativa media, promediando un 82%; mientras que el mes de diciembre es el mes con menor humedad relativa media con tan solo 62%.

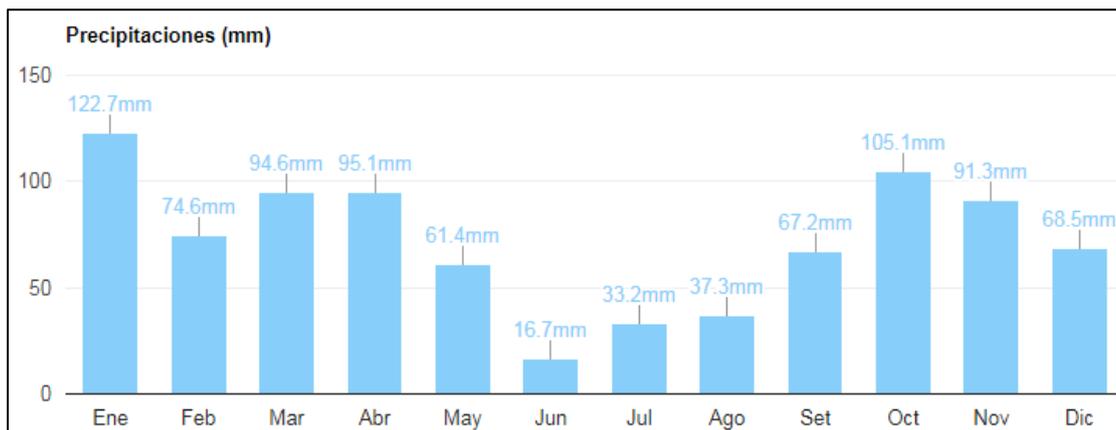


Figura 5. Precipitaciones medias de Coronel Suárez (1961 – al presente). <https://www.weather-arg.com/es/argentina/coronel-suarez-clima>

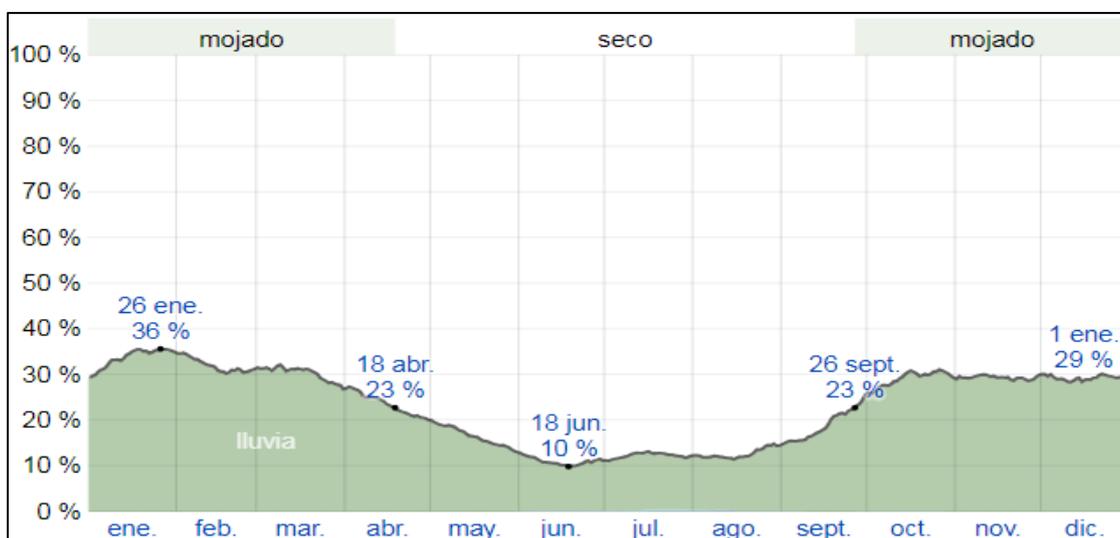


Figura 6.: Probabilidad diaria de precipitación. <https://es.weatherspark.com/y/28566/Clima-promedio-en-Coronel-Su%C3%A1rez-Argentina-durante-todo-el-a%C3%B1o#Sections-Summary>

La duración del día en Coronel Suárez varía considerablemente a lo largo del año. Sin considerar los crepúsculos (transición entre luz total y el amanecer/anocheceer), el día con menos horas luz por lo general es el 21 de junio con 9 horas y 35 minutos de luz total; mientras que, el día con mayor cantidad total de horas luz es el 21 de diciembre con un total de 14 horas y 45 minutos.

1.5 Caracterización de los cultivos de soja y maíz

En los últimos 30 años, la agricultura argentina ha sufrido grandes cambios en sus sistemas productivos. Muchas de las regiones que hoy son casi exclusivamente productoras de grano, hace unos pocos años eran identificadas como mixtas, pues

coexistían en ellas la producción de granos y la ganadería, o incluso eran netamente ganaderas (Satorre, 2005).

Por las condiciones de suelo y las condiciones climáticas analizadas previamente, el partido de Coronel Suárez permite designar alrededor del 90% de su territorio a la actividad agrícola y a la actividad pecuaria. La agricultura se desarrolla esencialmente bajo condiciones de secano, con elevada tecnología y uso de insumos. Los principales cultivos producidos en la zona son soja, maíz, girasol, trigo y cebada. En este caso, nos centraremos en los cultivos de soja y maíz.

1.5.1 Caracterización del cultivo de soja

El cultivo de soja, ha desarrollado gran capacidad adaptativa a diferentes condiciones edáficas y climáticas, que le permite sembrarse en grandes extensiones. Esta característica del cultivo, le ha permitido ampliar sus límites de siembra, para convertirse en la especie cultivable más importante en el mundo (Aizen et al., 2009)

La superficie de implantación con soja en Argentina es de gran magnitud (en el año 2006, representó alrededor del 50 % del área cultivable del país (FAOSTAT. 2007), como así también lo es el potencial productivo del cultivo, donde el poroto de soja y sus derivados (aceites, harinas, biodiesel, etc.) constituyen el principal complejo exportable de Argentina.

Esta gran expansión del área cultivada con soja se dio por varios motivos. Cómo explican Grau et al., (2005), el principal motivo es la expansión de la frontera agrícola, acompañado de un desmonte acelerado, permitiendo el reemplazo de sistemas naturales o semi naturales por soja, conllevando a una gran pérdida de biodiversidad. Satorre (2005) confirma este proceso y lo denomina homogeneización del paisaje, donde el área sembrada con otros cultivos o destinada hacia sistemas ganaderos, fue reemplazada por el cultivo de soja. Otro gran proceso de cambio que sufrió la agricultura argentina, y que explica la expansión de la soja fue la posibilidad de realizar una “soja de segunda”. Trigo (2005) resalta esto como una intensificación en el uso de tierra, permitiendo realizar dos cosechas en una misma campaña (combinación trigo - soja), donde históricamente se realizaba una sola cosecha. Sumado a esto, grandes avances biotecnológicos y la adopción de cultivos genéticamente modificados, permitieron un incremento en la siembra y producción del cultivo (Figura 7)

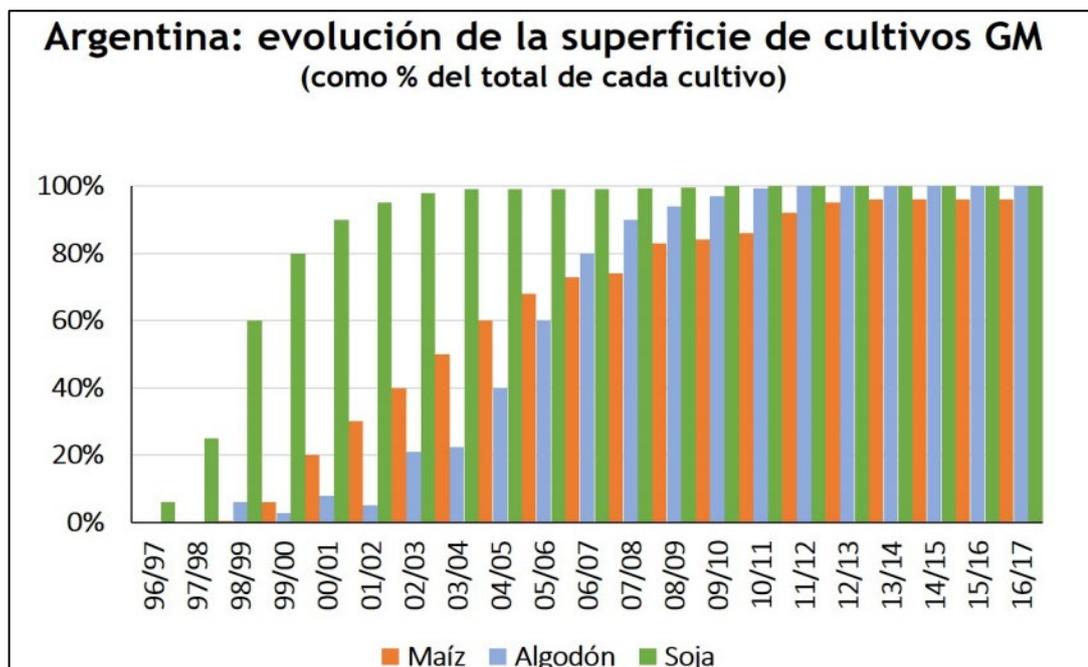


Figura 7. Evolución de la superficie de cultivos genéticamente modificados en Argentina. Agroindustria. Los cultivos transgénicos en Argentina y en el mundo. Datos estadísticos de adopción de cultivos GM 2014/2015.

El reducido consumo interno de la oleaginosa exige una demanda externa en continua expansión para ubicar la producción y la exportación de aceites, harinas y biodiesel. Como consecuencia, la soja terminó desplazando a la actividad ganadera hacia tierras marginales, desplazando la siembra de pasturas y la existencia de pastizales naturales hacia tierras con menor potencial productivo. La superficie sembrada con soja, según la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, viene creciendo a una tasa del 8 % anual, alcanzando un máximo para la campaña 2014/2015 con 20.400.000 hectáreas sembradas a lo largo del país (<http://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>)

En Coronel Suárez la importancia del cultivo ha ido creciendo año a año (como muestra la Figura 8, la superficie sembrada en el partido fue aumentando de manera constante en los últimos 20 años). En la campaña 2012/2013 la soja logró un máximo de 175.400 hectáreas sembradas, con un rendimiento promedio de 20,2 quintales por hectárea. Sin embargo, según los datos de la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, la campaña 2015/2016 la superó en producción, debido a las buenas condiciones climáticas, con un promedio de producción de 28 quintales por hectárea.

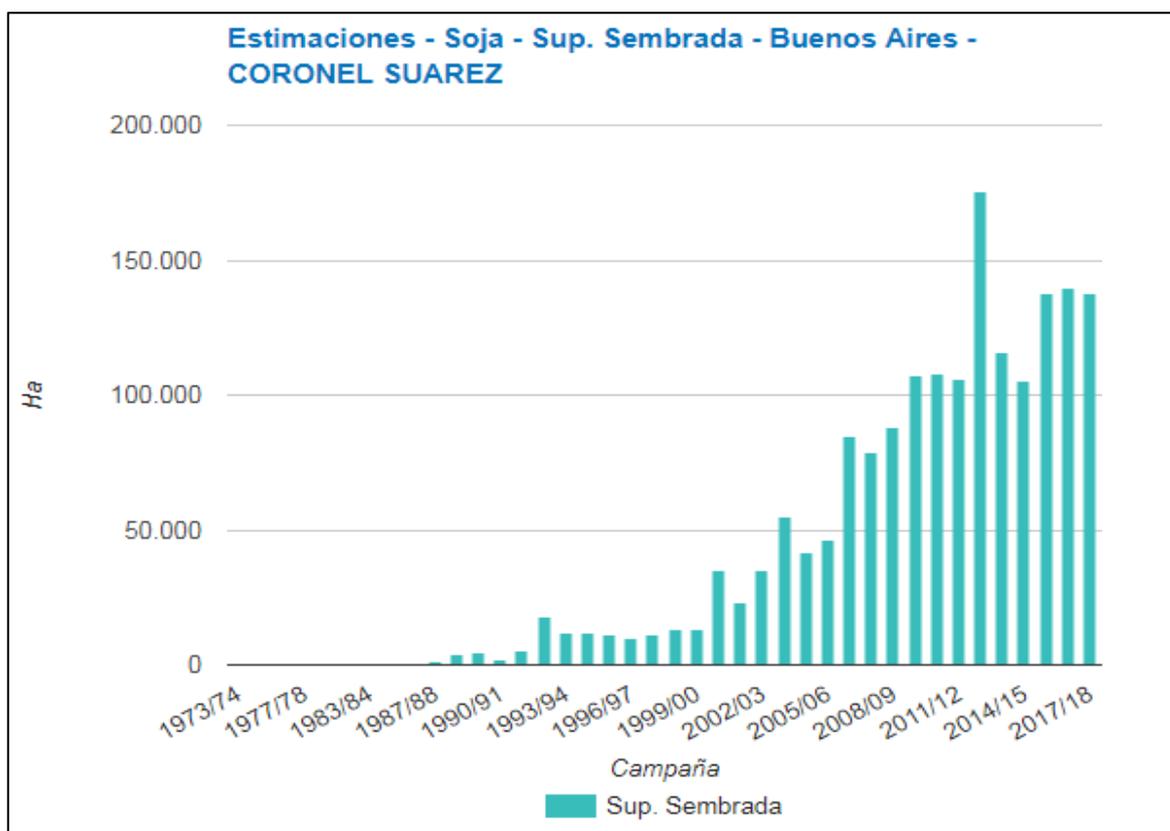


Figura 8. Superficie sembrada de soja en Coronel Suárez. Fuente: <http://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>

1.6.2 Caracterización del cultivo de maíz.

En los últimos años, el cultivo de maíz, se ha convertido en la especie más cultivada en el mundo. Sus usos varían enormemente, desde su capacidad como forraje, la posibilidad de utilizarlo para generar biocombustible, grano para alimentación animal, utilización como materia prima para una creciente cantidad de industrias y nuevas tecnologías como los bioplásticos. Todas estas nuevas industrias aumentaron la demanda del cultivo, lo que provocó un aumento en la apreciación por parte de la industria.

En Argentina, la producción de maíz ha ido creciendo en los últimos 15 años, (Figura 10) principalmente gracias a la demanda internacional, y a la adopción de tecnología por parte de los productores. La implementación de cultivos genéticamente modificados, principalmente el maíz Bt (denominación utilizada para caracterizar a híbridos con el gen de la bacteria *Bacillus thuringiensis*) lograron reducir el uso de insecticidas, con el consiguiente ahorro de costos, haciendo al cultivo más rentable (Satorre 2005). Otra gran razón que explica el incremento del área sembrada de maíz (Figura 9) radica en la

importancia de incluir esta especie en las rotaciones agrícolas. Varios estudios (MacColl 1989; Kay 1990) han demostrado que incluir al maíz en las rotaciones ayuda enormemente a mejorar la estructura del suelo, además de aportar materia orgánica al mismo.



Figura 9. Superficie sembrada (has) de maíz a nivel nacional (del 69-70 hasta 17-18). <http://datosestimaciones.magyp.gov.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>

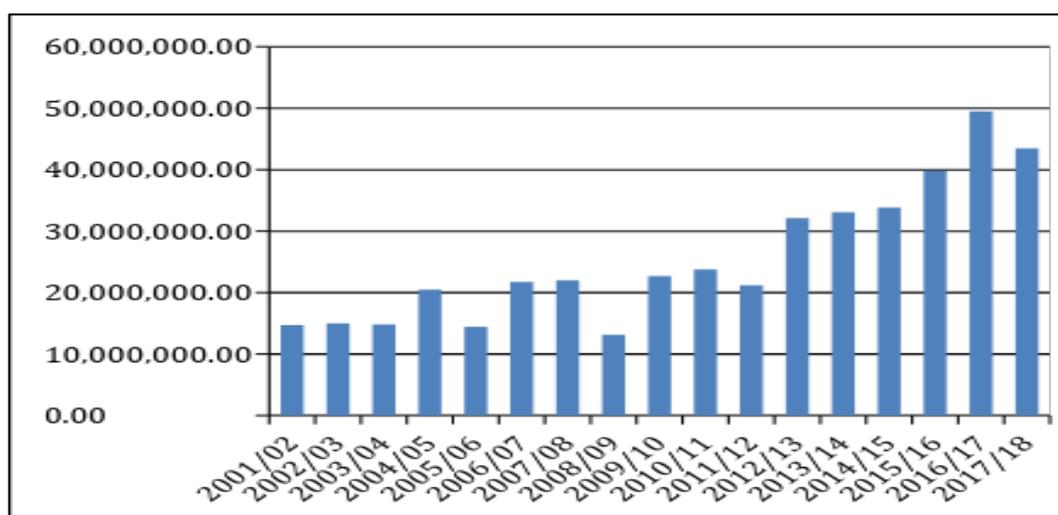


Figura 10. Producción de maíz en Argentina. Elaboración propia con datos de la Secretaría de Agroindustria. <http://datosestimaciones.magyp.gov.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>

En Coronel Suárez, el maíz no tiene su mejor potencial, principalmente debido a las condiciones climáticas que presenta la zona. Sin embargo, debido a la cercanía que presenta el partido de Coronel Suárez al puerto de Bahía Blanca, y a razón de políticas agropecuarias tomadas por el gobierno de turno en 2015 (entiéndase como la eliminación de los derechos de exportación y a las retenciones impuestas a la exportación del maíz), se observa un claro incremento en la superficie sembrada, especialmente en las últimas tres campañas (Figura 11).

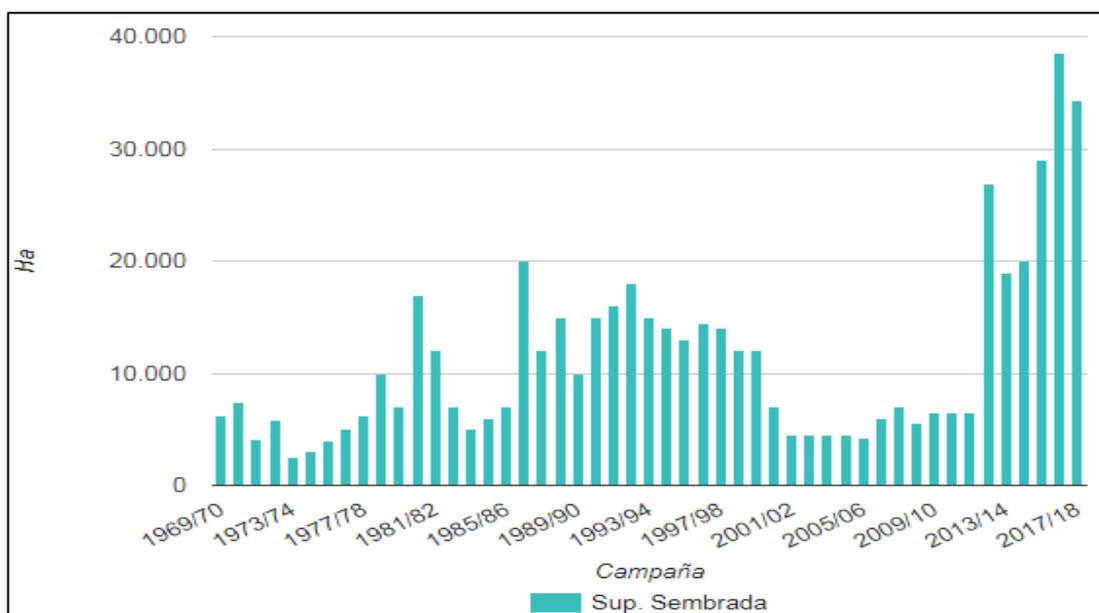


Figura 11. Superficie sembrada de maíz en Coronel Suárez en últimas 50 campañas. Fuente: <http://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>

Por lo expuesto anteriormente y considerando la importancia de la producción de alimentos en el futuro, y el rol clave que tendrá la Argentina por su capacidad y potencialidad productiva, se analizará el impacto que puede tener el cambio climático en la producción de los cultivos de soja y maíz en el partido de Coronel Suárez, Provincia de Buenos.

Capítulo 2

2. Materiales y métodos

2.1 Metodología para el análisis del rendimiento de los cultivos de soja y maíz.

Para determinar el rendimiento promedio de soja y maíz para el partido de Coronel Suárez, provincia de Buenos Aires, se analizaron los datos de producción y rendimiento de soja y maíz publicados por el Ministerio de Producción, específicamente por la secretaría de Agroindustria. Los datos utilizados son de carácter público y se encuentran en la página del Ministerio y se va actualizando campaña tras campaña (<http://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>). A través de la página web se puede obtener información de gran variabilidad de cultivos y la posibilidad de elegir distintas variables como superficie sembrada en hectáreas (has), superficie cosechada (has), rendimiento (kg/ha), producción en toneladas (ton), etcétera. El período de estudio seleccionado corresponde a las series temporales que van desde la campaña 1988-89 hasta la campaña 2010-2011, ya que son los años para los cuales se dispone de información climática de las variables analizadas. Una vez seleccionadas las variables de interés, se le pidió al sistema que brinde información únicamente del partido de Coronel Suárez, Provincia de Buenos Aires. A partir de allí, se obtuvieron los rendimientos promedio de los cultivos en estudio para nuestra región (Figura 12). Siendo una fuente de información oficial del gobierno de la Nación, se confía en la veracidad de los datos obtenidos.

Cultivo	Variable	Desde:	Hasta:
Soja	Sup. sembrada	1969/70	2017/18
Agregación:	Provincia	Departamento	
Total Departamentos	BUENOS AIRES	CORONEL SUAREZ - BUENOS AIRES	

Figura 12. Datos de Agroindustria
<http://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>

2.2 Metodología para el análisis de las variables meteorológicas.

Las variables meteorológicas en estudio, fueron seleccionadas debido a su incidencia en el ciclo de los cultivos de soja y maíz. Se seleccionó un periodo desde la campaña 1988-1989 hasta la campaña 2010-2011 y se estudió el comportamiento de: las temperaturas

máximas, temperaturas mínimas, temperaturas medias, humedad relativa, precipitaciones, horas luz y evapotranspiración.

Los datos utilizados fueron obtenidos a través del Servicio Meteorológico Nacional, que cuenta con una estación meteorológica en el aeroclub de Coronel Suárez. El mismo se encuentra en las afueras de la ciudad de Coronel Suárez, y sus coordenadas son: 37° 26' 46" Sur, 61° 53' 21" Oeste. Los datos completos y validados para este estudio, indican datos diarios correspondientes a cada una de las variables meteorológicas estudiadas. Posteriormente se realizaron promedios anuales, y esos son los datos utilizados en este estudio, excepto la evapotranspiración.

En el caso de la evapotranspiración, se calculó a través del Método de Turc. Este método busca explicar la evapotranspiración real en mm/día, utilizando datos de temperaturas y precipitaciones. En el presente trabajo se utilizaron los datos de temperaturas medias y precipitaciones de Coronel Suárez medidas por el Servicio Meteorológico Nacional entre las campañas 1988 - 1989 y 2010 - 2011. A continuación, se presenta la fórmula utilizada para la obtención de la evapotranspiración:

$$ET_{real} = \frac{P}{\left[0.9 + (P/I_T)^2\right]^{1/2}} \quad (1)$$

Dónde:

- ET_{real} = evapotranspiración anual (mm)
- P = precipitación anual (mm)
- I_T = $300 + 25 T + 0.05 T^3$
- T = temperatura media del aire (°C)

2.3 Análisis de variables y correlación con los rendimientos de soja y maíz

Una vez obtenidos los datos de rendimientos de soja y maíz, y los datos temporales de todas las variables, se analizó el comportamiento de los rendimientos y cada variable a lo largo del período en estudio. Se procedió a realizar correlaciones entre las variables, mediante el uso de pruebas estadísticas como la covarianza, correlación y coeficiente de determinación en EXCEL. Las variables dependientes seleccionadas fueron los rendimientos de soja y maíz, y las variables explicativas o independientes, las variables ambientales. El rendimiento de los cultivos, o sea las variables dependientes, se

ven afectados por las variables independientes. La correlación de cada uno de los rendimientos de cultivo respecto de cada variable climática se analizó tomando las variables de a pares. Para corroborar estas correlaciones, se utilizó además el método de correlación multivariada en el que se incluyeron todas las variables independientes analizadas y los rendimientos de los cultivos, con el fin de obtener una ecuación representativa de cada uno. Para este análisis se consideraron los coeficientes de determinación o el coeficiente de regresión que al transformarlos en porcentaje dan la porción de varianza compartido entre rendimiento y la o las variables en estudio y, por otro lado, el porcentaje de rendimiento que queda por explicar por la variable. Cabe destacar en este punto que, además de considerar la correlación lineal se analizaron las de otro tipo, siendo la lineal la más representativa. Otro método alternativo utilizado para evaluar la relación entre variables explicativas y dependientes es el método de Análisis de Componentes Principales (ACP) disponible en el software XLSTAT como una interfaz auxiliar de las hojas de EXCEL. En estadística, el análisis de componentes principales es una técnica utilizada para describir un grupo de datos en términos de nuevas variables denominados componentes, no correlacionados. Los componentes se ordenan por la cantidad de varianza original que describen, por lo que la técnica es útil para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos. Técnicamente, el ACP busca la proyección según la cual los datos queden mejor representados en términos de mínimos cuadrados. Esta convierte un conjunto de observaciones de variables posiblemente correlacionadas, en un conjunto de valores de variables sin correlación lineal llamadas componentes principales. El ACP como primer resultado tiene la estadística descriptiva (máxima, mínima, media y desviación típica) de las variables meteorológicas en estudio, así como también del rendimiento productivo del cultivo. En este último caso el software nos proporciona información en una matriz sobre las correlaciones existentes entre el rendimiento del cultivo y las variables en estudio. Por otro lado, para la interpretación del ACP como tal, el programa presenta el porcentaje total de datos de las variables contenidos en dos ejes (vertical y horizontal), denotados como F1, F2, F3, etc. Dependiendo del número de variables, una vez seleccionado el conjunto de variables con mayor representación de datos, el software nos presenta una matriz con los cosenos cuadrados de las mismas. Esta matriz de cosenos cuadrados refleja el grado de correlación entre las variables analizadas. Los valores subrayados en negrita en la matriz anteriormente mencionada corresponden a los valores para cada variable del factor para el cual el coseno cuadrado es el mayor; en este caso de estudio denotadas como F1 (Abcisas-eje horizontal) y F2 (Ordenadas-eje vertical) por contener la mayor cantidad de datos en relación a otra combinación de factores; las variables meteorológicas contenidas en F1 no estarán presentes en F2 y viceversa.

Una vez identificados los factores en el punto anterior, el software XLSTAT construye un gráfico que representa las variables en estudio mediante el uso de vectores y tienen que ser interpretados en términos de ángulos, sea entre las mismas variables o entre las variables y las dimensiones del análisis ACP. Finalmente, el software construye un gráfico biplot donde representa la relación entre el rendimiento de los cultivos y las variables climáticas. A través de este gráfico, uno puede interpretar cuáles son las variables meteorológicas que mejor se correlacionan con el rendimiento del cultivo, sea esta positiva o negativa; de igual manera el gráfico nos permite interpretar que variables no tienen relación alguna con el rendimiento o poseen una pobre correlación con el mismo.

2.4 Proyección de escenarios climáticos futuros

Para poder determinar el comportamiento de la temperatura máxima, mínima y media, precipitaciones, humedad relativa, horas de luz y evapotranspiración en un escenario futuro, y poder evaluar la influencia en nuestros rendimientos de maíz y soja, se utilizó un modelo estadístico auto regresivo integrado de media móvil (ARIMA). El modelo se encuentra en el complemento XLSTAT, y se realizó el análisis utilizando los datos obtenidos para las variables climáticas y de rendimiento entre las campañas 1989 y 2011.

Para poder obtener resultados de carácter lógicos para el futuro, Aguado et al., (2016) estudiaron el comportamiento de distintas variables. El estudio elaborado por los autores, determinó que para que las predicciones realizadas puedan ser consideradas confiables, se debe contar con un mínimo de 50 datos de cada variable. De no ser así, y al presentar un menor número de datos estadísticos, la predicción pierde mucha confiabilidad estadística, aunque puede observarse cierto grado de tendencia a futuro de las variables meteorológicas y de los rendimientos de soja y maíz. Mientras mayor sea el número de datos que se presentan, mayor va a ser la exactitud de la proyección que entrega el programa.

Las proyecciones evaluadas en este estudio fueron realizadas con datos de todas las variables estadísticas estudiadas, desde la campaña 1989 hasta el 2011, y se plantearon escenarios futuros hacia el año 2024. En este caso, las campañas evaluadas fueron menos de 50 (los datos fueron presentados de forma anual), por lo tanto, se considera que la proyección a futuro no contiene gran exactitud, sino que se interpreta como una tendencia futura posible

Capítulo 3

3. Resultados

3.1 Análisis del rendimiento de los cultivos y las variables meteorológicas.

La Tabla 3 muestra los valores de los rendimientos de soja y maíz expresados en Kg por Ha y los valores de las variables meteorológicas de los años analizados.

Campaña	Maiz(kg/ha)	Soja(kg/ha)	Tmax (°C)	T min(°C)	Tmedia(°C)	Precip (mm)	HR (%)	HS (horas)	Ev (mm/día)
2011	5176	1968	22,4	14,8	18	778	75,2	12,05	644,34
2010	3500	1365	22	14	18,1	840	70,9	12,05	676,62
2009	3050	783	22,6	14,3	18	1282,41	69,9	12	825,07
2008	6000	2474	22,8	14,8	18,3	825	75	12,06	673,32
2007	5600	2541	21,8	13,7	17,3	814	76,5	12,05	648,78
2006	5500	1852	22,5	14,5	18,2	799	72,8	11,59	658,55
2005	6000	2539	22,1	14	17,9	963,9	70	12,05	724,81

2004	6000	1549	22,3	14	18,1	963,95	70,6	12,06	729,84
2003	4000	1436	22	13,7	17,7	1129,83	72	12	774,6
2002	4500	2000	22,1	13,9	18	795	70,9	12,03	652,92
2001	4850	2500	22,2	14,7	18,3	745	75,1	12,05	631,83
2000	3800	2300	21,2	14,2	17,7	790	75,1	12,06	645
1999	3600	2153	21,8	14	17,6	280,92	72	11,52	284,21
1998	6800	2697	20,9	15	17,7	280	74,5	11,47	283,51
1997	5000	1600	22	15	18,2	885,45	73,2	11,25	699,46
1996	3500	1500	22,3	14,6	18,1	643,4	70,5	11,25	569,54
1995	4200	1900	22	14	17,6	980,19	71	11,4	723,19
1994	4000	1800	21,9	15	18,1	842,51	72,3	12,4	677,8
1993	4000	2000	21,6	14,2	17,5	1383,77	73,2	11,41	827,84
1992	4000	1900	23,2	14,3	18,1	786	73	11,31	650,18
1991	5000	2500	22	14,5	17,6	792	70,8	12,05	644,14
1990	4444	2300	22,1	15	18	835,37	71,5	11,25	672,46
1989	2000	1750	22,4	13,9	17,8	763	72,8	12,05	633,21

Tabla 3. Valores de rendimiento de cultivos y variables analizadas.

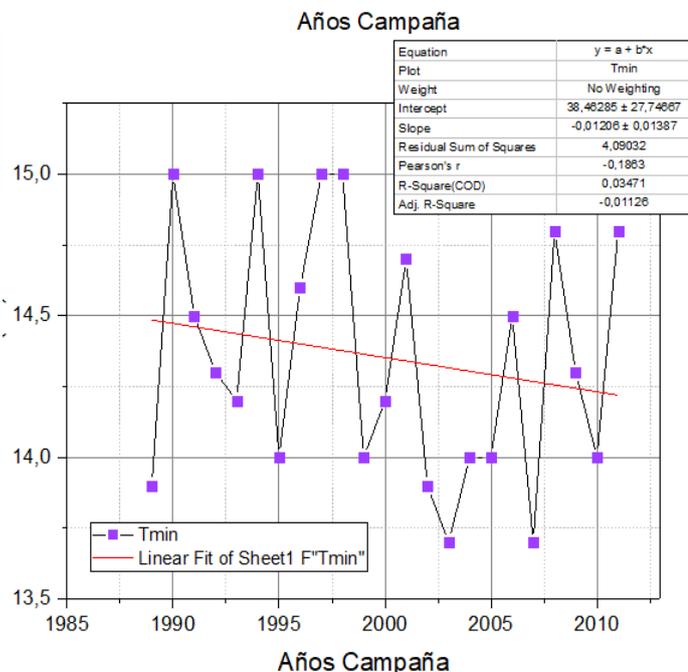
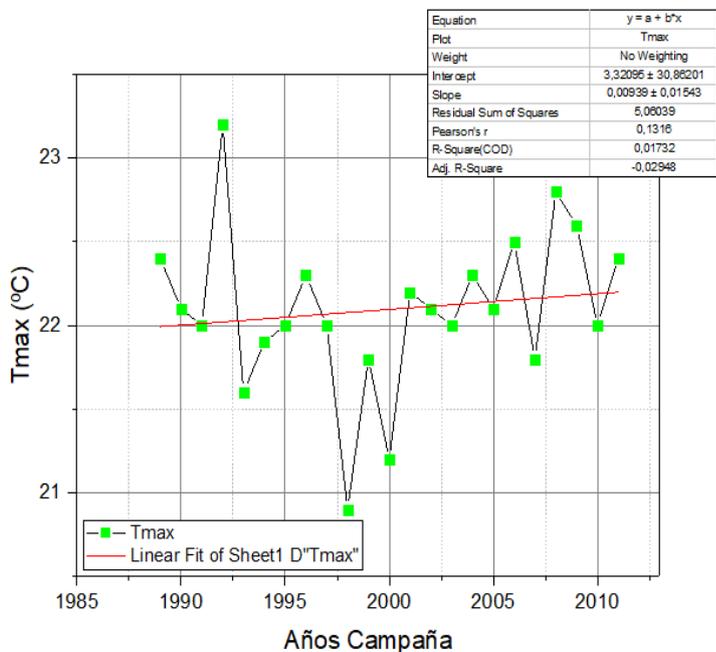
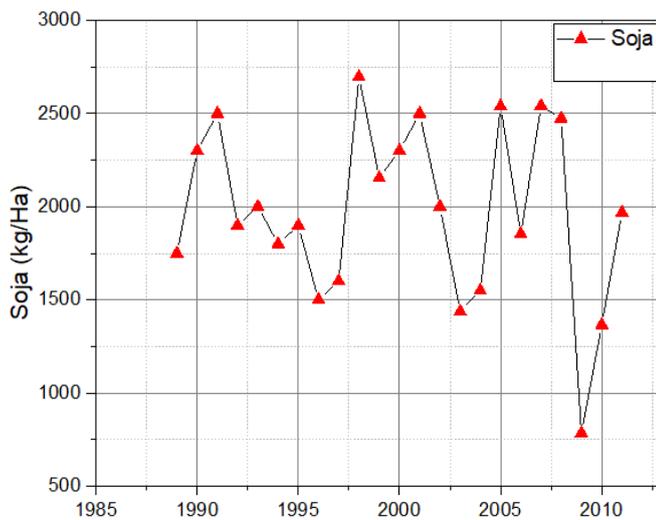
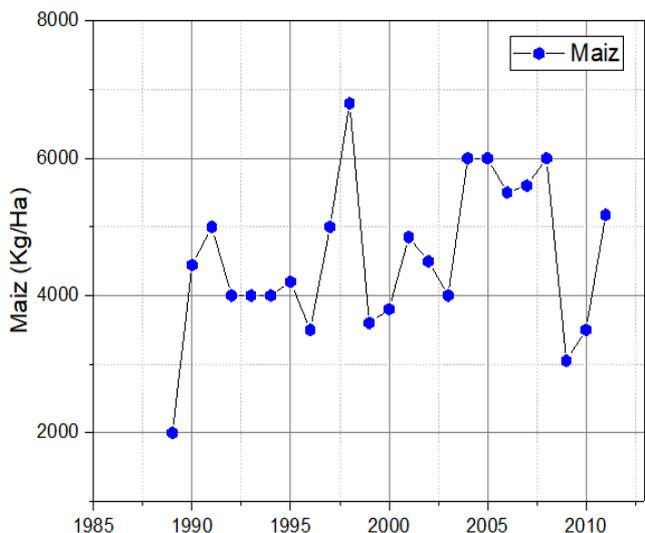


Figura 13. Evolución del rendimiento de soja y maíz (a,b) y las variables meteorológicas (c) Temperatura máxima, (d) Temperatura mínima

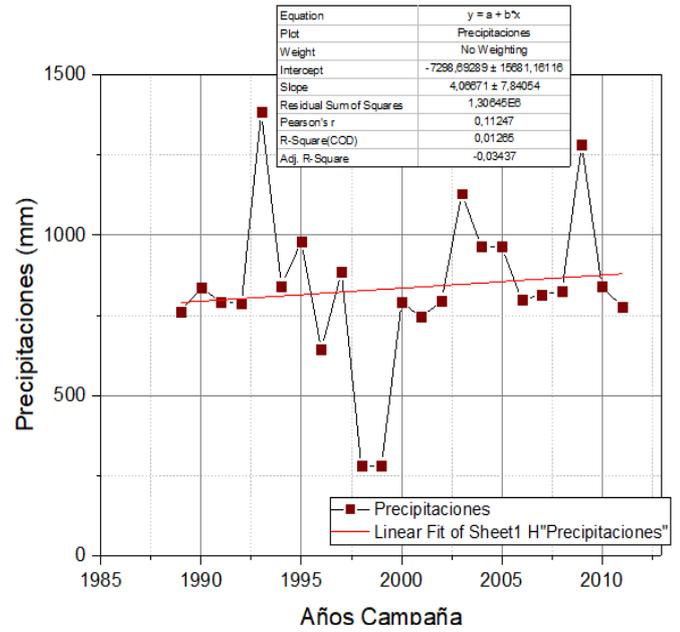
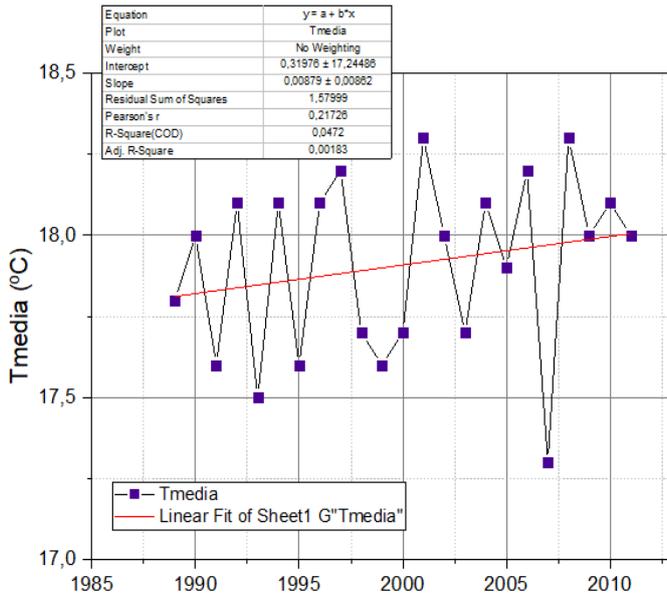
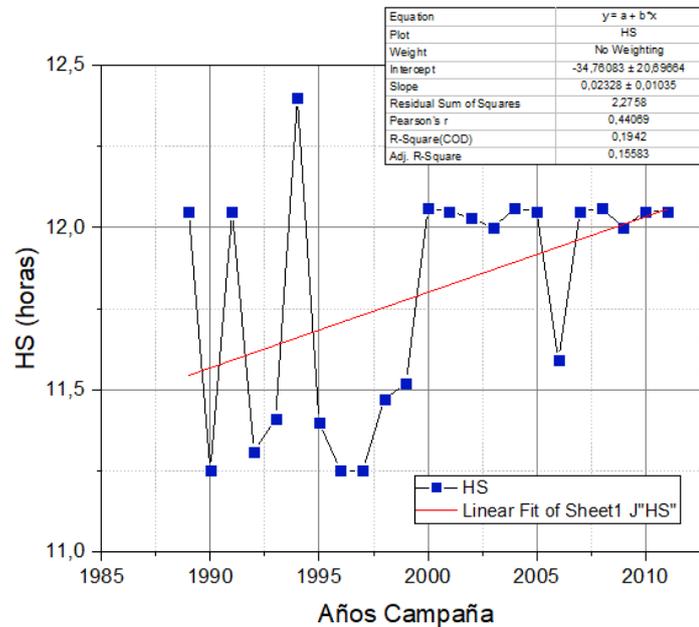
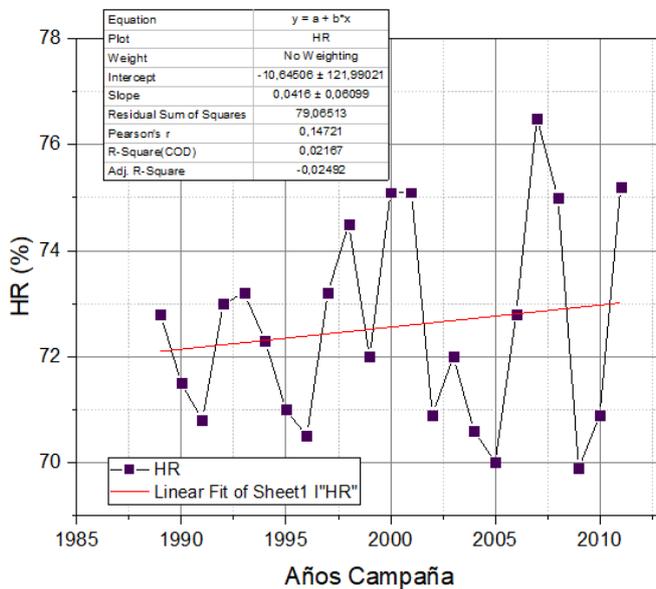


Figura 13. (e) Temperatura media, (f) Precipitaciones, (f) Humedad Relativa, (g) Horas de sol



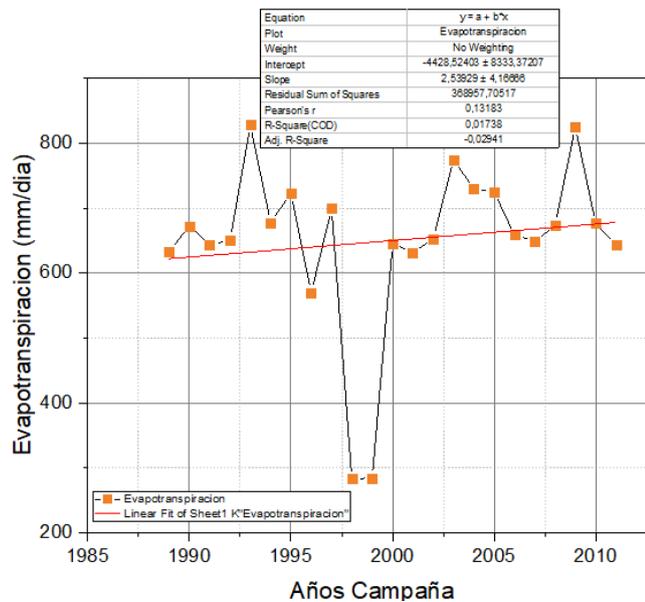


Figura 13 (h) Evapotranspiración, durante el período de análisis.

De la Figura 13 se puede notar que el rendimiento de los cultivos tiene, en ambos casos una tendencia creciente entre los años 1990 y 2009. En este último año en ambos casos muestran su valor mínimo a partir del cual la tendencia parece revertirse nuevamente. Para las variables meteorológicas que se muestran en los siguientes casos, a excepción de la temperatura mínima, las rectas de regresión, muestran tendencia creciente. Este comportamiento será de valor al analizar posteriormente en este trabajo la influencia de cada variable en el rendimiento de cada cultivo analizado.

3.2 Correlación de las series temporales de las variables meteorológicas con el rendimiento productivo de la Soja

Con el fin de determinar cuál de las variables meteorológicas en estudio tienen influencia en el descenso o aumento del rendimiento de los cultivos, se analizaron las posibles correlaciones entre el rendimiento y las variables climáticas. Estas correlaciones realizadas por medio del XLSTAT, se hicieron tanto tomando las variables de a pares, así como considerando la totalidad de las mismas.

La tabla 4 muestra los valores medios, mínimos, máximos y la desviación estándar de las variables involucradas. El mayor grado de dispersión en la muestra de datos se puede observar en el rendimiento de soja, en las precipitaciones y en la evapotranspiración.

Variable	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica
Soja(kg/Ha)	783,560	2697,250	1974,473	473,947

Tmax (°C)	20,900	23,200	22,096	0,484
T min(°C)	13,700	15,000	14,352	0,439
Tmedia(°C)	17,300	18,300	17,909	0,275
Precip(mm)	280,000	1383,770	834,726	245,244
HR (%)	69,900	76,500	72,557	1,917
HS (horas)	11,250	12,400	11,800	0,358
Evap(mm/día)	283,510	827,840	650,053	130,642

Tabla 4. Valores descriptivos de los datos

Una vez realizada la regresión, se determinó la correlación existente entre el rendimiento de soja y las variables climáticas. Estos datos se observan en la matriz de correlación de Pearson en la Tabla 5.

	Tmax(°C)	T min (°C)	Tmedia(°C)	Precip(mm)	HR (%)	HS (horas)	Evap(mm/día)	Soja(kg/Ha)
Tmax (°C)	1	-0,007	0,572	0,247	-0,203	0,012	0,383	-0,362
T min(°C)	-0,007	1	0,505	-0,260	0,229	-0,248	-0,207	0,193
Tmedia(°C)	0,572	0,505	1	-0,016	-0,119	0,040	0,152	-0,277
Precip(mm)	0,247	-0,260	-0,016	1	-0,258	0,156	0,951	-0,462
HR (%)	-0,203	0,229	-0,119	-0,258	1	0,095	-0,233	0,513
HS (horas)	0,012	-0,248	0,040	0,156	0,095	1	0,237	0,020
Evap(mm/día)	0,383	-0,207	0,152	0,951	-0,233	0,237	1	-0,435
Soja(kg/Ha)	-0,362	0,193	-0,277	-0,462	0,513	0,020	-0,435	1

Tabla 5. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson entre el rendimiento de la soja y las variables ambientales. En color verde está resaltado el coeficiente de correlación de Pearson entre la soja y cada variable climática en estudio.

De los valores observados en la tabla 5 se destaca que cuando se evalúa la correlación entre pares de variables (rendimiento de la soja vs variables climáticas), en todos los casos los coeficientes son menores a 0,7. Ergo, la relación entre cada una de las variables y el cultivo, no es alta. La mayor correlación entre variables y la soja se da entre el cultivo y las precipitaciones y la evapotranspiración, aunque con connotación negativa. Si la correlación se analiza considerando todo el conjunto de variables, el modelo que mejor ajusta la evolución de la soja viene dado por la combinación de cinco parámetros climáticos. La Tabla 6 muestra los resultados, donde la mejor combinación se encuentra resaltada en azul.

No. de variables	Variables	R ²	R ² ajustado
1	HR (%)	0,263	0,228
2	Precip(mm) / HR (%)	0,379	0,317
3	Tmedia(°C) / Precip(mm) / HR (%)	0,434	0,345
4	T min(°C) / Tmedia(°C) / Precip(mm) / HR (%)	0,461	0,341
5	T min(°C) / Tmedia(°C) / Precip(mm) / HR (%) / Evap(mm/día)	0,500	0,352

6	T min(°C) / Tmedia(°C) / Precip(mm) / HR(%) / HS (horas) / Evap(mm/día)	0,504	0,318
7	Tmax(°C) / T min(°C) / Tmedia(°C) / Precip(mm) / HR(%) / HS (horas) / Evap(mm/día)	0,506	0,275

Tabla 6. Correlación múltiple entre la soja y las variables climáticas.

Las relaciones entre las variables del modelo seleccionado se muestran graficadas en la Figura 14, donde el gráfico muestra que las correlaciones entre la soja y la temperatura media y la soja y las precipitaciones son ambas de carácter negativo, mientras que, para el resto de las variables, la correlación es positiva.

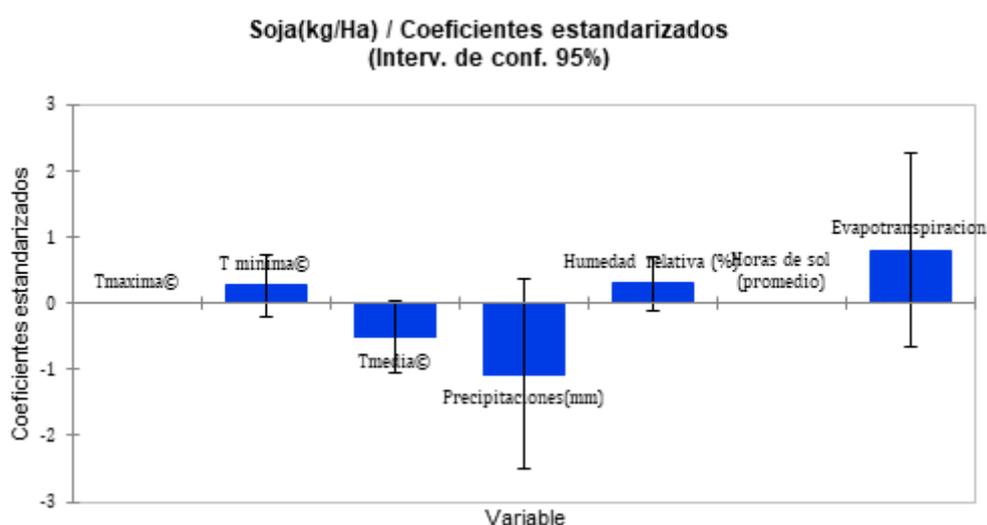


Figura 14. Coeficientes estandarizados de cada variable climática para la regresión múltiple de soja

De acuerdo a la Tabla 6, el modelo seleccionado tiene un coeficiente de correlación del orden de 0.5. Esto implica que dado el valor R^2 , *las 5 variables explicativas explican el 50% de la variabilidad de la variable dependiente soja*. La ecuación que mejor representa la evolución del cultivo obtenida a partir de esta correlación múltiple, viene dada por la siguiente expresión.

$$\text{Soja} = 8291 + 290,6 \times T_{\text{min}} - 890,5 \times T_{\text{media}} - 2,09 \times \text{Precip} + 73,42 \times \text{HR} + 2,89 \times \text{Evap} \quad (2)$$

Para corroborar los resultados obtenidos por medio de las correlaciones, adicionalmente se utilizó el Análisis de Componentes Principales con los datos de la Tabla 3. Como se explicó en el capítulo anterior, el ACP permite reducir la dimensionalidad de la matriz de datos por medio de funciones principales F_i y brinda información sobre la relación entre las variables involucradas. Para el caso de la soja, los datos descriptivos de la muestra

obtenidos a partir de ACP muestran que nuevamente las variables con mayor dispersión son la soja, las precipitaciones y la evapotranspiración (Tabla 7).

Variable	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica
Soja (kg/ha)	783,56	2697,25	1974,47	473,94
Tmax (°C)	20,9	23,2	22,1	0,484
T min (°C)	13,7	15,0	14,3	0,439
Tmedia (°C)	17,3	18,3	17,9	0,275
Precip (mm)	280	1383,77	834,72	245,24
HR (%)	69,9	76,50	72,55	1,917
HS (horas)	11,25	12,40	11,80	0,358
Evap (mm/día)	283,51	827,84	650,05	130,64

Tabla 7. Datos descriptivos de la muestra de variables obtenidos por ACP

Variabes	Soja(kg/Ha)	Tmax (°C)	T min (°C)	Tmedia (°C)	Precip(mm)	HR (%)	HS (horas)	Evap(mm/día)
Soja(kg/Ha)	1	-0,362	0,193	-0,277	-0,462	0,513	0,020	-0,435
Tmax (°C)	-0,362	1	-0,007	0,572	0,247	-0,203	0,012	0,383
T min (°C)	0,193	-0,007	1	0,505	-0,260	0,229	-0,248	-0,207
Tmedia (°C)	-0,277	0,572	0,505	1	-0,016	-0,119	0,040	0,152
Precip(mm)	-0,462	0,247	-0,260	-0,016	1	-0,258	0,156	0,951
HR (%)	0,513	-0,203	0,229	-0,119	-0,258	1	0,095	-0,233
HS (horas)	0,020	0,012	-0,248	0,040	0,156	0,095	1	0,237
Evap(mm/día)	-0,435	0,383	-0,207	0,152	0,951	-0,233	0,237	1

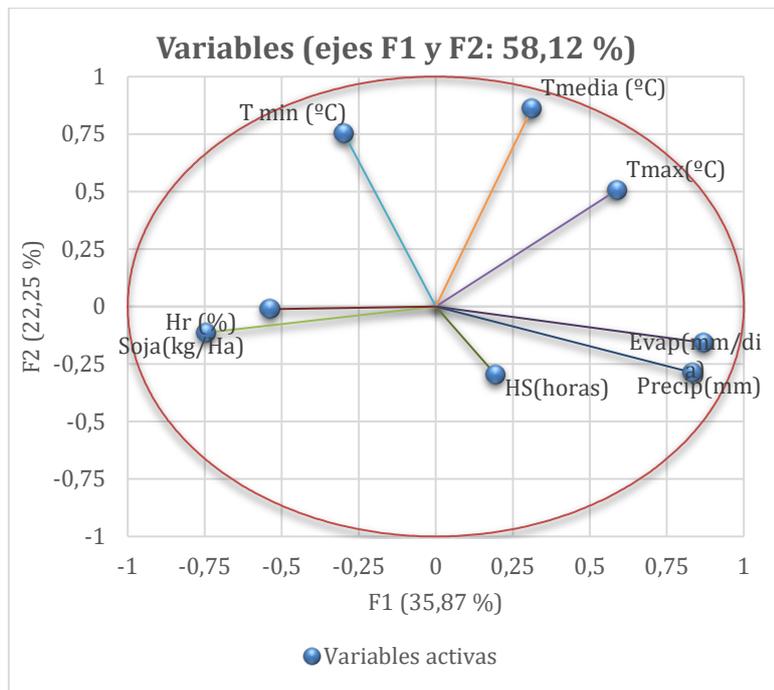
Tabla 8. Matriz de correlación del ACP

De manera similar al caso anterior, el análisis por componentes muestra una matriz de correlación entre variables donde se aprecia que las variables mejor correlacionadas

(valores resaltados en amarillo en la tabla) con la soja son las precipitaciones y la humedad relativa (Tabla 8). Adicionalmente el análisis muestra que alcanza con dos funciones principales F1 y F2, *para explicar el 58% de la varianza de los datos; es decir, con los valores de los que se dispone, resta explicar de la muestra de datos, más del 40% del comportamiento de las variables*. Esta porción de varianza, así como la relación entre soja y los parámetros climáticos analizados, se pueden observar en la matriz de componentes principales y el gráfico Biplot de la Figura 15, donde se muestran las correlaciones positivas y negativas de cada variable con la soja, según el cuadrante en la que están graficadas. Por ejemplo, en el gráfico, se observa que el rendimiento de la soja está en el mismo cuadrante y muy próxima a la Humedad Relativa, corroborando que la HR es una variable con alta correlación comparativa y mismo signo (correlación positiva). Esto confirma lo analizado en la matriz de correlaciones lineales donde existía un coeficiente de Pearson cercano al 0.5 entre ambas variables. De esta forma, los vectores observados en otros cuadrantes, o bien demuestran, una baja correlación positiva con la soja, o una correlación alta o baja pero negativa con el rendimiento de la soja. Este es el caso de la Tmax cuyo vector está en el cuadrante opuesto a la soja (correlación negativa) o bien la Tmin, que se encuentra en el mismo cuadrante pero más alejada (correlación positiva pero baja). En general y para el conjunto completo de datos, los resultados del ACP coinciden con los obtenidos por medio de las correlaciones lineales.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Valor propio	2,87	1,78	1,20	0,89	0,63	0,43	0,17	0,03
Variabilidad (%)	35,87	22,25	14,98	11,08	7,92	5,41	2,17	0,32
% acumulado	35,87	58,12	73,10	84,18	92,10	97,51	99,68	100,00

(a)



(b)

Figura 15. (a) Tabla de funciones de componentes principales, (b) gráfico Biplot

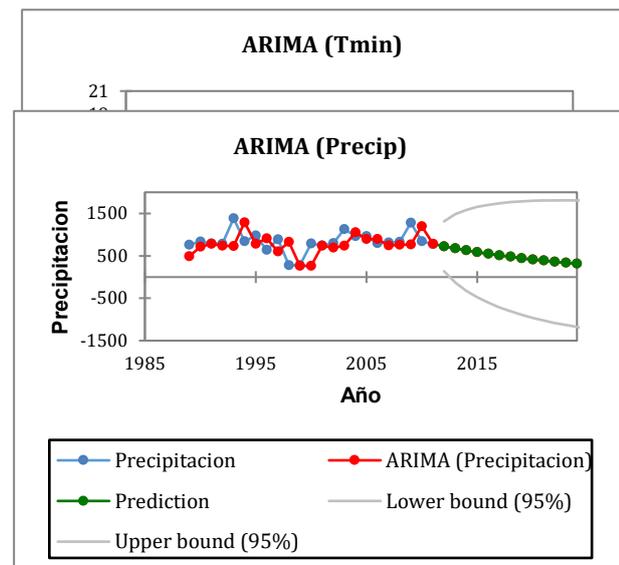
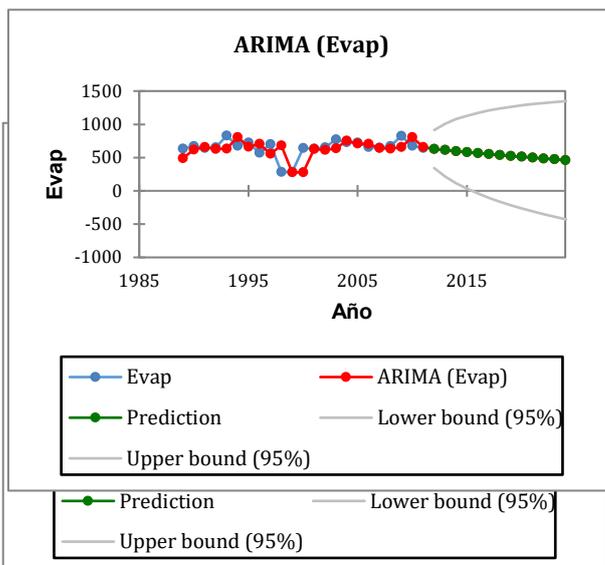
3.3. Proyecciones a futuro para la Soja

Con el fin de poder analizar cómo puede impactar en un futuro cercano el comportamiento de las variables climáticas en el rendimiento del cultivo de soja, se utilizó el programa ARIMA. Este programa permite evaluar las proyecciones futuras de todas las variables meteorológicas involucradas; es decir para aquellas que tienen una mayor correlación de acuerdo con el análisis de regresión de a pares y multivariado, así como el ACP. Dado que las series temporales iniciales son para un período corto de tiempo, se consideraron proyecciones sólo hasta el año 2024. Los resultados obtenidos figuran en la Tabla 9 y la Figura 16, donde se muestra la proyección de cada variable en color verde.

Año proyectado	Tmin (°C)	Tmedia (°C)	Precipitacion (mm)	HR (%)	Evap (mm/año)
2012	14,786	17,994	725,908606	75,1609478	627,923621
2013	14,771	17,988	677,305019	75,1219159	611,925495
2014	14,757	17,982	631,95571	75,0829042	596,334967
2015	14,743	17,976	589,642787	75,0439128	581,141651
2016	14,728	17,970	550,162948	75,0049417	566,335428
2017	14,714	17,964	513,326502	74,9659908	551,906436
2018	14,700	17,958	478,95646	74,9270601	537,845062
2019	14,685	17,952	446,887682	74,8881496	524,141942
2020	14,671	17,946	416,966085	74,8492593	510,787947
2021	14,657	17,940	389,047904	74,8103893	497,774183
2022	14,643	17,934	362,999	74,7715394	485,091982
2023	14,628	17,928	338,694213	74,7327097	472,732895
2024	14,614	17,922	316,016766	74,6939002	460,688691

Tabla 9. Valores para las variables climáticas proyectadas con ARIMA hasta el 2024

De las proyecciones tanto gráficas como numéricas se puede apreciar que en general el comportamiento de las variables hasta el 2024 se mantendrá estable a excepción de las precipitaciones y de la evapotranspiración, que muestran una leve tendencia decreciente. Hay que recordar que, como se mencionó anteriormente, estas dos variables se encuentran muy correlacionadas, por lo tanto, si una decrece, es muy probable que la otra también lo haga (este análisis permite evaluar el posible escenario a futuro del rendimiento de la soja, si se considera la ecuación 2, obtenida por regresión multivariable). Si se reemplazan los valores proyectados para cada variable (de la Tabla 9 y Figura 16) en dicha ecuación, se obtiene una tendencia del rendimiento de la soja hasta el 2024. Los resultados de esta proyección se muestran en el gráfico de la Figura 18. Junto a ésta, se adicionó la Figura 17 donde se muestran los valores del rendimiento de la serie original de datos con la tendencia obtenida de forma lineal. En este gráfico se observa que la serie temporal de rendimiento ya mostraba una pendiente con valor negativa que se replica ahora en la Figura 18, con los valores proyectados hasta el 2024.



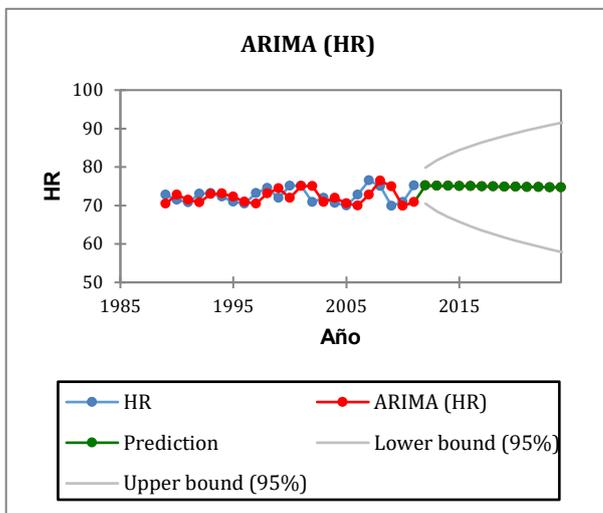


Figura 16. Proyecciones para las variables climáticas involucradas en la ecuación 2 hasta el 2024 con ARIMA

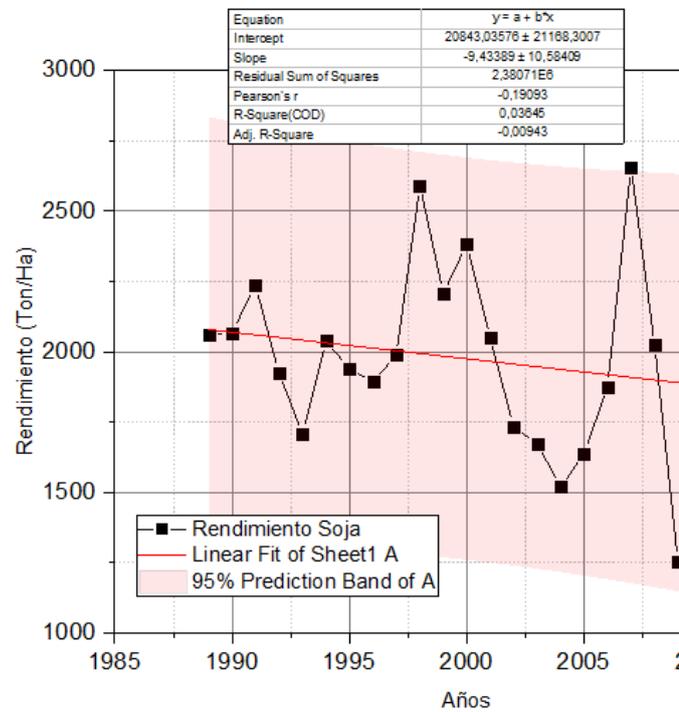


Figura 17. Tendencia de los valores de rendimiento para la serie temporal original de la soja.

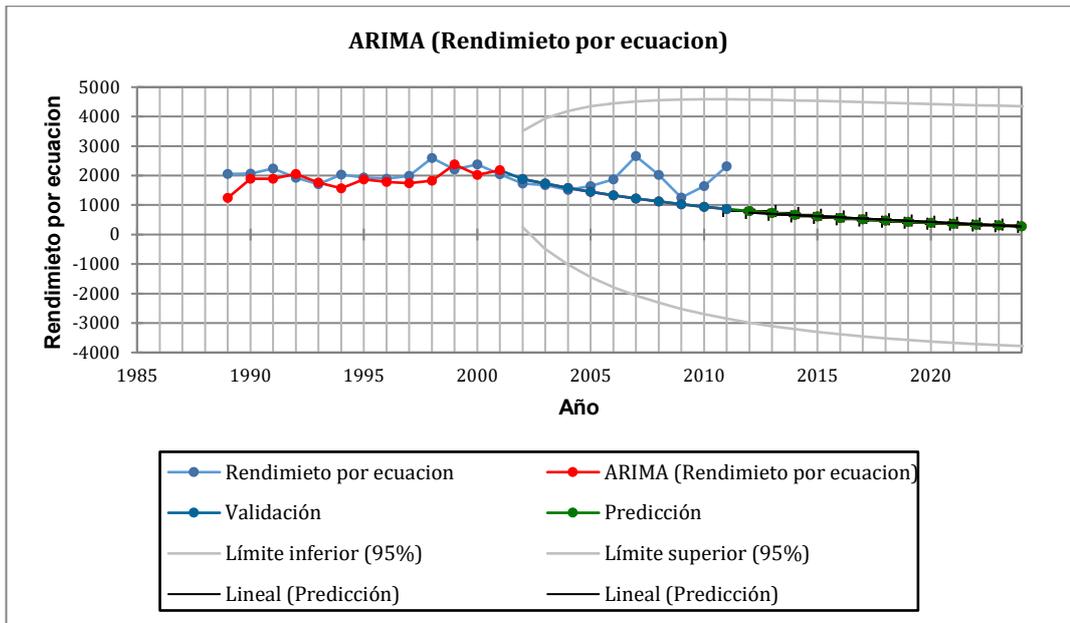


Figura 18. Proyecciones para el rendimiento de la soja a partir de la ecuación 2 de regresión multivariable.

De igual forma, también se puede estimar el rendimiento a futuro de la Soja haciendo un ARIMA directamente con los datos de rendimiento de las series temporales iniciales tomadas como dato. El resultado se muestra en la Figura 19, donde se puede observar que al igual que en el caso anterior, la línea de tendencia del gráfico, así como la línea punteada de predicción en color verde, marcan un decrecimiento en los valores de rendimiento de soja respecto de los valores anteriores.

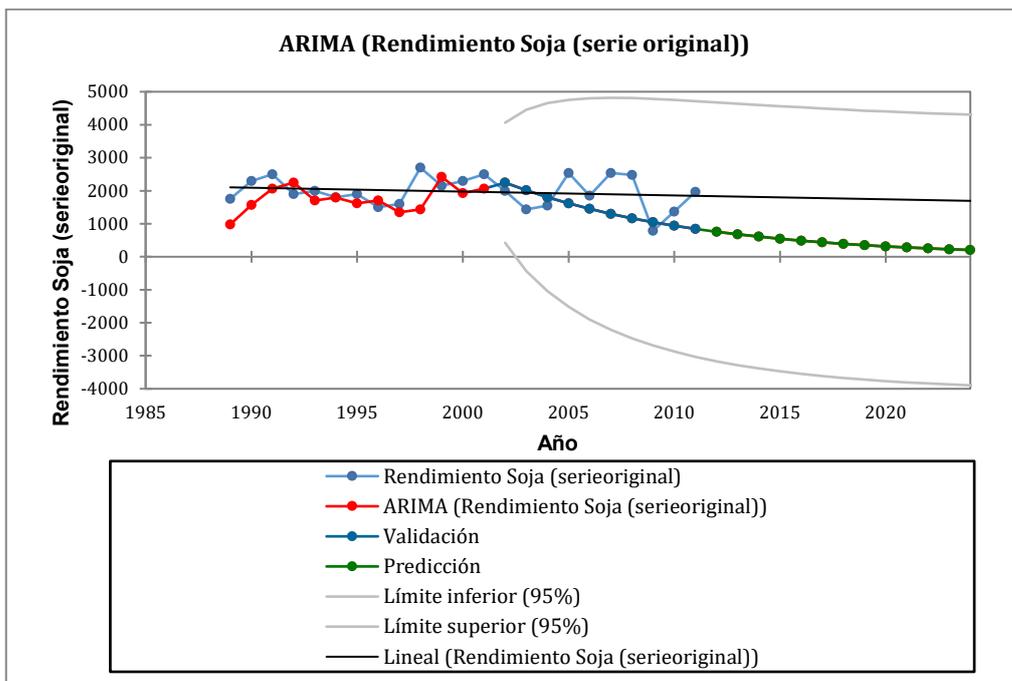


Figura 19. Proyección del rendimiento de Soja a partir de la serie original de datos.

Los datos de rendimiento proyectado a futuro obtenidos por ambos métodos, figuran en la Tabla 10. Si bien la desviación entre los valores de cada proyección es grande, en ambos casos la tendencia es decreciente. Esto indica que, si consideramos el rendimiento de la soja como dependiente sólo del clima (excluyendo tecnologías de procesos e insumos aplicables al cultivo) y si las variables climáticas precipitación y evapotranspiración tienden a decrecer en el futuro, aun cuando los otros parámetros permanezcan constantes, el rendimiento de la soja se verá afectado hasta el 2024 con un decrecimiento muy leve.

Año	Proyección de Rendimiento de Soja	Proyección de Rendimiento serie original
2012	2271,901	756,535
2013	2231,803	678,636
2014	2192,413	608,759
2015	2153,717	546,076
2016	2115,705	489,848
2017	2078,364	439,409
2018	2041,681	394,164
2019	2005,646	353,578
2020	1970,247	317,171
2021	1935,473	284,513
2022	1901,313	255,217
2023	1867,755	228,938
2024	1834,790	205,365

Tabla 10. Valores proyectados del rendimiento de Soja a partir de la ecuación 2 por ARIMA y serie original

3.4 Resultados obtenidos en el cultivo de MAÍZ

El análisis hecho para el caso del maíz fue el mismo que en el caso de la soja. La Tabla 11 muestra la estadística descriptiva de las variables involucradas obtenidas a partir de las regresiones lineales.

Variables	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica
Soja (kg/ha)	2000	6800	4544,35	1128,74
Tmax (°C)	20,9	23,2	22,09	0,484
T min (°C)	13,7	15	14,35	0,439
Tmedia (°C)	17,3	18,3	17,90	0,275
Precip (mm)	280,0	1383,77	834,72	245,24
HR (%)	69,9	76,50	72,55	1,91
HS (horas)	11,25	12,40	11,80	0,35
Evap (mm/día)	283,51	827,84	650,05	130,64

Tabla 11. Valores descriptivos de las variables analizadas.

Variables	Tmax(°C)	T min(°C)	Tmedia(°C)	Precip(mm)	HR (%)	HS(horas)	Evap	Maiz(Kg/Ha)
Tmax (°C)	1	-0,007	0,572	0,247	-0,203	0,012	0,383	-0,166
T min(°C)	-0,007	1	0,505	-0,260	0,229	-0,248	-0,207	0,300
Tmedia(°C)	0,572	0,505	1	-0,016	-0,119	0,040	0,152	0,085
Precip(mm/día)	0,247	-0,260	-0,016	1	-0,258	0,156	0,951	-0,201
HR (%)	-0,203	0,229	-0,119	-0,258	1	0,095	-0,233	0,297
HS (horas)	0,012	-0,248	0,040	0,156	0,095	1	0,237	0,024
Evap (mm)	0,383	-0,207	0,152	0,951	-0,233	0,237	1	-0,176
Maiz(Kg/Ha)	-0,166	0,300	0,085	-0,201	0,297	0,024	-0,176	1

De la tabla se pueden observar los valores medios, mínimos, máximos y el desvío estándar de las variables involucradas. Los valores de rendimiento de maíz y de precipitaciones y evapotranspiración, son los que muestran un mayor grado de dispersión en la muestra de datos, de forma similar al caso anterior.

El grado de correlación entre cada variable climática y el rendimiento de maíz se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Matriz de correlación entre las variables climáticas y el rendimiento del maíz.

En este caso las variables con mayor correlación con el cultivo son la temperatura mínima y la humedad relativa, ambas correlacionadas positivamente. Si la correlación se analiza considerando todo el conjunto de variables, el modelo que mejor ajusta la evolución del maíz, viene dado por la combinación de dos parámetros climáticos. La Tabla 13 muestra los resultados, donde la mejor combinación está resaltada en azul.

No. de variables	Variables	R ²	R ² ajustado
1	T min(°C)	0,090	0,046
2	T min(°C) / HR (%)	0,145	0,059
3	Tmax(°C) / T min(°C) / HR (%)	0,159	0,026
4	Tmax(°C) / T min(°C) / Tmedia(°C) / HR (%)	0,166	-0,020
5	Tmax(°C) / T min(°C) / Tmedia(°C) / Precip(mm) / HR (%)	0,168	-0,076
6	Tmax(°C) / T min(°C) / Tmedia(°C) / Precip(mm) / HR (%) / HS (horas)	0,171	-0,139
7	Tmax(°C) / T min(°C) / Tmedia(°C) / Precip(mm) / HR (%) / HS (horas) / Evap()	0,172	-0,214

Tabla 13. Matriz de correlación de regresión lineal multivariable

El valor de R2 del ajuste correspondiente al mejor modelo que representa el rendimiento del maíz implica que, la temperatura mínima y la humedad relativa, explican menos del 20% de la variabilidad en el rendimiento del maíz. La relación entre el maíz y estas dos variables se puede apreciar gráficamente en la Figura 20.

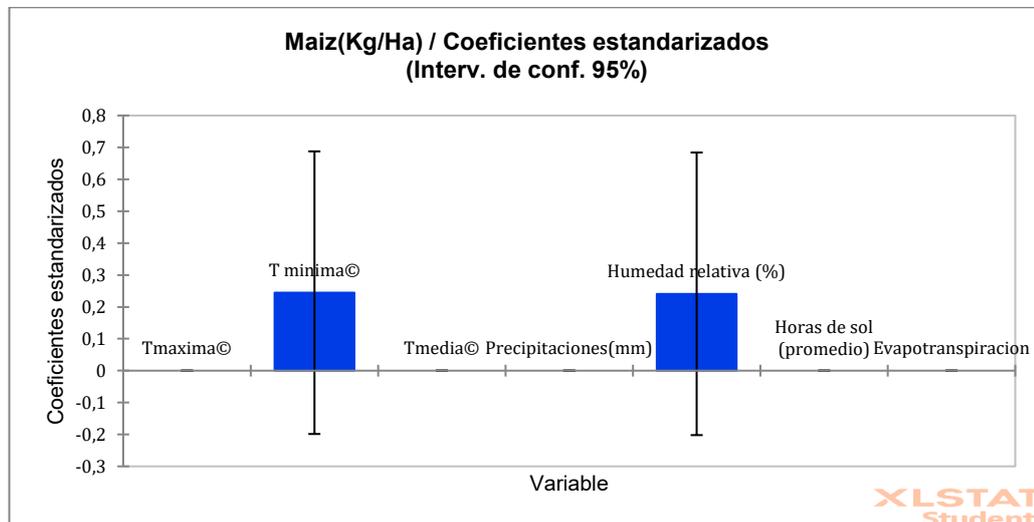


Figura 20. Rendimiento de Maíz en función de la temperatura mínima y la humedad relativa. Teniendo en cuenta el modelo de correlación simple, la ecuación que mejor representa la evolución del cultivo, viene dada por la siguiente expresión:

$$\text{Maíz} = -14780,34 + 628,93 \times T_{\text{min}} + 141,93 \times \text{HR} \quad (3)$$

De forma análoga al caso de la soja, se utilizó el ACP para corroborar los resultados obtenidos por medio de las correlaciones y se obtuvo la matriz de correlación de la Tabla 14, donde se comprueba que el rendimiento del maíz está más altamente correlacionado con la temperatura mínima y la humedad relativa

Tabla 14. Matriz de correlación de ACP

Maiz		1	-0,151	0,454	0,077	-0,293	0,315	-0,169	-0,268
Tmax (°C)		-	1	-0,007	0,572	0,247	-0,203	0,012	0,383
T min(°C)		0,454	-0,007	1	0,505	-0,260	0,229	-0,248	-0,207
Tmedia(°C)		0,077	0,572	0,505	1	-0,016	-0,119	0,040	0,152
Preci(mm)		-	0,247	-0,260	-0,016	1	-0,258	0,156	0,951
HR (%)		0,315	-0,203	0,229	-0,119	-0,258	1	0,095	-0,233
HS (promedio)		-	0,012	-0,248	0,040	0,156	0,095	1	0,237
Evap		-	0,268	0,383	-0,207	0,152	-0,233	0,237	1

Del análisis de ACP se puede observar (Figura 21, (a) tabla y (b) gráfico Biplot)) que dos componentes principales explican más del 50 % de la varianza del conjunto de variables y que la relación entre el maíz y las variables la humedad relativa y temperatura mínima es la que muestra mayor correlación positiva (mismo cuadrante), confirmando el resultado anterior.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Valor propio	2,55	1,80	1,24	0,91	0,69	0,58	0,18	0,03
Variabilidad (%)	31,90	22,50	15,60	11,50	8,60	7,30	2,30	0,40
% acumulado	31,90	54,40	70,00	81,50	90,10	97,40	99,70	100,00

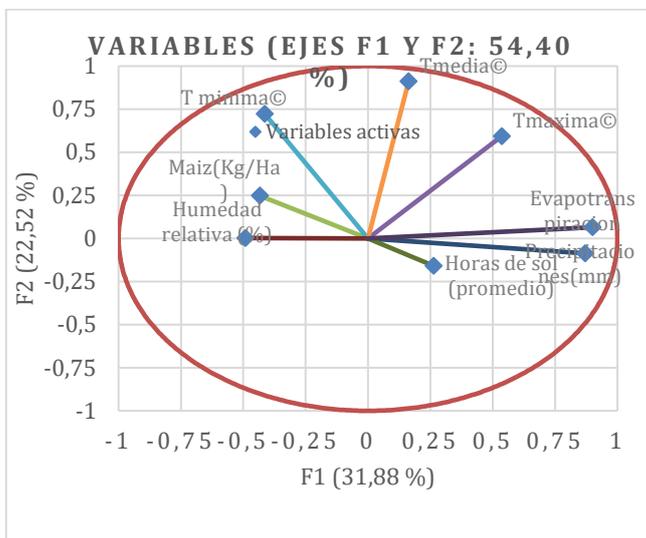


Figura 21. (a) Tabla de funciones de componentes principales en Maiz. (b) Gráfico Biplot.

3.5 Proyecciones a futuro para el maíz.

Dado que las variables climáticas analizadas en el caso del maíz son las mismas que en la soja, las proyecciones a futuro son las mismas ya mostradas en el análisis anterior. Respecto del rendimiento del maíz, la serie temporal original de datos de rendimiento se muestra en la Figura 22, donde a diferencia del caso de la Soja, la pendiente es positiva. Esto indica que, bajo las mismas condiciones que hasta ahora, sería de esperar que el rendimiento a futuro se incrementara.

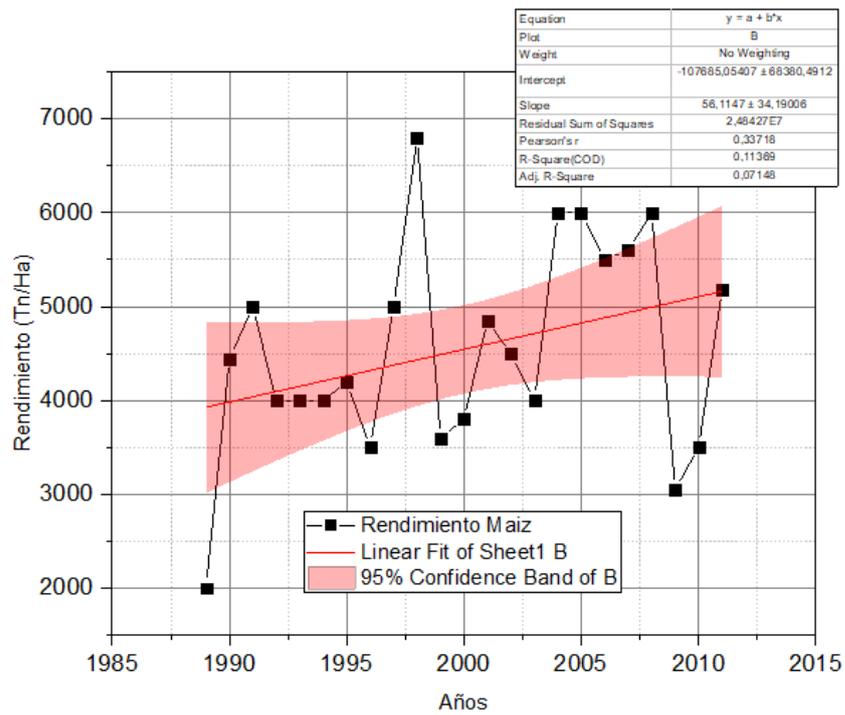


Figura 22. Tendencia de la serie original de datos de maíz

Este rendimiento a futuro se puede evaluar al igual que la soja considerando las proyecciones a futuro de la serie original de datos, o bien utilizando la ecuación de regresión 3. La Figura 23 muestra las proyecciones a futuro del rendimiento de maíz por medio del ARIMA basadas en la serie original de datos.

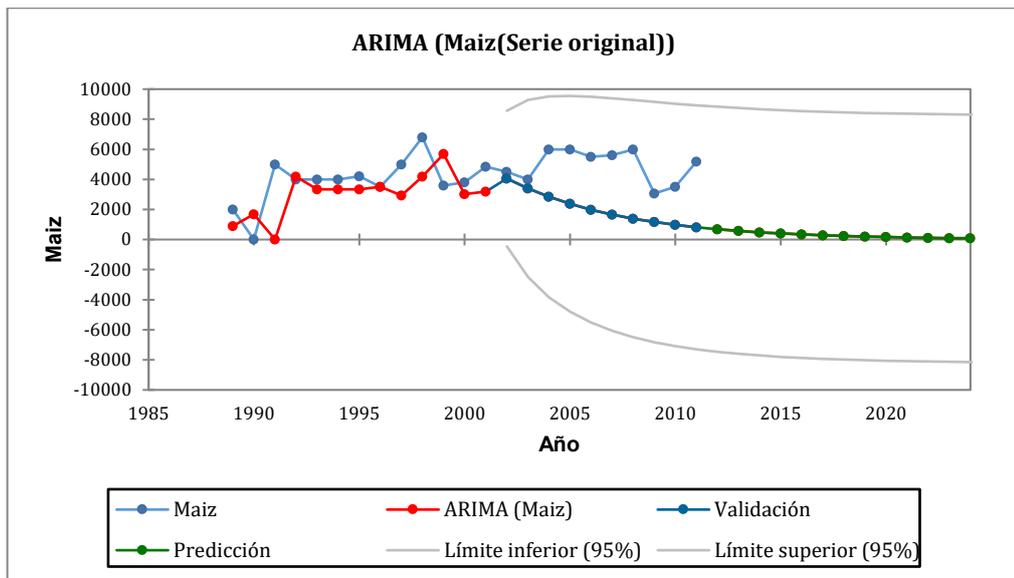


Figura 23. Proyecciones hasta el 2024 de las series de datos originales de maíz con ARIMA.

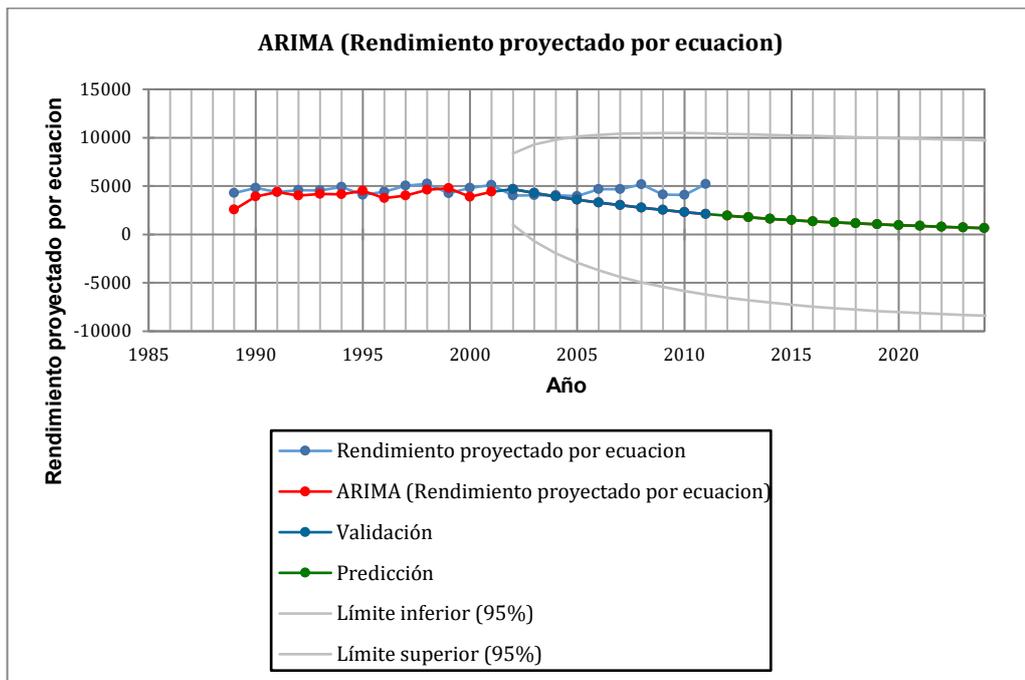


Figura 24. Rendimiento proyectado hasta el 2024 del maíz por ARIMA a la ecuación de regresión múltiple

Año	Proyección Rendimiento serie original	Proyección Rendimiento ecuación
2012	756,535	1936,921
2013	678,636	1772,981
2014	608,759	1622,917

2015	546,076	1485,554
2016	489,848	1359,817
2017	439,409	1244,723
2018	394,164	1139,370
2019	353,578	1042,934
2020	317,171	954,661
2021	284,513	873,859
2022	255,217	799,896
2023	228,938	732,193
2024	205,365	670,221

Tabla 15. Valores proyectados del rendimiento de Maiz a partir de la ecuación 3 por ARIMA y serie original.

Conclusiones

En los últimos años el impacto del cambio climático ha sido producto de estudio no sólo por sus efectos a nivel atmosférico sino también por su importancia en el desarrollo y evolución de las economías nacionales y regionales. Como se mencionó al inicio de este trabajo, el cambio climático altera la dinámica natural de la atmósfera e impacta en la

variabilidad del clima, afectando directamente todos los aspectos vinculados con el desarrollo social, económico, ambiental y cultural a una escala global y local. De estos impactos, quizá uno de los más relevantes es el relacionado con la seguridad alimentaria. Según la ONU, el mundo necesitará producir casi tres veces más de víveres para alimentar los 9.600 millones de personas que tendrá en el año 2050 el planeta tierra. Parte importante de esa población se encuentra ubicada en América Latina y es vulnerable al Cambio Climático. Argentina tiene la capacidad de producir alimento para 440 millones de personas y los cultivos de soja y maíz son las principales fuentes de ingresos del sector ya que su alto contenido proteico y energético respectivamente, los convierten en fuentes de alimentación muy importantes. La producción de ambas especies se encuentra distribuida en gran parte del país, pero principalmente se cultivan en las provincias de Buenos Aires, Santa Fe y Córdoba. En este trabajo final de graduación se estudió el posible impacto del clima en los cultivos de soja y maíz en el partido de Coronel Suárez. Para ello, se analizaron los comportamientos de las variables climáticas seleccionadas se consideraron las variables temperatura (media, mínima y máxima), humedad, horas de sol, precipitaciones y evapotranspiración del suelo y su posible correlación con los rendimientos de los cultivos seleccionados.

Los datos analizados correspondieron al periodo que comprende desde la campaña 1988-1989 hasta la campaña 2010-2011 obtenidos a partir de la estación meteorológica ubicada en Coronel Suárez. Las proyecciones a futuro de esas variables así como de la producción, se evaluaron a partir del programa ARIMA, hasta el año 2025 inclusive. Finalmente se utilizó análisis de componentes principales para corroborar la tendencia obtenida en los puntos anteriores.

De los resultados obtenidos en el trabajo, se puede observar que las variables climáticas en general presentan a futuro una tendencia a permanecer estables en Coronel Suárez, salvo las precipitaciones y la evapotranspiración que mostraron una leve tendencia decreciente.

Del análisis de correlación lineal, se pudo observar que el grado de dependencia entre cada variables y los respectivos rendimientos de los cultivos, no es alto. En todos los casos el coeficiente de correlación lineal mostrado en las Tablas 7 y 12, arrojó un número inferior 7.

Posteriormente, se propuso una regresión múltiple para expresar el rendimiento de los cultivos como polinomio en función de todas las variables analizadas y se obtuvo tanto para la soja como el maíz, una primera ecuación de primer orden, con un rango de confianza del orden del 90%. En el caso de la soja, la ecuación muestra que el rendimiento del cultivo puede ser expresado como combinación lineal de la temperatura mínima y media, las precipitaciones, la humedad relativa y la evapotranspiración,

mientras que para el maíz, las variables independientes fueron la temperatura mínima y la humedad relativa. En ambos casos la ecuación también mostró un coeficiente de correlación bajo al igual que con cada variable por separado. Para corroborar esta relación, se realizó un análisis de componentes principales. A partir de este análisis se pudo establecer que alrededor del 50% de la varianza entre los cultivos y las variables puede ser explicada por medio de dos componentes principales. Finalmente se utilizó el programa Arima para proyectar el comportamiento a futuro del rendimiento de los cultivos, considerando las proyecciones de las variables climáticas de las cuales cada rendimiento es dependiente. En este caso se pudo apreciar que dada la evolución de las variables climáticas hasta el año 2025, tanto el rendimiento de la soja como el maíz tendrán un muy leve impacto negativo. Esto implicaría que el cambio climático, con su consecuente modificación en los parámetros ambientales, no va a influir de gran manera en el crecimiento y desarrollo de ambos cultivos en el partido de Coronel Suarez. Este resultado preliminar podría sugerir que el avance que se implementó en tecnología de insumos y tecnología de procesos en el sector agrícola en los últimos 30 años contribuye de forma notoria al rendimiento de los cultivos, aun cuando las condiciones ambientales naturales puedan verse levemente modificadas. El progreso observado en avances biotecnológicos en semillas y en fertilizantes, la modernización de la maquinaria agrícola y la implementación de nuevos agroquímicos, son algunos de los avances adoptados por el productor, que han aumentado la influencia de la tecnología en el rendimiento aún bajo climáticas condiciones poco favorables. Ahora bien, estos resultados deben considerarse preliminares por diferentes factores. Por otro lado, la cantidad de campañas analizadas parecerían escasas para poder concluir el efecto del clima en los cultivos. Para obtener resultados con un mayor grado de confianza, el análisis debe contar con series de datos de no menos de treinta años. En este caso particular, si bien los datos utilizados fueron de carácter público y confiable, obtenidos de la Secretaria de Agroindustria de la Nación y del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), pero lamentablemente, no se obtuvieron datos previos a la campaña 88 – 89'. A pesar de que algunos datos de precipitaciones y humedad relativa si se encontraban disponibles, no sucedió lo mismo con los datos de temperaturas máximas, medias, mínimas y de horas de sol. Al no encontrar estos valores, se decidió realizar el análisis a partir de la campaña 88 – 89, donde se tenía datos de todas las variables en estudio. De esta forma, la cantidad de campañas analizadas fueron 23. Un número mayor de campañas consideradas en el análisis puede no sólo brindar información con mayor certidumbre del comportamiento y evolución de cada variable en sí misma a futuro, sino que además aportaría mayor información al utilizar el ARIMA. Otro factor importante a considerar es el hecho de que los datos obtenidos de las variables climáticas se encuentran cuantificados

en series anuales, mientras que los datos de rendimiento obtenidos de los cultivos corresponden a una campaña, es decir dos años de estudio. Los cultivos al sembrarse un año y cosecharse al año siguiente, se ven influenciados por los datos de las variables de ambos años. Con siembras que comienzan en septiembre para maíz y en octubre para la soja en la zona y con cosechas que se distribuyen en Abril – Mayo para la soja, y Abril – Mayo – Junio para los maíces tempranos y hasta Julio para los maíces tardíos, los cultivos se ven influenciados por condiciones de las variables de dos años. Por ejemplo, el caso de la campaña 97 – 98, se pueden observar que en el año 97 hubieron abultadas lluvias (885.45 mm) en comparación con las medidas en el año 1998 (280 mm). Las lluvias de 1997 fueron muy significativas para el cultivo cosechado en 1998, significando buenas lluvias para la siembra y emergencia del cultivo. Al año siguiente, con el cultivo ya definido, las lluvias cesaron y permitieron una cosecha segura y efectiva, logrando así grandes rindes para la zona.

Por lo anteriormente expuesto, se deduce que un mayor número de series de datos contemplados, tanto anuales como estacionales podrían brindar una información más detallada del futuro impacto del rendimiento de los cultivos e incluso permitirían estimar proyecciones a futuro para años posteriores al 2025.

Capítulo 5

5. Bibliografía

Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2008). Los impactos del cambio climático sobre las comunidades campesinas y de agricultores tradicionales y sus respuestas adaptativas. *Agroecología*, 3(7), 7-23.

Agroindustria. Los cultivos transgénicos en Argentina y en el mundo. Datos estadísticos de adopción de cultivos GM 2014/2015.

Aguado-Rodríguez, G. J., Quevedo-Nolasco, A., Castro-Popoca, M., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M. A., & Zamora-Morales, B. P. (2016). Predicción de variables meteorológicas por medio de modelos ARIMA. *Agrociencia*, 50(1), México.

Báez, J. C., Pascual-Alayón, P., Ramos, M. L., & Abascal, F. J. Túnidos tropicales, seguridad alimentaria y cambio climático (2018)

Bazzaz F. and Sombroek W. (1995). Changements du climat et production agricole. FAO. Rome et Polytechnica. Paris. 472 pp.

- Berlato, M.A., Fontana, D. C. 1999.** Variabilidade interanual da precipitação pluvial e rendimento da soja no Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 7(1):119-125.
- Berlato, M.A., Fontana D. C. 2003.** El Niño e la Niña: Impactos no clima, na vegetação e na agricultura Do Ríó Grande Do Sul; aplicações de previsões climáticas na agricultura. Porto Alegre: Ed. da UFRGS pp. 110.
- Capurro Maria (2009).** Efectos del fenómeno ENOS (El niño oscilación Sur) sobre los rendimientos de Soja (*Glycine max*) en Brasil. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía.
- Conde-Álvarez, C., & Saldaña-Zorrilla, S. (2007).** Cambio climático en América Latina y el Caribe: impactos, vulnerabilidad y adaptación. *Ambiente y desarrollo*, 23(2), 23-30
- Cruzate G. A., and Casas R. (2009).** Extracción de nutrientes en la agricultura argentina. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur (IPNI)*, 44, 21-26.).
- de la Casa, A. C., & Ovando, G. G. (2006).** Influencia de episodios El Niño-Oscilación Sur (ENOS) sobre la precipitación y el rendimiento de maíz en la provincia de Córdoba, Argentina. *Agricultura Técnica*, 66(1), 80-89.
- Downing T. E. (1996).** Climate change and world food security. NATOASI Series I: Global environmental change 37, Springer, Berlin, 662 pp.
- FAOSTAT. 2007.** Datos disponibles en <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567>. Último acceso en junio de 2008
- FAO. (2015).** Directrices voluntarias para lograr la sostenibilidad de la pesca en pequeña escala en el contexto de la seguridad alimentaria y la erradicación de la pobreza. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación:<http://www.fao.org/cofi/42019-067220930ec966ce487c78770ac854ab5.pdf>
- FAO, 2016.** Retos para el uso sostenible de los recursos naturales, la gestión de riesgos y la adaptación al cambio climático en América Latina y el Caribe dentro del nuevo marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Conferencia Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Trigésima Cuarta Sesión. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación: <http://www.fao.org/3/a-mp447s.pdf>
- FAO (2018).** Cambio climático y seguridad alimentaria y nutricional América Latina y el Caribe (gestión del riesgo de desastres en el sector agrícola) I8014ES/1/01.18
- Feo O., Solano, E., Beingolea L., Aparicio M. Villagra M., José Prieto M., and Beckmann J. (2009).** Cambio climático y salud en la región andina. *Revista peruana de Medicina experimental y Salud pública*, 26(1), 83-92.
- GRAU, R; M AIDE & I GASPARRI. 2005.** Globalization and soybean expansion into semiarid ecosystems of Argentina. *Ambio*34:265-266

- Fischer, G., Shah, M., Tubiello, F. N., & Van Velhuizen, H. (2005).** Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990–2080. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 360(1463), 2067-2083.
- Freckleton R.P., Watrison A.R., D.J. Webb and T.H. Thomas, (1999).** Yield of sugar beet in relation to weather and nutrients. *Agric. For. Meteorol.* 93(1), 35-5.
- Herrán, C. (2012).** *El cambio climático y sus consecuencias para América Latina.* Friedrich-Ebert-Stiftung.
- Honty, G. (2007).** América Latina ante el cambio climático. *AMÉRICA LATINA.*
- IPCC (2001).** Cambio climático 2001: La base científica. Contribución del Grupo de Trabajo I al Tercer Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático. J.T. Houghton y Ding Yihui, eds. Cambridge: Cambridge University Press; IPCC (WGI). 2000. Informe especial sobre escenarios de emisiones. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC-WGII (2007).** Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers. 18 pp
- IPCC (2007).** Climate change, the physical science basis: *Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC* (Vol. 4). Cambridge University Press
- IPCC (2014).** Cambio climático 2014: Informe de síntesis de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del IPCC, [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza
- Kane, R. P. 2001.** Interrelationship and ENSO Relationship of Fortaleza Rainfall in different seasons. *Brazilian Journal of Geophysics*, 19(2):199-214.
- Kaufman R.K. and Snell S.E., (1997).** A biophysical model of corm yield: integrating climate and social determinants. *Am. J. Ecom.* 79, 178-190.
- Kay, B. D. (1990).** Rates of change of soil structure under different cropping systems. In *Advances in Soil Science 12* (pp. 1-52). Springer, New York, NY.
- Kumar, M. (2016).** Impact of climate change on crop yield and role of model for achieving food security. *Environmental monitoring and assessment*, 188(8), 465.
- Magrin G.O. and Travasso M. I. (2002),** “An Integrated Climate Change Assessment from Argentina” (Chapter 10) In: *Effects of Climate Change and Variability on Agricultural Production Systems.* Otto Doering III; J.C.Randolph; J.Southworth and R.A.Pfeifer (Eds). Kluwer Academic Publishers, Boston. pp 193-219.
- Magrin Graciela, Travasso M.I., López G.M., Rodríguez G.R., Lloveras A. R. (2007),** Vulnerabilidad de la Producción Agrícola en la Región Pampeana Argentina. 2da

Comunicación Nacional sobre Cambio Climático a la UNFCCC. Disponible en línea: www.ambiente.gov.ar

Marini M. F. (2008). El avance de la frontera agrícola en el área adyacente al sistema Sierras de la Ventana (Buenos Aires, Argentina). *Investigaciones geográficas*, (47), 111-121.

Martínez, R., Palma, A., Atalah, E., & Pinheiro, A. C. (2009). Inseguridad alimentaria y nutricional en América Latina y el Caribe.

MacColl, D. (1989). Studies on maize (*Zea mays*) at Bunda, Malawi. II. Yield in short rotations with legumes. *Experimental Agriculture*, 25(3), 367-374.

Nelson G. C. (2009). *CAMBIO CLIMÁTICO, El impacto en la agricultura y los costos de adaptación* (No. 33708 caja (566)). IFPRI

Ortiz, R. (2012). El cambio climático y la producción agrícola. *Banco Interamericano de Desarrollo*, pp. 6-31

Parry M., Rosenzweig C. and Livermore M. (2005). Climate change, global food supply and risk of hunger. *Phil. Trans. R. Soc. B* 360, 2125-2138.

Rosenzweig C, Parry M.L. (1994) Potential impacts of climate change on world food supply. *Nature*. ; 367:133–138

Rosenzweig C., Iglesias A., Yang X.B., Epstein P.R. and Chivian E. (2001). Climate change and extreme weather events; implications for food production, plant diseases, and pests. *Global change and human health*, 2(2), 90-104.)

Rosenzweig C. and Hillel D. (2005). Global warming and agriculture. In *Perspectives in World Food and Agriculture, Volume 2* (J.A. Miranowski and C.G. Scanes, Eds.), pp. 183-209. Blackwell Publishing. Ames, Iowa.

Samaniego, J. (2009). Cambio climático y desarrollo en América Latina y el Caribe. Reseña 2009.CEPAL.

Satorre, E. H. (2005). Cambios tecnológicos en la agricultura argentina actual. *Ciencia hoy*, 15(87), 24-31.

Tebaldi, C., K. Hayhoe, J.M. Arblaster, and G.A. Meehl, 2006: Going to the extremes: An intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. *Clim. Change*, 79, 185-211

Trigo, E. 2005 Consecuencias económicas de la transformación agrícola. *Ciencia Hoy* 87:46-51

Wall, E.; Smit, B. 2005. Climate Change Adaptation in Light of Sustainable Agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture*. Vol 27 (1) 114-123.

Watson R., Zinyowera M. and R. Moss (1996). *Climate Change 1995 – Impacts, Adaptation and Mitigation of Climate Change. Contribution of WG II to the second Assessment Report of the IPCC*, Cambridge University Press, Cambridge.

Zapata, E., Jarvis, A., Ramírez, J., Lau, C. (2011). Potenciales impactos del cambio climático en cultivos Andinos. Serie panorama Andino sobre cambio climático. Decision and Policy Analysis Program (ADPA). CONDENSAN, SGCAN. Lima-Quito