

El valor de la información climática en los cultivos de Maíz y Soja. Analizando el impacto de escenarios de mediano y largo plazo sobre la producción y su resultado económico

Federico E. Bert

fbert@gro.uba.ar

Cátedra de Cereales, Facultad de Agronomía, UBA; Área de Tecnología, AACREA; CONICET

1. El clima y los agroecosistemas

La variabilidad climática es una de las principales fuentes de incertidumbre y riesgo en muchos sistemas agrícolas alrededor del mundo. En este sentido, la agricultura es una de las actividades humanas más dependiente y sensibles a las variaciones del clima. La vulnerabilidad de los sistemas agrícolas no es sólo consecuencia de la variabilidad temporal del clima, sino también de la imposibilidad de predecir completamente su comportamiento.

La variabilidad climática se manifiesta en un amplio rango de escalas de tiempo, desde semanas a siglos. En este artículo nos centraremos en analizar el impacto de la variabilidad climática asociada a dos escalas temporales relevantes para el manejo de recursos en los sistemas agrícolas: variabilidad inter-anual y variabilidad inter-decadal.

2. Variabilidad climática en la región pampeana

El fenómeno del **ENSO** (siglas en inglés de “*El Niño Southern Oscillation*”) es una fuente importante de variabilidad climática año a año en varias partes del mundo. Este fenómeno resulta de la interacción entre el mar y la atmósfera en el Océano Pacífico Tropical. El fenómeno ENSO se puede categorizar en dos fases extremas, según las temperaturas de la superficie del Océano Pacífico Tropical: eventos **cálidos ó El Niño** y eventos **fríos o La Niña**; los años que no se encuentran dentro de estas categorías se denominan Neutros. En la región pampeana, la señal más pronunciada del ENSO se manifiesta en el período octubre-diciembre. Durante los eventos El Niño, las precipitaciones tienden a ser superiores al promedio histórico, mientras que en los años La Niña tienden a ser inferiores. En los años Neutros las precipitaciones medias generalmente son similares al promedio histórico (los años Neutros constituyen alrededor del 50% del total de la serie histórica; más detalles en: Penalba 2003).

Además de las variaciones inter-anales, la región pampeana muestra una fuerte variabilidad climática inter-decadal. Durante la segunda mitad del siglo XX se observaron aumentos significativos de las precipitaciones y temperaturas mínimas y, por otro lado, disminuciones en las temperaturas máximas y radiación (Rusticucci y Penalba 2000; Minetti *et al.* 2003; Magrín *et al.* 2005). Estos cambios fueron particularmente durante los meses de primavera y verano. Hacia el final del artículo analizaremos el impacto de posibles escenarios climáticos futuros en los sistemas agrícolas pampeanos.

3. Pronósticos climáticos estacionales y toma de decisiones

La naturaleza caótica de la atmósfera impide predecir cómo se comportará ésta luego de algunos días. Por lo tanto, es imposible anticipar las condiciones climáticas para la próxima estación a través de la simple extensión del pronóstico del tiempo. Sin embargo, dado que se puede predecir el comportamiento de algunas variables del sistema climático (ej. temperaturas del océano, etc.), es posible anticipar tendencias generales para el clima en la próxima estación. Los pronósticos estacionales indican desviaciones respecto a una distribución de probabilidad esperada. Por ejemplo, el registro de lluvias en los meses de verano en Pergamino tiene una distribución característica (un determinado promedio, variabilidad). Cuando se esperan condiciones climáticas distintas (ej. asociadas a una fase del ENSO), la distribución de valores esperados cambia, pudiendo ser, por ejemplo, los valores más bajos más probables que lo habitual.

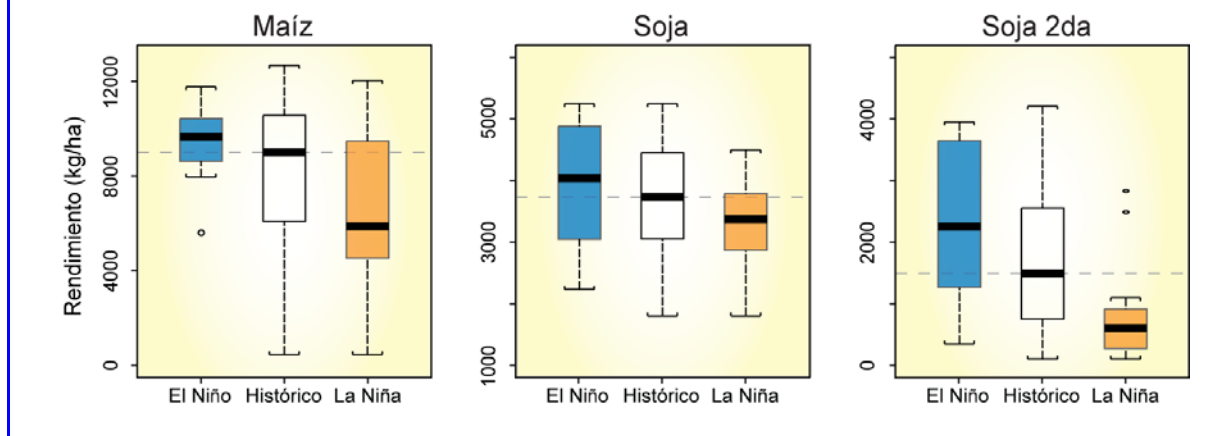
Durante las décadas pasadas ha **mejorado significativamente la capacidad de predecir** las variaciones año a año del clima. Los avances en la generación de pronósticos fueron posibles gracias a que se profundizó el conocimiento del sistema climático permitiendo el desarrollo de nuevos y mejores modelos climáticos y, a la creciente capacidad de monitorear la evolución del sistema climático por medio de instrumentos a bordo de boyas, satélites y otros medios. Esta predictibilidad está fuertemente asociada a la circulación de la atmósfera tropical y es principalmente dependiente de las anomalías asociadas con el fenómeno ENSO. El fenómeno ENSO no es el único responsable de las variaciones climáticas en la región pampeana, sin embargo, puede ser de suma importancia para la planificación agrícola ya que constituye la principal fuente de predictibilidad en la región.

La disponibilidad de pronósticos asociados al ENSO brinda el potencial para reducir la vulnerabilidad de los sistemas agrícolas a las variaciones del clima. El hecho de conocer qué condiciones climáticas son más probables para el próximo ciclo de producción, permitiría ajustar el manejo del sistema para aprovechar condiciones esperadas favorables o para atenuar impactos negativos de condiciones desfavorables. A continuación se muestran algunas oportunidades para obtener beneficios de los pronósticos climáticos.

4. Oportunidades para el uso de pronósticos estacionales y valor de la información climática

Las señales **climáticas del ENSO** se manifiestan en **cambios en el rendimiento de los cultivos**. Un estudio realizado por Podestá *et al.* (1999) sobre registros de rendimientos (SAGPyA) a nivel nacional muestra incrementos en los rendimientos de maíz y sorgo durante las fases Niño y disminuciones durante La Niña. Para ambos cultivos la depresión en los rendimientos en La Niña es, en promedio, más pronunciada y menos variable que el aumento de rendimientos en El Niño. Asimismo, para el cultivo de soja, se observan reducciones de rendimiento durante los años La Niña y leves incrementos en El Niño. Aunque en trigo no se detectan cambios de rendimientos entre las diferentes fases del ENSO, los efectos pueden ser muy importantes en la soja de 2^{da}. La Figura 1 muestra rendimientos simulados de maíz, soja y soja de 2^{da} para las distintas fases del ENSO en la localidad de Pergamino. Aunque los efectos son similares en toda la región pampeana, puede observarse cierta variabilidad espacial en el impacto de las fases del ENSO en el rendimiento de los cultivos (Magrín *et al.* 1998).

Figura 1. Diagrama de cajas de los rendimientos simulados para maíz, soja y soja de 2^{da} en Pergamino para el escenario histórico (registro climático de Pergamino; 1931-2005) y las fases extremas del ENSO. La línea negra dentro de la caja representa la mediana y el extremo superior (inferior) el percentil 75(25).

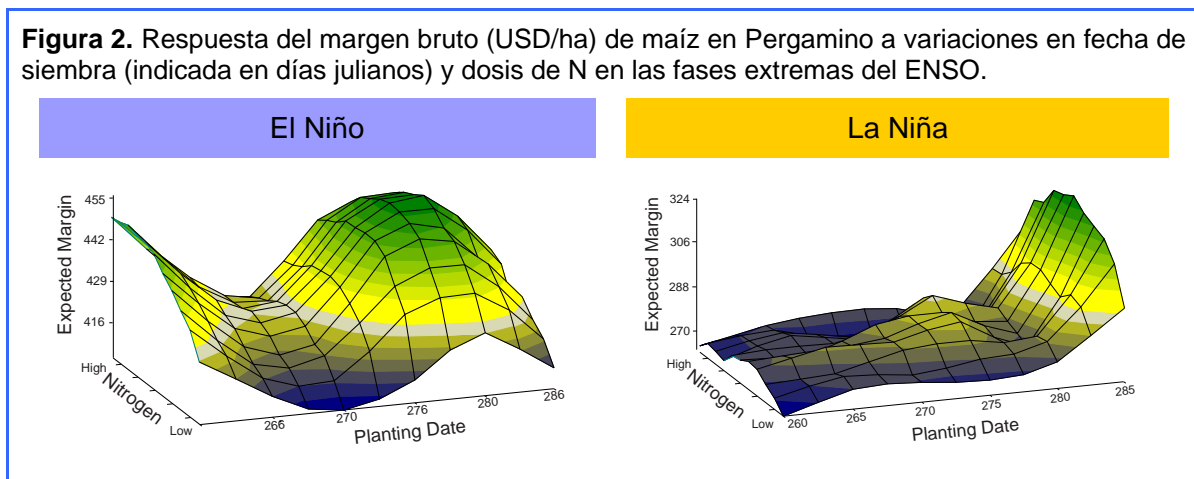


Las **señales climáticas del ENSO** también determinan diferencias a nivel del **manejo de los cultivos**. Los modelos de simulación son herramientas indispensables para evaluar alternativas de manejo y escenarios climáticos, dado que la realización de experimentos a campo sería extremadamente costosa y requeriría demasiado tiempo. El Cuadro 1 muestra un ejemplo para soja de primera en Pergamino, donde se simuló el rendimiento de dos genotipos y cuatro fechas de siembra para toda la serie histórica primero (1931-2005), y para cada fase del ENSO por separado después. Los resultados muestran claras ventajas de utilizar genotipos de ciclo más corto sembrados temprano durante El Niño, y genotipos de ciclo más largo sembrados tarde en La Niña. La estrategia de genotipo largo y siembra tardía en La Niña permite retrasar los periodos críticos de generación de rendimiento hacia momentos donde la señal adversa de La Niña se torna más débil (enero-febrero; Podestá *et al.* 1999).

Cuadro 1. Rendimiento promedio (Ton/ha) de distintas estrategias de manejo de soja en las fases del ENSO en Pergamino.

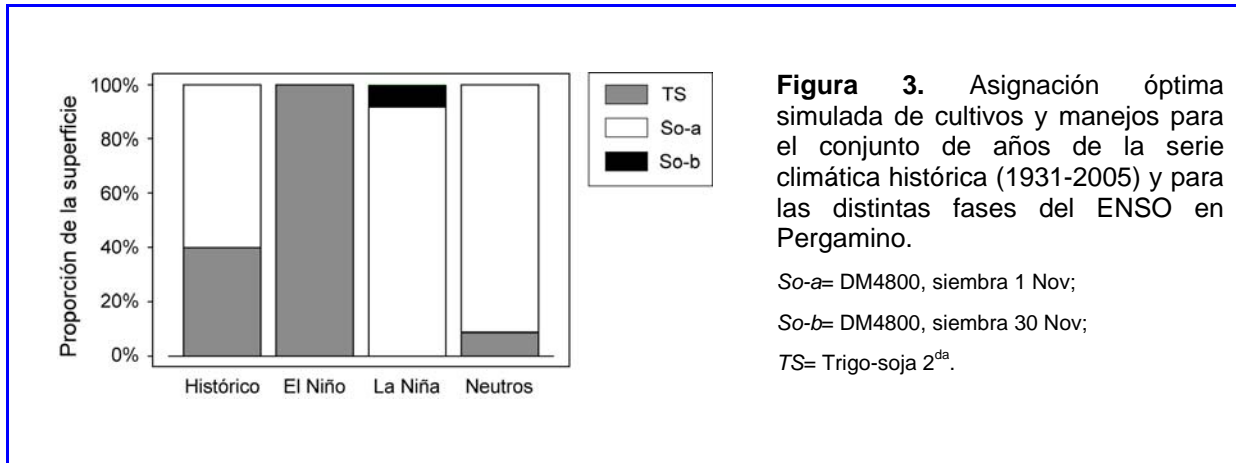
Var	FS	Histórico	El Niño	La Niña
DM3700	15 Oct	3.76	4.00	3.12
	1 Nov	3.78	3.91	3.31
	15 Nov	3.77	3.82	3.46
	30 Nov	3.78	3.75	3.63
DM 4800	15 Oct	3.60	3.82	3.00
	1 Nov	3.71	3.84	3.25
	15 Nov	3.77	3.83	3.47
	30 Nov	3.78	3.76	3.64

La Figura 2 muestra otro ejemplo de diferencias entre estrategias de manejo para las fases del ENSO, aunque ahora para maíz. Se simuló el rendimiento (y luego se calculó el margen bruto) en función de diferentes fechas de siembra y dosis de fertilización con N para las fases extremas del ENSO en Pergamino (Figura 2). Para El Niño, se observan ventajas de utilizar siembras tempranas y dosis altas de fertilización, aunque también se obtienen altos márgenes con fechas normales-tardías y dosis intermedias de N. En las Niñas son evidentes los beneficios de retrasar la fecha de siembra y no hay ventajas claras al incrementar la dosis de N. Al igual que para la soja, el retraso de la fecha de siembra de maíz en La Niña permite desplazar el período crítico hacia momentos en donde el balance hídrico es menos desfavorable.

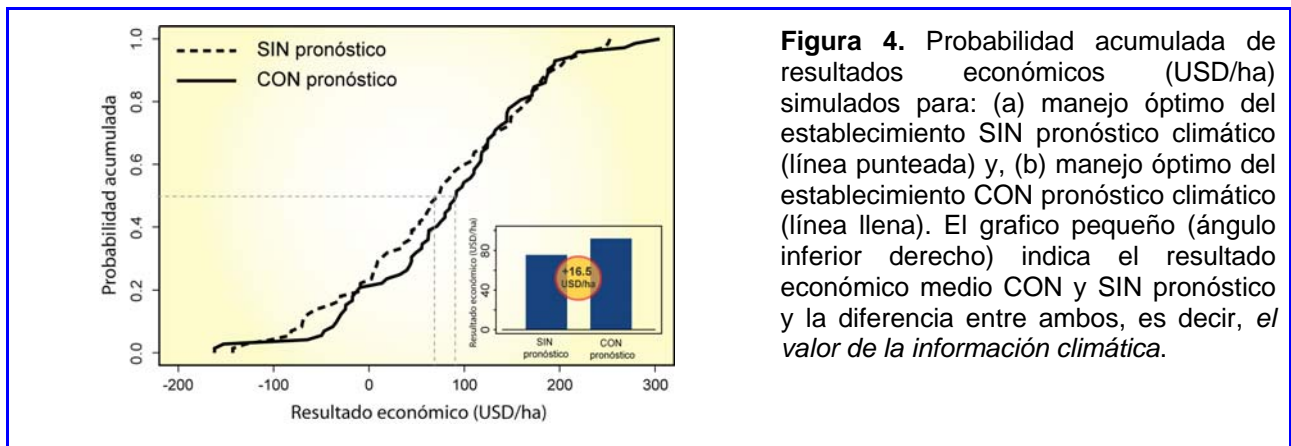


La **respuesta diferencial de los cultivos y manejos de los cultivos** a las fases del ENSO permite **adaptar el manejo del sistema** al escenario climático esperado. De esta manera, se podría modificar la superficie asignada a cada cultivo en el establecimiento o el manejo de los mismos para mejorar el manejo del riesgo climático. La Figura 3 muestra el manejo óptimo simulado¹ para un establecimiento hipotético en Pergamino para distintos escenarios climáticos. Los resultados muestran que el área dedicada a cada cultivo y el manejo de cada cultivo varía entre los escenarios climáticos. Para el escenario histórico (es decir considerando toda la serie climática de Pergamino) el manejo óptimo simulado incluyó 60% de soja, y 40% de trigo-soja 2^{da}. Sin embargo, en El Niño, la decisión óptima cambió a 100% de trigo-soja 2^{da}, dado el incremento de rendimientos de soja de 2^{da} asociados a las condiciones favorables de El Niño (Figura 1). Contrariamente, en La Niña, la asignación óptima incluyó 100% de soja, aunque con dos manejos diferentes: 90% de soja en siembra temprana (So-a) y el resto en siembra tardía (So-b). Como vemos, en La Niña desaparece el doble cultivo-trigo soja debido a las notables disminuciones de rendimientos de la soja de 2^{da} en esta fase (Figura 1). Asimismo, aparece una pequeña proporción de soja en siembra tardía, dados los beneficios de este manejo en La Niñas (Cuadro 1).

¹ Tradicionalmente se han utilizado modelos de decisión (que describen las preferencias de los individuos frente a resultados posibles de sus decisiones) para evaluar decisiones óptimas en respuesta a los pronósticos. Estos modelos de decisión se representan por funciones llamadas “funciones objetivo” que, mediante un proceso de optimización, resultan en decisiones óptimas (en este caso asignación de superficies a cultivos -manejos). En este trabajo se optimizó la función de utilidad esperada.



El hecho de que pueda adaptarse el manejo del sistema (proporción de cultivos y manejos) en respuesta a las expectativas climáticas y, de esta manera, obtener mejores resultados (ej. rendimientos) indica que es posible obtener **valor económico a partir de la información climática**. Usualmente, los economistas definen el valor de la información como la diferencia entre: (a) los resultados de decisiones tomadas con información (en este caso pronósticos) y, (b) los resultados de decisiones tomadas sin información (en este caso los valores históricos o “climatológicos”). Siguiendo con el ejemplo para Pergamino, la Figura 4 muestra la probabilidad acumulada de los resultados económicos simulados en base al manejo óptimo SIN el uso del pronóstico climático y CON el uso del mismo (Figura 3). La curva correspondiente al manejo CON pronóstico se encuentra desplazada hacia la derecha, indicando una mejora de los resultados económicos. Pero además, el uso del pronóstico permite disminuir la probabilidad de resultados económicos negativos (ej. -50 USD/ha) y permite incrementar el resultado económico máximo. La figura pequeña en el ángulo inferior derecho indica el resultado económico promedio sin usar y usando pronóstico. Para el caso evaluado (Pergamino, precios promedio de cultivos, etc.) el valor de la información climática asciende a 16.5 USD/ha. Pero, como mostraron otros estudios (Messina *et al.* 1999; Magrín y Travasso 2001), el valor de la información climática puede variar entre localidades. Por ejemplo, para lugares con condiciones agro-ecológicas relativamente marginales como podría ser el extremo noroeste de la región pampeana (ej. Pilar, Córdoba) el valor de la información climática puede alcanzar los 45 USD/ha.



5. Algunas restricciones para el uso de pronósticos estacionales:

Aunque los pronósticos han mejorado mucho, aun contienen un importante nivel de incertidumbre que constituye una limitante importante para su uso. Los pronósticos asociados al ENSO incluyen dos fuentes de incertidumbre: En primer lugar, la incertidumbre asociada a la predicción del fenómeno, lo que usualmente se llama habilidad o acierto de los pronósticos (ej.: que se anticipe Niño y ocurra Neutro). En segundo lugar, la incertidumbre asociada a la alta variabilidad observada dentro de cada fase (ej.: no todas las fases son iguales, varían en inicio, intensidad y duración). En los párrafos siguientes vamos a describir a través de algunos ejemplos el impacto de estas dos fuentes de incertidumbre asociadas a los pronósticos ENSO.

Actualmente, puede pronosticarse la ocurrencia de fases extremas del ENSO con moderada precisión y con un año o más de anticipación (Goddard *et al.* 2001). Sin embargo, los pronósticos tienen asociadas probabilidades y no necesariamente el estado (ej. El Niño) más probable de ocurrir es el que ocurrirá. De esta manera, puede tomarse una buena decisión en base al pronóstico disponible, pero si las condiciones pronosticadas no ocurren puede obtenerse un mal resultado. El Cuadro 2 muestra el margen bruto promedio simulado para distintas estrategias de manejo de soja en el escenario histórico y en las fases extremas del ENSO en Pergamino. Veamos, en base al Cuadro 2, un ejemplo del costo asociado a un pronóstico equivocado. Si se pronostica una Niña (y ocurre Niña) y el decisor no considera el pronóstico (es decir realiza el manejo “sin pronóstico”, basado en la climatología) obtiene 296 USD/ha. En cambio, si el decisor responde al pronóstico Niña (es decir, realiza un manejo acorde al pronóstico: ej. retrasar fecha de siembra; Cuadro 1) y ocurre una Niña obtiene 346 USD/ha, es decir un extra de 50 USD/ha por usar el pronóstico. Pero si el decisor usa el pronóstico Niña en sus decisiones, y luego el pronóstico es erróneo y ocurre un Niño obtiene 362 USD/ha. El pronóstico erróneo lo lleva a obtener 11 USD/ha menos de lo que hubiese obtenido sin usar el mismo y 31 USD/ha menos de lo que hubiese tenido con un pronóstico correcto (que anticipe El Niño). Como vemos, la incertidumbre de los pronósticos impacta de manera directa en el valor de la información climática. Por ejemplo, considerando un pronóstico con una habilidad del 70% (del total de veces que se pronostica Niño, el 70% ocurre Niño y resto otra fase) en las simulaciones para Pergamino, el valor de la información disminuye desde 16 a menos de 5 USD/ha.

Cuadro 2. Margen bruto promedio (USD/ha) en Pergamino de estrategias óptimas de manejo de soja (*definidas en base al escenario pronosticado*) en las fases extremas del ENSO y en el escenario histórico (climatología).

		Escenario ocurrido		
		El Niño	Climatología ³	La Niña
Escenario pronosticado ¹	El Niño → Manejo Niño	393	387	279
	Sin pronóstico ²	373	374	296
	La Niña → Manejo Niña	362	373	346

¹ El escenario pronosticado **determina el tipo de manejo que se realizará**. Es decir, si se pronostica un Niño, el manejo que se realiza es el óptimo para un Niño.

² **Sin pronóstico** indica que el manejo se basa en la **climatología** (es decir en los registros climáticos históricos).

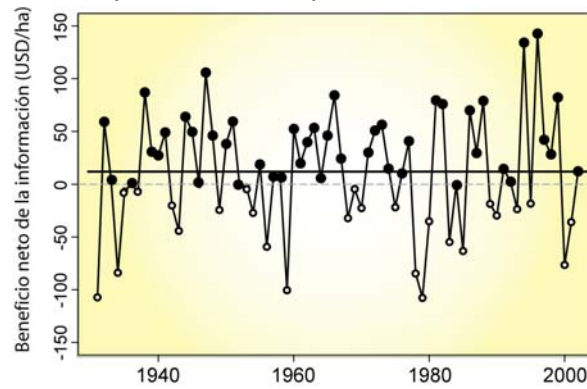
³ Climatología indica que ocurrió un escenario climático promedio.

La incertidumbre asociada a la variabilidad dentro de cada fase tiene un efecto análogo al de un pronóstico erróneo. De esta manera, aunque el pronóstico sea perfecto (es decir, 100% acertado) el uso del mismo puede llevar, en situaciones puntuales, a menores resultados (respecto de haberlo ignorado). Un ejemplo de esto puede darse por haber definido el manejo

del establecimiento (cultivos-manejos) en base a un pronóstico de condiciones El Niño y que luego ocurra un Niño, pero anormalmente seco. La Figura 5, muestra la secuencia de beneficio económico resultante del uso de pronósticos (perfectos) en la definición del manejo del establecimiento. Aunque en la mayoría de los años (60%) el uso del pronóstico permite un mejor resultado económico, hay casos en los que esto no ocurre dada la variabilidad dentro de las fases. De esta manera, si bien en promedio (en el largo plazo) el uso de la información climática deriva en beneficios económicos, no debemos perder de vista que la **incertidumbre** de la misma puede llevar a **situaciones puntuales de pérdida**.

Finalmente, además de la incertidumbre de los pronósticos, existen otros numerosos factores que limitan el valor de los pronósticos climáticos. Por ejemplo, un establecimiento que mantiene un esquema de rotaciones determinado, tendrá flexibilidad limitada para modificar la combinación de cultivos en respuesta a un pronóstico. En las simulaciones realizadas en Pergamino, la restricción impuesta por las rotaciones disminuyó el valor de la información climática de 16 a menos de 2 USD/ha.

Figura 5. Beneficio neto simulado del uso de pronósticos climáticos asociados al ENSO para Pergamino. Los puntos llenos (vacíos) indican casos en el que el uso del pronóstico resultó en beneficios (pérdidas). La línea negra indica el promedio de los puntos.



6. Impactos de escenarios inter-decadales sobre la producción y su resultado económico

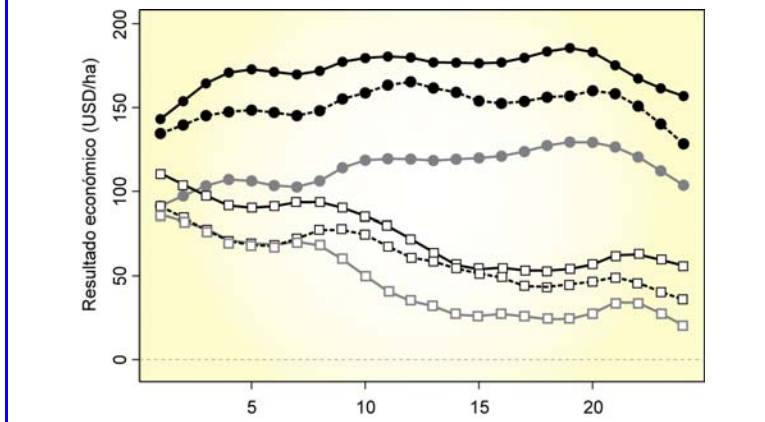
El aumento de precipitaciones observado en la región pampeana en la segunda mitad del siglo XX produjo incrementos en el rendimiento de los cultivos más importantes de la región (Magrín *et al.* 2005). De esta manera, las variaciones climáticas decadales, sumado a nuevas tecnologías de producción y cambios en el contexto económico, permitieron la expansión de la frontera agrícola e intensificación de la agricultura. Pero: *¿Cómo responderían los sistemas agrícolas que evolucionaron parcialmente en respuesta a un mejor clima si las condiciones climáticas se revierten a las épocas secas?*

La elevada incertidumbre de los modelos climáticos en la simulación de precipitaciones en el largo plazo impide anticipar con certeza tendencias para las próximas décadas. Sin embargo, resulta totalmente factible que cambios que ocurrieron en el pasado puedan repetirse o revertirse en un futuro. De esta manera, en base al análisis de la variabilidad decadal natural en la región pampeana se propuso (sin hacer juicio de valor acerca de la probabilidad de que

ocurra!) y evaluó² el impacto de un escenario climático plausible para los próximos 25 años: una **disminución de las precipitaciones** con una magnitud (tasa) similar al incremento observado desde los '50. Las evaluaciones se realizaron para dos lugares con características agro-ecológicas contrastantes en la región pampeana: Norte de Buenos Aires y Norte de Córdoba.

Los resultados de las simulaciones muestran que un escenario futuro de precipitaciones decrecientes no modificaría o incrementaría ligeramente los rendimientos de los cultivos en Pergamino, mientras que provocaría notables disminuciones de los rendimientos de soja y maíz en Pilar. En Pergamino la tendencia decreciente en las precipitaciones incrementaría, al final de la secuencia de 25 años, los rendimientos de soja, maíz y soja de 2^{da} en un 6.6, 4.5, y 1.0% respectivamente. En cambio, los rendimientos de trigo disminuirían 6.3%. En Pilar, en cambio, los rendimientos de soja, maíz y soja de 2^{da} se reducirían 27.7, 25.0 y 38.5% respectivamente. El rendimiento de trigo sería menos afectado por la tendencia propuesta (-7.0%) dado que los cambios en las precipitaciones ocurren principalmente en los meses de verano. Así, la realización de la tendencia decreciente tendría severos impactos negativos en el resultado económico de los principales cultivos en Pilar (Figura 5) y, como consecuencia, incrementarían notablemente los riesgos de producción (ej. probabilidad de pérdidas).

Figura 6. Resultado económico medio para soja (líneas llenas), maíz (líneas punteadas) y trigo-soja 2da (líneas grises) en Pergamino (círculos) y Pilar (cuadrados) a lo largo de la secuencia de 25 años de precipitaciones decrecientes.



7. Comentarios finales

A lo largo del resumen se mostraron evidencias de las ventajas de adaptar el manejo de los sistemas agrícolas (ej. combinación de cultivos, manejos de cultivos) en respuesta a información climática relacionada al fenómeno del ENSO. Sin embargo, aunque en promedio el uso de la información climática en la toma de decisiones resulte en beneficios, se mostraron algunas restricciones que limitan el valor de la misma. En relación a la variabilidad climática de largo plazo, se analizaron los impactos de un escenario climático futuro asociado a variabilidad

² El impacto de la tendencia decreciente de precipitaciones se evaluó mediante el uso de modelos de simulación de cultivos. Para la evaluación se utilizaron series climáticas sintéticas. Las series sintéticas se generan a través de procedimientos estadísticos y como resultado se obtienen nuevas realizaciones climáticas (que no ocurrieron pero podrían ocurrir) con características estadísticas similares a los registros reales. Se generaron múltiples realizaciones de la secuencia de 25 años de precipitaciones decrecientes que permitieron cuantificar el impacto del escenario.

climática inter-decadal. Los resultados alertan sobre la viabilidad de sistemas agrícolas relativamente marginales ante escenarios climáticos desfavorables (plausibles dada la variabilidad decadal pasada).

8. Bibliografía

- Magrín *et al.* (1998) Impacto del fenómeno “El Niño” sobre la producción de cultivos en la región pampeana. Boletín del Instituto de Clima y Agua, INTA, Buenos Aires, Argentina, 16 pp.
- Magrín GO, Travasso MI (2001) Economic value of ENSO-based Climatic Forecasts in the Agricultural Sector of Argentina. 2nd Int. Symposium “Modelling Cropping Systems”. Florence, Italia, pp 139–140.
- Magrín *et al.* (2005) Changes in climate and crops production during the 20th century in Argentina. *Climatic Change* **72**, 229–249.
- Messina *et al.* (1999) Land allocation conditioned on El Niño Southern Oscillation phases in the Pampas of Argentina. *Ag. Sys.* **60**, 197–212.
- Minetti *et al.* (2003) Non-linear trends and low frequency oscillation in annual precipitation over Argentina and Chile, 1931–1999. *Atmósfera* **16**, 119–135.
- Penalba OC, (2003) Predicciones climáticas: señales de impacto en al región pampeana. Suplemento especial revista CREA Nro 269.
- Podestá *et al.* (1999) Associations between grain crop yield in central–eastern Argentina and El Niño southern oscillation. *J. App. Meteorol.* **38**, 1488–1498.
- Rusticucci M, Penalba O (2000) Interdecadal changes in the precipitation seasonal cycle over Southern South America and their relationships with surface temperature. *Clim. Res.* **16**, 1–15.