

# Mapas de riesgo de déficit y excesos hídricos en los cultivos según escenarios de cambio climático





PROYECTO ADAPTACIÓN Y RESILIENCIA DE LA AGRICULTURA FAMILIAR DEL NORESTE  
DE LA ARGENTINA ANTE EL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y SU VARIABILIDAD

---

Documento producido por **German Heinzenknecht, Adriana Basualdo y Silvana Boragno**

---

2018

---



# contenidos

<b>01. Marco general del proyecto</b>	<b>pág 06</b>
<b>02. Introducción</b>	<b>pág 09</b>
<b>03. Los modelos de cambio climático</b>	<b>pág 13</b>
Características	pág 13
Limitaciones	pág 14
Evaluación y selección	pág 14
<b>04. Comprobación de los datos meteorológicos</b>	<b>pág 17</b>
Análisis de valores extremos	pág 17
Análisis de diferencias en los valores medios	pág 18
<b>05. Cálculo de riesgo de déficit y excesos hídricos</b>	<b>pág 19</b>
Parámetros edáficos	pág 19
Variables meteorológicas	pág 19
Parámetros agronómicos	pág 19
Metodología del balance hídrico	pág 20
Cálculo de probabilidades de déficit y de excesos hídricos	pág 20
<b>06. Resultados</b>	<b>pág 21</b>
Algodón	pág 23
Maíz	pág 37
Soja	pág 46
<b>07. Conclusiones</b>	<b>pág 49</b>
<b>08. Referencias</b>	<b>pág 51</b>



3CN-CC	Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático
BH	Balance Hídrico
CMIP3	Coupled Model Intercomparison Project 3
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project 5
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CRU	Climate Research Unit
DCC	Dirección de Cambio Climático
DIPROSE	Dirección General de Programas y Proyectos Sectoriales y Especiales
DIRV	Dirección del Viento
ENI	Entidad Nacional de Implementación de proyectos
ETP	Evapotranspiración Potencial
FA	Fondo de Adaptación
FC45	Futuro Cercano con escenario moderado
FC85	Futuro Cercano con escenario extremo
GEI	Gases de Efecto Invernadero
H8010	Histórico con serie de datos 1980-2010
HR	Humedad Relativa
INTA	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
INTV	Intensidad del Viento
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IUVM	Índice Único de Validación de Modelos
Kc	Constante de consumo hídrico del cultivo
MCG	Modelo Climático Global
MCR	Modelo Climático Regional
NEA	Noreste argentino
ORA	Oficina de Riesgo Agropecuario
PP	Precipitación
RCP4.5	Representative Concentration Pathways (moderate)
RCP8.5	Representative Concentration Pathways (extreme)
ROCent	Radiación de Onda Corta entrante
SAyDS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable
Tmax	Temperatura máxima
Tmin	Temperatura mínima

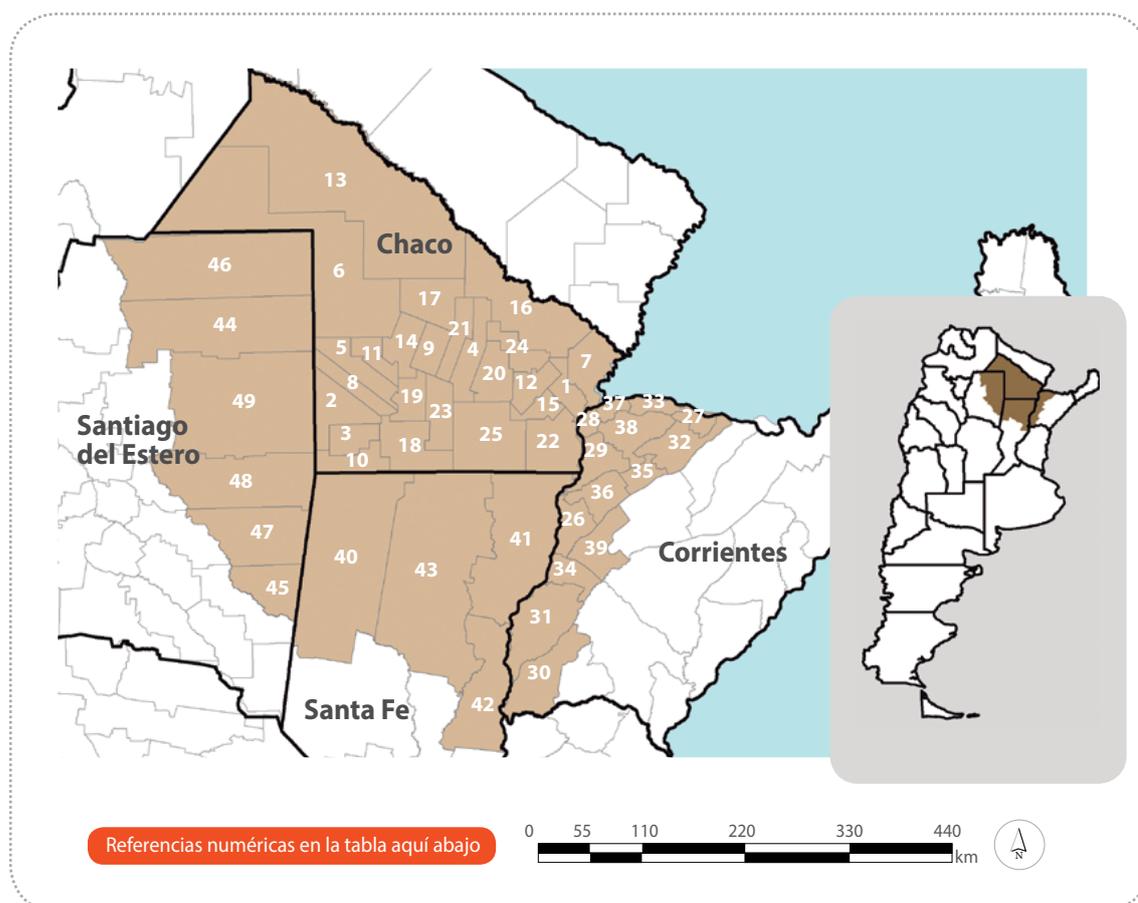
## Marco general del proyecto

El presente trabajo se ha realizado en el marco del **Proyecto de Adaptación y Resiliencia de la Agricultura Familiar del Noreste de Argentina ante el Impacto del Cambio Climático y su Variabilidad**, ejecutado por la Oficina de Riesgo Agropecuario (ORA) del Ministerio de Producción y Trabajo, Secretaría de Agroindustria; el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), organismo descentralizado de la Secretaría de Agroindustria, y la Dirección de Cambio Climático (DCC) de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. El consultor encargado de llevar a cabo esta investigación fue el Lic. Cs. Meteorológicas Germán Heinzenknecht, quien trabajó en equipo junto a la Lic. Adriana Basualdo y a la Lic. Silvana Boragno, ambas del staff de la ORA.

Este proyecto es financiado por el Fondo de Adaptación (FA) de la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC).

Su finalidad es aumentar la capacidad de adaptación de pequeños productores familiares a la variabilidad climática; fortalecer los sistemas de información, monitoreo y gestión de la información climática, y generar capacidades locales y regionales sobre el impacto del cambio climático y su variabilidad y en la implementación de medidas de adaptación. La comparación de riesgos actuales y previstos para el futuro en relación a la disponibilidad de agua para los cultivos de secano -llevada a cabo en este trabajo- se halla dentro de las actividades de generación de sistemas de información geográfica para el análisis dinámico de la vulnerabilidad y riesgo climático.

**Figura 1:** Área de intervención del Proyecto de Adaptación y Resiliencia de la Agricultura Familiar del Noreste de Argentina ante el Impacto del Cambio Climático y su Variabilidad



Provincia	Departamento	Código	Área [ has ]	Población		
				►Total	►Con NBI	►%
Chaco	1 de Mayo	1	129975	9130	2643	28,90
Chaco	12 de Octubre	2	289681	20105	7765	38,60
Chaco	2 de Abril	3	152522	7418	2757	37,20
Chaco	25 de Mayo	4	234769	28006	12886	46,00
Chaco	9 de Julio	5	219599	26878	9859	36,70
Chaco	Almirante Brown	6	1874672	29040	13110	45,10
Chaco	Bermejo	7	273848	24116	8228	34,10
Chaco	Chacabuco	8	155585	27664	7915	28,60
Chaco	Comandante Fernández	9	150285	87158	24969	28,60
Chaco	Fray Justo Santa María de Oro	10	181150	10419	4137	39,70
Chaco	Gral Belgrano	11	131098	10457	4933	47,20
Chaco	Gral Donovan	12	154567	13341	4752	35,60
Chaco	Gral Güemes	13	2645338	61936	33987	54,90
Chaco	Independencia	14	193244	20574	10014	48,70

Provincia	Departamento	Código	Área [ has ]	Población		
				►Total	►Con NBI	►%
Chaco	Libertad	15	101850	10767	3135	29,10
Chaco	Libertador Gral San Martín	16	739906	54288	24152	44,50
Chaco	Maipú	17	292419	24708	10724	43,40
Chaco	Mayor Luis J Fontana	18	331894	53341	17540	32,90
Chaco	O'higgins	19	156838	19207	9143	47,60
Chaco	Presidencia De La Plaza	20	222751	12183	4502	37,00
Chaco	Quitilipi	21	160737	32017	12555	39,20
Chaco	San Fernando	22	344134	362726	79329	21,90
Chaco	San Lorenzo	23	217393	14234	6449	45,30
Chaco	Sargento Cabral	24	160900	14989	6072	40,50
Chaco	Tapenaga	25	549720	4180	1798	43,00
Corrientes	Bella Vista	26	178915	35231	10901	30,90
Corrientes	Berón de Astrada	27	89289	2290	946	41,30
Corrientes	Capital	28	59765	326765	69228	21,20
Corrientes	Empedrado	29	205477	14657	5402	36,90
Corrientes	Esquina	30	397792	30197	11417	37,80
Corrientes	Goya	31	476342	86948	25192	29,00
Corrientes	Gral Paz	32	259018	14720	5433	36,90
Corrientes	Itatí	33	85760	8717	2473	28,40
Corrientes	Lavalle	34	148400	26206	10358	39,50
Corrientes	Mburucuyá	35	99387	8970	3585	40,00
Corrientes	Saladas	36	192210	21435	8721	40,70
Corrientes	San Cosme	37	60732	13099	4034	30,80
Corrientes	San Luis del Palmar	38	259691	16456	6193	37,60
Corrientes	San Roque	39	245084	17911	7487	41,80
Santa Fe	9 de Julio	40	1733258	28189	8758	31,10
Santa Fe	Gral Obligado	41	1103838	165767	43836	26,40
Santa Fe	San Javier	42	669519	29721	8968	30,20
Santa Fe	Vera	43	2070325	50881	16333	32,10
Sgo del Estero	Alberdi	44	1224496	15504	7667	49,50
Sgo del Estero	Belgrano	45	319912	7927	2167	27,30
Sgo del Estero	Copo	46	1412580	26924	11718	43,50
Sgo del Estero	Gral Taboada	47	630054	36372	13817	38,00
Sgo del Estero	Juan F Ibarra	48	916355	16926	8071	47,70
Sgo del Estero	Moreno	49	1638781	27933	12114	43,40

# Introducción

El riesgo agroclimático se refiere a los perjuicios que se ocasionan en los sistemas de producción y en las familias rurales debido a la ocurrencia de eventos climáticos extremos. La producción agropecuaria tiene lugar en el sistema suelo-cultivo-atmósfera, por lo que se encuentra muy expuesta a las condiciones meteorológicas. El nivel de riesgo se caracteriza por ser dinámico y cambiante de acuerdo con las variaciones que sufren sus componentes en el tiempo, en el territorio, en el ambiente o en la sociedad (Rashed and Weeks, 2003), lo que requiere un monitoreo continuo y actualización de los datos, tanto para la estimación periódica del nivel de amenaza climática como del grado de vulnerabilidad de la producción y los productores.

Los mapas de riesgo integran los componentes del riesgo de forma parcial o global, utilizando modelos que involucran el suelo, el cultivo y el clima y variadas herramientas de análisis espacial y temporal de datos. El mapeo de los riesgos es realizado por equipos multidisciplinarios en los que se combina el conocimiento de diversas disciplinas como meteorología, edafología, agronomía, geología, hidrología, sociología, economía, geomática, entre otras, con el objetivo de mejorar la manera de visualizar y comunicar los riesgos (Edwards, et al. 2007).

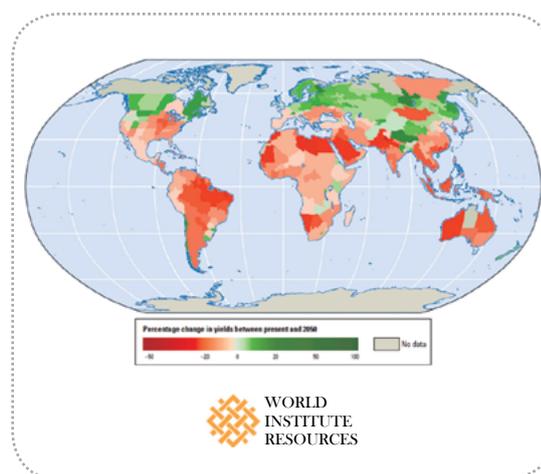
Básicamente, estos mapas representan la distribución espacial de los efectos potenciales que puede causar un evento de una intensidad definida sobre un área geográfica, de acuerdo con el grado de vulnerabilidad de los elementos que componen el medio expuesto (Cardona, 1993). Los efectos pueden corresponder a diferentes amenazas y puede evaluarse tanto la vulnerabilidad productiva (mermas de rendimiento) como la de los productores (deterioro de las condiciones de vida para la población rural) o la del ambiente (degradación de suelos, pérdida de especies, emisión de gases de efecto invernadero, entre otros factores).

La agricultura es extremadamente vulnerable al cambio climático. El aumento de las temperaturas termina por reducir la producción de los cultivos deseados y los cambios en los regímenes de lluvias aumentan las probabilidades de reducción de la producción a largo plazo. Aunque algunos cultivos en ciertas regiones del mundo puedan beneficiarse, en general se espera que los impactos del cambio climático sean negativos para la agricultura, amenazando la seguridad alimentaria mundial (Nelson et al, 2009).

El objetivo de este trabajo es desarrollar mapas temáticos, principalmente enfocado en la obtención de Mapas de Riesgo de Déficit y Excesos Hídricos para cultivos de secano, para un futuro cercano (2015-2039), basados en las series de datos meteorológicos revisadas y publicadas a partir de la Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático (3CN-CC) (SAyDS, 2014). Previamente se realizaron evaluaciones de las variables de entrada para el modelo de Balance Hídrico (BH) de la Oficina de Riesgo Agropecuario (ORA), obteniéndose mapas de medias mensuales de temperatura, medianas mensuales de precipitación, evapotranspiración potencial media mensual (ETP), entre otros.

Se prevé que estos mapas permitan comparar niveles de riesgo actuales con los previstos para el futuro cercano, según dos escenarios de cambio climático, uno moderado y otro extremo. Esta evaluación aportará una herramienta a la toma de decisiones en relación a políticas públicas en favor de la adaptación progresiva de las áreas en las que se prevé un aumento del riesgo, además de la consideración de expansión de áreas agrícolas hacia zonas que presentarían menor riesgo en el futuro.

**Figura 2:** Impacto del cambio climático en el rendimiento de los cultivos (World Resources Institute)



El área de estudio del proyecto está conformada por las provincias del noreste argentino (NEA): **Santa Fe, Corrientes, Chaco, Santiago del Estero y Formosa**, sin embargo los análisis se llevaron a cabo para una región extendida, según las zonas de ajuste de los datos de los modelos climáticos usados. Los cultivos extensivos analizados fueron: **maíz, soja, girasol, trigo y algodón**. Para su aplicación en ganadería, se evaluó el riesgo de déficit o excesos hídricos para cada mes del año y considerando el consumo aproximado de una pastura natural. En esta publicación nos centraremos en los resultados obtenidos para maíz, soja de primera y algodón, pero el resto de los resultados puede consultarse en el siguiente link: [http://www.ora.gob.ar/mapas\\_riesgo\\_cc.php](http://www.ora.gob.ar/mapas_riesgo_cc.php)

En el marco de la 3CN-CC, el impacto y la vulnerabilidad al cambio climático para la agricultura y ganadería nacional sólo se han llevado a cabo para la región pampeana y según una metodología que no se hallaba disponible para otras regiones. En este trabajo no se pretende estimar pérdidas de rendimiento, pero sí las variaciones esperadas en la disponibilidad de agua para los principales cultivos extensivos de secano, ya que siempre ha sido el principal factor que limita la producción agrícola (Steduto et al, 2012).

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron series de datos diarios históricos (1980-2010) y futuros (2015-2039) para los modelos con mejor ajuste en esta región, según resultados de la 3CN-CC (2014), y que a su vez estuvieran disponibles para todas las variables requeridas por el sistema de cálculo de balance hídrico. Las variables consideradas fueron: temperaturas máxima (Tmax) y mínima (Tmin), precipitación (PP), humedad relativa media (HR), radiación de onda corta entrante (ROCent), dirección

del viento (DIRV) y su intensidad (INTV). Los modelos para los que se hallaron disponibles todas estas variables y que mejor ajuste mostraron en el área de estudio son: CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0 y MRI-CGCM3. La disposición espacial de la información está dada por una grilla regular cuyos puntos se distancian en 0,5 grados de latitud y/o longitud. En esta publicación se mostrarán los resultados obtenidos a partir de la utilización del modelo CNRM-CM5.

Para cada modelo se obtuvieron series de datos históricos (1980-2010) y futuros (2015-2039) de las variables mencionadas. Para el futuro cercano se consideraron dos escenarios de concentraciones de gases invernaderos: RCP4.5 (crecimiento moderado de las emisiones, incluyendo medidas de mitigación) y RCP8.5 (crecimiento de las emisiones manteniendo la tendencia actual, sin medidas de mitigación: un escenario más extremo que el anterior).

Los datos de temperatura y precipitación ya han sido publicados con las correcciones necesarias que permiten que el modelo global se ajuste mejor a un nivel de escala regional. Dado que el resto de las variables no contaban con dicha corrección, se solicitó una consultoría previa que llevó a cabo esta tarea, a cargo de la Dra. Cs. de la Atm. Moira Doyle. Luego fueron estos datos corregidos los que se tomaron en cuenta para las evaluaciones de riesgo de déficit y excesos hídricos.

El modelo de BH de la ORA utiliza, además de los datos meteorológicos ya mencionados, información sobre los suelos (coeficientes de escurrimiento, de percolación, punto de marchitez permanente, capacidad de campo) y sobre la fenología de los cultivos que se analizan (fechas de siembra, cosecha y las etapas intermedias de crecimiento, y los coeficientes

de consumo hídrico ( $K_c$ ) de cada etapa, como también los periodos críticos para déficit y excesos hídricos). Toda esta información se halla en una base de datos que se utiliza para el monitoreo de los cultivos en campaña, sumada a los datos meteorológicos de las estaciones convencionales y automáticas brindadas por di-

versas fuentes. Por lo tanto, se llevó a cabo una adaptación del software propio de la ORA para los BH, de manera tal que pudiera tomar los datos meteorológicos de los modelos descriptos con anterioridad y los parámetros edáficos ya disponibles (Atlas de Suelos 1:500.000 y cartas de suelos 1:50.000 de INTA) y fenológicos.

# Los modelos de cambio climático

## CARACTERÍSTICAS

Actualmente, los modelos climáticos globales (MCGs) simulan el clima considerando un retículo tridimensional sobre la Tierra con una resolución horizontal en general de entre 60 y 200 Km, y de hasta 60 niveles verticales en la atmósfera y similar en el océano. Se ha verificado que estos modelos son capaces de simular las características globales del clima y de sus cambios registrados en el pasado reciente. Son por lo tanto una herramienta aceptable para el desarrollo de escenarios climáticos globales futuros, resultantes de hipótesis sobre futuras concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI).

La comunidad científica que desarrolla estos modelos y realiza los experimentos que alimentan los informes del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ha elaborado pautas comunes y métodos de distribución pública de sus experimentos. Recientemente, han hecho disponibles un conjunto de simulaciones y escenarios climáticos que es conocido como CMIP5 (Taylor y otros, 2012). Una generación anterior de estas simulaciones de escenarios es conocida como CMIP3 (Meehl y otros, 2007).

## LIMITACIONES

Muchos procesos físicos -como los propios de las nubes- ocurren en escalas espaciales menores a las resueltas por los modelos y por lo tanto no pueden ser representados por estos en forma adecuada. Ésta es una de las fuentes de incerteza en las simulaciones del clima futuro basadas en las salidas de los MCGs. Otros procesos que presentan dificultades para ser representados son los vinculados con los mecanismos de flujos del vapor de agua y calor entre la superficie y la atmósfera, así como la interacción entre las nubes y los aerosoles. Por esta razón, los distintos MCGs pueden proveer respuestas diferentes a un mismo forzamiento climático debido a las distintas formas en que modelan estos procesos.

Una de las mayores limitaciones de los MCG es que no siempre hacen una representación adecuada del clima a nivel regional. Si bien los modelos son capaces de reproducir los elementos climáticos fundamentales que describen cualitativamente el campo de precipitación en el clima regional del sur de América del Sur, sus errores en la cuantificación de la precipitación son importantes (ejemplo en Vera y otros, 2006).

## EVALUACIÓN Y SELECCIÓN

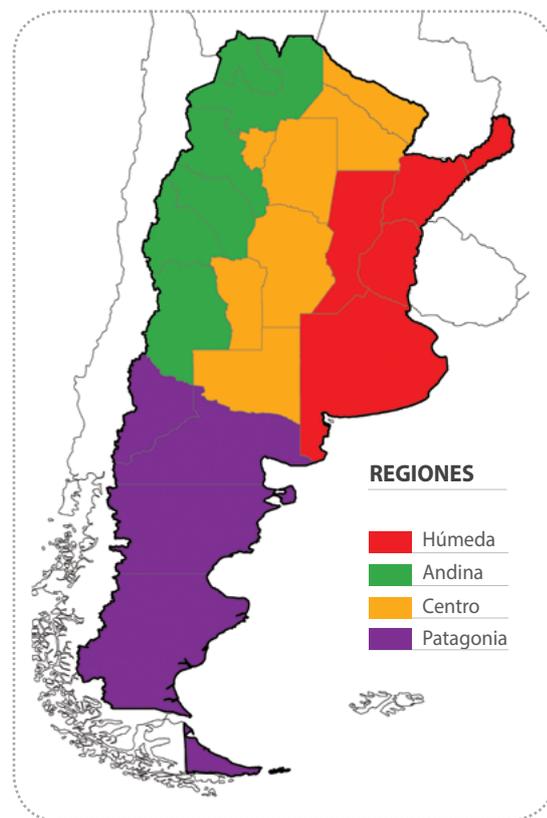
La evaluación de los MCGs y MCRs (modelos climáticos regionales) se realizó en el marco de la 3CN-CC tomando como referencia el clima observado según datos de temperatura y precipitación mensual provistos en puntos de retícula con una resolución de 0.5° latitud x 0.5° longitud. La base de datos considerada es la conocida como CRU y el período de análisis para la evaluación fue el comprendido entre 1961 y 1990.

Se evaluaron 14 MCGs de la base CMIP5 (Stouffer y otros, 2011; Taylor y otros, 2012). Estos modelos se encuentran disponibles a través

del Programa para el Diagnóstico e Intercomparación de Modelos (PCMDI, <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>) y fueron utilizados en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC.

Se evaluaron los rendimientos de cada modelo en 4 regiones en las que fue dividido el territorio nacional: Húmeda, Centro, Andes y Patagonia (**Figura 3**). Las provincias que conforman el área de estudio del presente trabajo se hallan en dos diferentes regiones: Húmeda y Centro.

**Figura 3:** Regiones consideradas en la 3CN-CC



En la 3CN-CC, la validación de los MCGs se realizó a través del análisis del comportamiento simulado para la temperatura y la precipitación medias, obteniéndose las siguientes conclusiones:

### ► Temperatura media

- La mayor parte de los modelos subestima la temperatura en la región patagónica donde la

temperatura simulada puede ser hasta 5°C inferior a la observada.

- En el centro-este del país, por el contrario, los MCGs sobrestiman la temperatura media en algunos casos superando en 5°C los valores de referencia, aunque se destacan los modelos CCSM4 y CMCC-CC como los de mejor desempeño en esta región, con errores que prácticamente no superan 1°C.
- El modelo INMCM4 se caracteriza por simular temperaturas más bajas que las observadas en todo el país mientras que el MIROC5 presenta un comportamiento opuesto.
- De los resultados obtenidos, no se identifica un modelo climático individual que represente en forma adecuada la temperatura en todo el país. Esto justifica el análisis regional presentado.

#### ► Precipitación media

- La mayor parte de los modelos tiene un patrón de error semejante con sobrestimación de la precipitación a lo largo de la parte oeste del país y Patagonia y subestimación en el centro-este, principalmente en la provincia de Buenos Aires.
- En las regiones Centro y en particular en la Húmeda, la mayor parte de los modelos subestiman la precipitación y sobrestiman la variabilidad interanual.
- En la región Andes la sobrestimación de la lluvia es notoria en prácticamente todos los modelos y a nivel anual y estacional, aunque en este caso la variabilidad interanual es inferior a la de la base de datos de referencia.
- En Patagonia se da una sobrestimación de la precipitación, así como coeficientes de variación mayores a 1 que indican que los modelos muestran mayor variabilidad interanual que la observada.

El análisis comparativo entre regiones, muestra que ningún modelo tuvo un muy buen desempeño simultáneamente en las cuatro regiones. El

índice único de validación de modelos (IUVM), cuyos resultados se pueden ver en el Cuadro 1, permite sintetizar el desempeño de cada modelo climático y de sus 10 índices de error descriptos en la sección 3.3.4. (3CN-CC, **Capítulo 3**). Se lo utilizó para establecer un ranking y hacer una selección objetiva de los modelos que luego fueron utilizados en el desarrollo de los escenarios climáticos del siglo XXI.

El índice único de validación de modelos (IUVM) varía entre 0 y 1, y los valores próximos a 0 son indicadores de un mal desempeño mientras que cuanto mayor es la habilidad del modelo para representar el clima observado, el índice se aproxima a 1. Por la forma en que se construyó el IUVM, se considera que los modelos que exhiben un valor de IUVM de 0,5 o mayor representan aceptablemente el clima de la región.

La mayor parte de los modelos no incluyen la determinación de series diarias de todas las variables meteorológicas necesarias para alimentar el algoritmo de balance hídrico a utilizar. Los que poseen todas estas variables son los que se destacaron en color en el **Cuadro 1** a continuación: CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR, CSIRO-Mk3-6-0, MRI-CGCM3 y GFDL-ESM2G. Para la selección entre estos 5 modelos se priorizaron los resultados para las regiones Húmeda y Centro, que son las que incluyen el área de análisis.

- El modelo CNRM-CM5 se halla en primer lugar para la región Centro (0,90), mientras que para la Región Húmeda se halla levemente por debajo de la línea de aceptación (0,47).
- El modelo CSIRO-Mk3-6-0 se halla muy bien posicionado para la región Centro (0,71), pero para la región Húmeda se halla bastante por debajo de la línea de aceptación (0,38).
- El modelo MRI-CGCM3 se halla casi tan bien posicionado como el anterior en la región Cen-

tro (0,70), mientras que para la Región Húmeda se halla levemente por debajo de la línea de aceptación (0,49).

- El modelo GFDL-ESM2G se halla medianamente bien posicionado para la región Centro (0,63), pero para la región Húmeda se halla muy

por debajo de la línea de aceptación (0,31).

- El modelo IPSL-CM5A-MR es el único modelo que supera el umbral para la región Húmeda, aunque se halla apenas sobre la línea de aceptación (0,53), pero levemente por debajo de la misma para la región Centro (0,48).

**Cuadro 1:** Índice único de validación de modelos (IUVM)

Húmeda	IUVM	Centro	IUVM	Andes	IUVM	Patagonia	IUVM
CCSM4	0,91	CNRM-CM5	0,90	IPSL-CM5A-MR	0,93	REMO-ECHAM5	0,66
MRI/JMA	0,88	CMCC-CM	0,78	ETA-HadCM3	0,90	MM5-HadCM3	0,58
CMCC-CM	0,75	CSIRO-Mk3-6-0	0,71	MRI/JMA	0,54	CSIRO-Mk3-6-0	0,52
NorESM1-M	0,62	MRI-CGCM3	0,70	MPI-ESM-LR	0,52	GFDL-ESM2G	0,52
HadGEM2-CC	0,57	MPI-ESM-MR	0,67	CCSM4	0,51	PROMES-HadCM3	0,51
MPI-ESM-MR	0,57	LMDZ-IPSL	0,66	MPI-ESM-MR	0,51	MRI-CGCM3	0,51
MPI-ESM-LR	0,55	GFDL-ESM2G	0,63	MRI-CGCM3	0,51	RCA-ECHAM5-3	0,48
IPSL-CM5A-MR	0,53	MPI-ESM-LR	0,60	NorESM1-M	0,51	MRI/JMA	0,48
ETA-HadCM3	0,49	MRI/JMA	0,57	LMDZ-ECHAM5	0,50	RCA-ECHAM5-2	0,47
MRI-CGCM3	0,49	CCSM4	0,56	PROMES-HadCM3	0,47	NorESM1-M	0,45
RegCM3-HadCM3	0,48	NorESM1-M	0,56	HadGEM2-CC	0,47	HadGEM2-ES	0,44
CNRM-CM5	0,47	HadGEM2-ES	0,49	CSIRO-Mk3-6-0	0,46	HadGEM2-CC	0,43
LMDZ-ECHAM5	0,42	RegCM3-HadCM3	0,48	HadGEM2-ES	0,43	INMCM4	0,37
RCA-ECHAM5-3	0,40	IPSL-CM5A-MR	0,48	REMO-ECHAM5	0,40	CCSM4	0,36
RCA-ECHAM5-2	0,40	LMDZ-ECHAM5	0,42	RegCM3-ECHAM5	0,37	CNRM-CM5	0,35
CSIRO-Mk3-6-0	0,38	RCA-ECHAM5-2	0,40	CMCC-CM	0,37	MIROC5	0,35
RCA-ECHAM5-1	0,34	RCA-ECHAM5-3	0,40	INMCM4	0,37	CMCC-CM	0,34
LMDZ-IPSL	0,34	RCA-ECHAM5-1	0,36	MM5-HadCM3	0,31	MPI-ESM-LR	0,31
HadGEM2-ES	0,32	REMO-ECHAM5	0,36	GFDL-ESM2G	0,30	MPI-ESM-MR	0,31
GFDL-ESM2G	0,31	ETA-HadCM3	0,36	RegCM3-HadCM3	0,21	RCA-ECHAM5-1	0,30
REMO-	0,30	HadGEM2-	0,36	MIROC5	0,20	LMDZ-	0,28

A partir de estas observaciones, se decidió considerar en primera instancia los escenarios CNRM-CM5 y MRICGCM3 por tener un buen

nivel de ajuste en la región Centro y hallarse apenas por debajo del nivel de aceptación para la región Húmeda.

# Comprobación de los datos meteorológicos

## ANÁLISIS DE VALORES EXTREMOS

En primer lugar, se procedió al análisis de valores extremos de las diversas variables meteorológicas obtenidas de la base de datos. Si bien entre los procedimientos realizados en el marco de la 3CN-CC se realizaron controles de calidad de las series modeladas de precipitación y temperatura, volvieron a realizarse consistencias sencillas de extremos para éstas y las demás variables utilizadas. El conjunto de controles realizados se detalla en el **Cuadro 2**:

**Cuadro 2:** Consistencia de series de datos corregidos

► Condición	► Clasificación
Humedad relativa < 0%	Erróneo
Humedad relativa > 100%	Erróneo
Precipitación diaria < 0mm	Erróneo
Precipitación diaria > 300mm	Dudoso
Temperatura máxima > 50°C	Dudoso
Temperatura máxima < -10°C	Dudoso
Temperatura mínima > 40°C	Dudoso
Temperatura mínima < -20°C	Dudoso
Temperatura mínima > temperatura máxima	Erróneo

El análisis de extremos se realizó para los 5 modelos con todas las variables requeridas disponibles. Se encontraron valores erróneos y dudosos que fueron considerados por la fuente y corregidos por la misma cuando fue necesario.

## ANÁLISIS DE DIFERENCIAS EN LOS VALORES MEDIOS

Una vez consistidos los valores extremos se procedió a hacer un análisis de los valores medios mensuales de precipitación y evapotranspiración de referencia (Allen et al, 1990), que luego fueron mapeados y utilizados para el análisis de las conclusiones de este trabajo. Este procedimiento se llevó a cabo sólo para los dos modelos seleccionados (CNRM-CM5 y MRI-CGCM3) y para la serie histórica 1980-2010 (H8010), futuro cercano RCP4.5 (FC45) y futuro cercano RCP8.5 (FC85). Luego se calcularon las diferencias para el FC45 con respecto al H8010 (45-hist80) y del FC85 con respecto al H8010 (85-hist80). Los mapas mensuales para ambas variables, de ambos modelos y para cada serie de datos pueden ser consultados a través del link de la página web de la ORA:

[http://www.ora.gob.ar/mapas\\_riesgo\\_cc.php](http://www.ora.gob.ar/mapas_riesgo_cc.php).

Durante el análisis de estos resultados se notó que la diferencia en los valores mensuales de ETP para el modelo MRI-CGCM3, tanto 45-hist80 como 85-hist80, resultaban muy exageradas (del orden de 1mm por día en los meses de verano) con respecto a la variación prevista para la temperatura en la mitad norte de la región Húmeda. Revisando los datos parciales, se observó que los valores de velocidad del viento que produjo el modelo MRI-CGCM3 para el futuro cercano mostraba un aumento del 100% con respecto a los valores históricos, hecho que no se observó en ninguno de los otros modelos ni en otras áreas o regiones para el MRI-CGCM3. Por esta razón, en la determinación de mapas de riesgo no se ha considerado el modelo MRI-CGCM3, limitándose los resultados al modelo CNRM-CM5.

# Cálculo de riesgo de déficit y excesos hídricos

## PARÁMETROS EDÁFICOS

El BH se realiza para cada unidad cartográfica de suelo, con sus características particulares dadas por textura, pendiente y profundidad. Con estas características se estiman los valores de capacidad de campo, punto de marchitez, coeficiente de escurrimiento y coeficiente de percolación que son considerados en el BH.

## VARIABLES METEOROLÓGICAS

Los valores para las distintas variables meteorológicas tomados en cuenta para realizar el BH en cada unidad de suelo son los correspondientes al punto de grilla del modelo CNRM-CM5 más cercano al centroide de cada unidad. En este trabajo, como se mencionó anteriormente, se consideran 5 variables y sus series de datos meteorológicos diarios para el periodo histórico H8010 y para los dos futuros cercanos FC45 y FC85.

## PARÁMETROS AGRONÓMICOS

Para la simulación del requerimiento hídrico de cada cultivo específico y de un campo con pasto natural se consideraron los calendarios habituales por zonas homogéneas, la duración de las etapas fenológicas y el coeficiente de consumo hídrico  $K_c$  en cada una de ellas (Allen et al, 1990). Para la modelización del campo natural se tomó un  $K_c$  constante durante todo el año de 0,75.

## METODOLOGÍA DEL BALANCE HÍDRICO

Se trata de un modelo de balance hídrico de paso diario, que considera la precipitación como aporte de agua y las pérdidas por transpiración de la planta, evaporación desde la superficie, escurrimiento superficial y percolación profunda. Las salidas del modelo consisten en valores diarios de almacenaje en el primer metro de profundidad (o a la profundidad efectiva, si ésta es menor) y de los milímetros excedentes que quedan acumulados en superficie (excesos). Los detalles de la metodología pueden consultarse en: [http://www.ora.gob.ar/informes/Reservas\\_de\\_Agua\\_Metodologia\\_balance.pdf](http://www.ora.gob.ar/informes/Reservas_de_Agua_Metodologia_balance.pdf)

## CÁLCULO DE PROBABILIDADES DE DÉFICIT Y DE EXCESOS HÍDRICOS

Se obtuvieron mediante el BH, para cada centroide y cultivo, archivos conteniendo el almacenaje de agua en suelo para cada día del periodo analizado, de acuerdo a cada serie (H8010, FC45, FC85). Estos archivos son los datos de entrada para evaluar estadísticamente la probabilidad de sufrir déficit o excesos hídricos.

La probabilidad de déficit o de excesos fue evaluada en los periodos críticos de cada cultivo. Los mismos son diferentes en el caso de excesos y de déficit para un mismo cultivo, además de considerarse individualmente para cada zona según su calendario habitual. Los mapas con las zonas con calendario homogéneo y sus periodos críticos correspondientes se incluyen en los resultados para facilitar el análisis.

Se consideró que un determinado cultivo en una determinada unidad de suelo, sufre déficit hídrico en una campaña si está al menos un 70% del

periodo crítico con agua útil por debajo del 25%. Análogamente, sufre excesos hídricos si el agua útil está por encima del 95% en al menos 5 días de cada 7 en algún momento del periodo crítico. Se calcularon las probabilidades (porcentaje de campañas con el criterio descrito) de ocurrencia de cada fenómeno y se mapearon los resultados, para 5 cultivos y sus diferentes ciclos, obteniéndose un total de 60 mapas (30 para déficit hídrico y 30 para excesos hídricos).

También se analizó la probabilidad de ocurrencia de déficit y excesos hídricos considerando una cobertura de pasto natural. En este caso se evaluó cada mes, por lo tanto, se obtuvieron 72 mapas (36 para déficit hídrico y 36 para excesos hídricos).

Para analizar los cambios a futuro se mapearon las diferencias entre los resultados obtenidos (probabilidad de déficit o de excesos) de los escenarios y los de las series históricas (45-hist80 y 85-hist80). Se obtuvieron 88 mapas (20 mapas para cambios en probabilidad de ocurrencia de déficit hídrico en los 5 cultivos extensivos analizados, y 20 mapas para probabilidad de ocurrencia de excesos hídricos en los mismos cultivos, 24 para la probabilidad de déficit en pastura en cada mes y 24 para excesos).

Todos los mapas aquí mencionados están disponibles para ser consultados online en el link: [http://www.ora.gob.ar/mapas\\_riesgo\\_cc.php](http://www.ora.gob.ar/mapas_riesgo_cc.php)

Los mapas para los cultivos de maíz tardío (sembrado en diciembre y sembrado en enero), soja de primera y algodón (siembras temprana y tardía) se incluyen en la sección de análisis de los resultados.

# Resultados

Aplicando la metodología detallada, se obtuvieron diferentes resultados que permiten la evaluación de los cambios esperados en el futuro cercano, de acuerdo a dos escenarios posibles: moderado y extremo. Además, se generaron resultados complementarios que permiten evaluar independientemente los cambios esperados en los aportes de agua (precipitación) y el consumo (evapotranspiración).

## ► Precipitación

Se evaluaron cambios en la precipitación esperados según cada escenario para cada mes del año. Los mapas correspondientes, en su versión completa, pueden consultarse online. Los principales resultados hallados fueron los siguientes:

- En los meses de verano se prevé una disminución en la precipitación de más de 50mm, para ambos escenarios: en el mes de diciembre el mismo se ubica en el norte de Corrientes y este de Chaco, en enero en el este de Chaco y en febrero en el este de Formosa.
- En los meses de otoño se prevé un aumento en la precipitación de más de 50mm, para ambos escenarios, que se va desplazando de oeste a este: en el mes de marzo en la mayor parte de Chaco y norte de Corrientes, en abril en el este de Chaco, norte de Corrientes y Misiones, y en mayo en el norte de Corrientes y Misiones.

- En los meses de invierno los cambios esperados son menores, destacándose un aumento previsto en la precipitación de julio de más de 30mm en el noreste de Corrientes.
- En septiembre se prevé una disminución de más de 50mm en la provincia de Misiones.
- En octubre se prevén aumentos de más de 50mm en el centro de Chaco y este de Corrientes, más acentuado en Corrientes con el escenario extremo.
- En noviembre se prevén aumentos de más de 50mm en el sudoeste de Chaco, este de Santiago del Estero, norte de Santa Fe y sur de Corrientes, más acentuados con el escenario extremo.

#### ► Evapotranspiración

Se evaluaron cambios en la evapotranspiración esperada según cada escenario para cada mes del año. Estos cambios surgen de los previstos por el modelo para las variables: temperatura, radiación, humedad relativa y velocidad del viento. Los mapas correspondientes pueden consultarse online. Los principales resultados hallados fueron los siguientes:

- Los cambios previstos para la evapotranspiración mensual resultaron de orden menor que los previstos para la precipitación. Los mismos pertenecen a la categoría que va desde un aumento de 10mm a una disminución de 10mm (rango que se puede considerar sin cambios significativos) en toda al área de estudio en el periodo mayo-agosto (otoño e invierno).
- En septiembre se prevé un aumento de la evapotranspiración de 10 a 30mm en la provincia de Formosa, con ambos escenarios.
- En octubre nuevamente toda el área se mantiene en el rango de variación prevista de 10 a 10mm en el mes.
- En noviembre se prevé un aumento en la evapotranspiración en el rango de 10 a 30mm en la provincia de Formosa y centro y norte

de Chaco, sólo con el escenario extremo. En diciembre esta área se extiende, abarcando toda la provincia de Chaco, centro y norte de Santiago del Estero y norte de Corrientes.

- En enero, con el escenario moderado se prevé un aumento en el rango de 10 a 30mm en Chaco, Corrientes, norte de Santa Fe y este de Santiago del Estero. Con el escenario extremo, este mismo rango de aumento aparece más al norte: Formosa, Chaco, noreste de Santiago del Estero y norte de Corrientes.
- En febrero, con el escenario moderado el mismo rango de aumento se prevé desplazado más al sur: Santiago del Estero, sur de Chaco, norte de Santa Fe y sur de Corrientes. Con el escenario extremo, el aumento previsto es del mismo rango y se concentra en el centro y norte de Corrientes.
- En marzo, con el escenario moderado se prevé el mismo rango de aumento de entre 10 y 30mm en Formosa. Con el escenario extremo, el mismo rango de aumento se prevé en el este de Corrientes, noroeste de Chaco y noreste de Santiago del Estero.

#### ► Riesgo de déficit y excesos hídricos

Se evaluaron cambios en los niveles de riesgo esperados según cada escenario para cada mes del año considerando el consumo de una pastura natural, y para cada periodo crítico en el caso de cultivos. Estos cambios surgen de la modelización del balance hídrico para cada cobertura y escenario. Los mapas correspondientes pueden consultarse online ([http://www.ora.gob.ar/mapas\\_riesgo\\_cc.php](http://www.ora.gob.ar/mapas_riesgo_cc.php)).

A continuación se describen los resultados obtenidos para los cultivos de algodón, maíz y soja, en sus principales regiones productivas. Para el algodón se llevó a cabo una evaluación más exhaustiva, mostrando las variaciones en precipitación y evapotranspiración según el

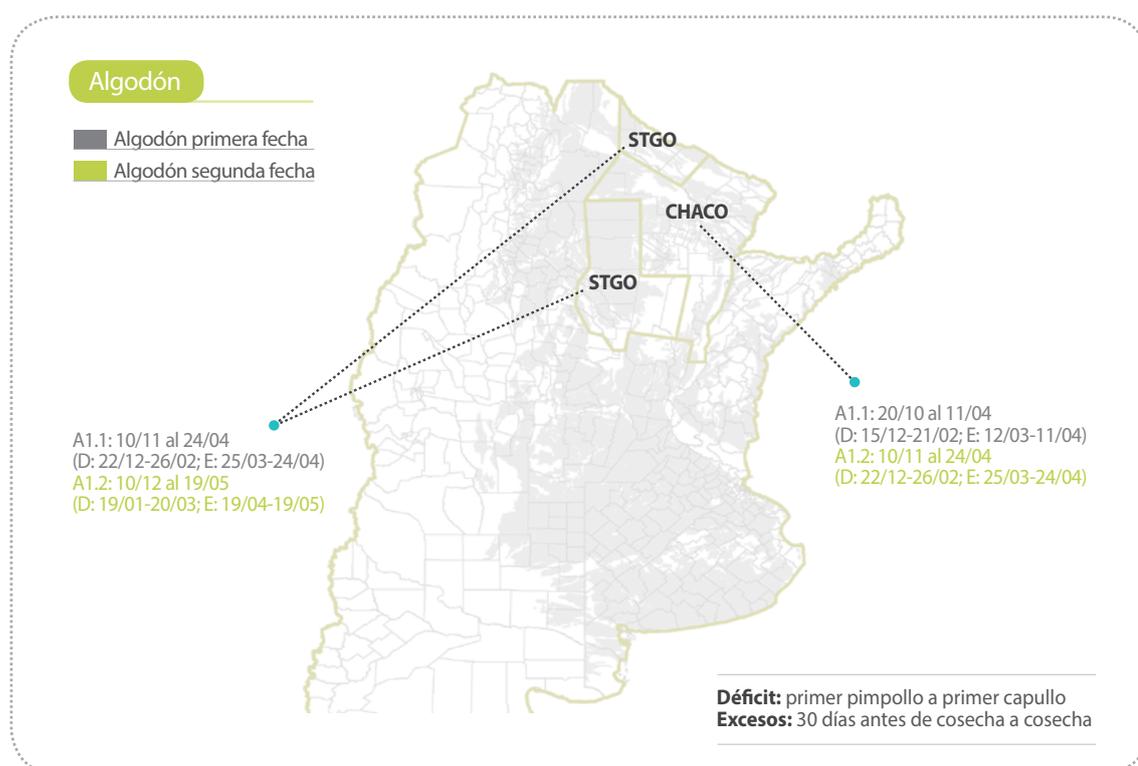
escenario analizado. Para el resto de los cultivos se encuentran disponibles los mapas en la versión web mencionada.

## Algodón

El área considerada para la evaluación del **al-**

**dón, Figura 4** abajo, corresponde a las provincias de Santa Fe (norte), Santiago del Estero (este), Chaco y Formosa, la cual fue dividida en dos zonas homogéneas desde el punto de vista de sus etapas fenológicas. Dentro de la misma se simularon dos calendarios diferentes, uno de siembra temprana (A1.1) y otro de siembra tardía (A1.2).

**Figura 4:** Zonas de fenología homogénea para algodón, inicio y fin del ciclo, periodos críticos para déficit (D) y excesos hídricos (E)



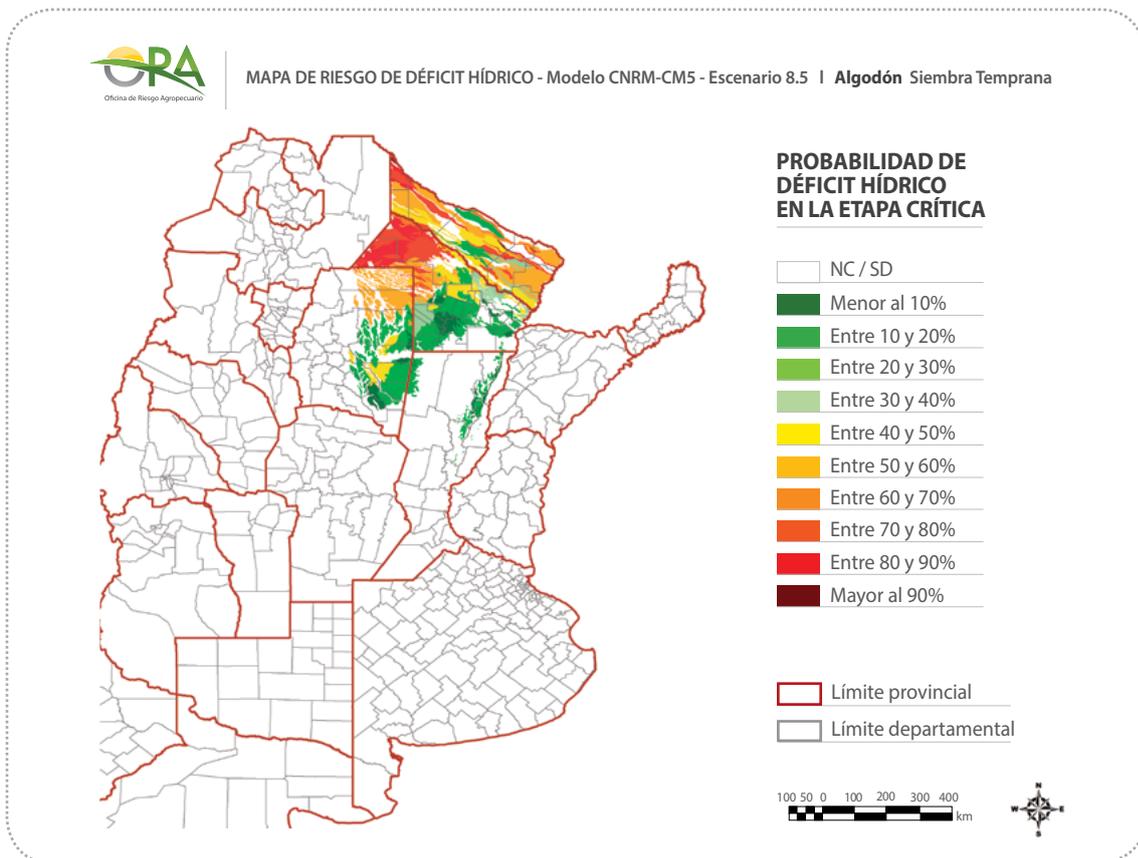
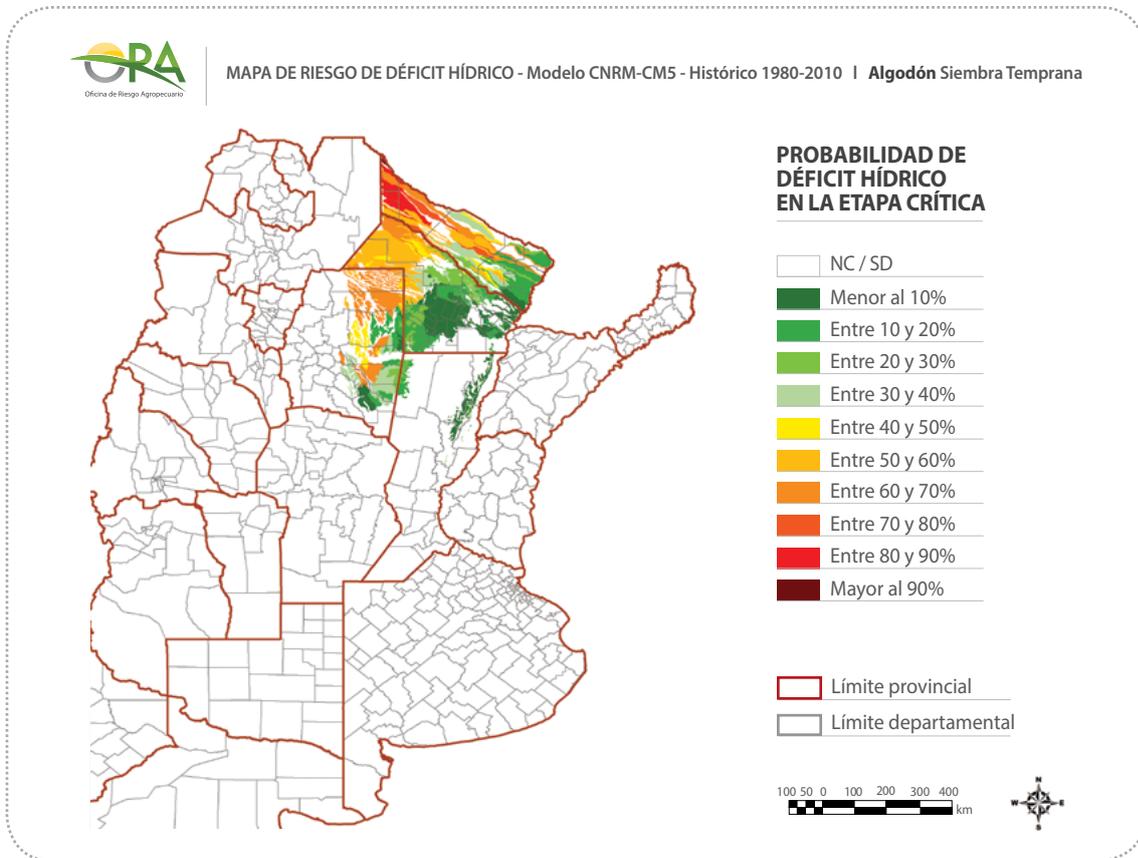
El algodón destaca entre los demás cultivos por la gran dependencia de la relación entre el crecimiento vegetativo/reproductivo del estado hídrico de la planta. Sin embargo, si el estrés hídrico en la etapa reproductiva es lo suficientemente severo, ocasionará la abscisión de flores y cápsulas. La precipitación o riego abundantes hacia el final de la estación pueden promover un crecimiento de vegetación no deseado a expensas de la maduración de las cápsulas y el desarrollo de la fibra.

• **Periodo crítico para déficit hídrico (D):** Primer pimpollo a primer capullo

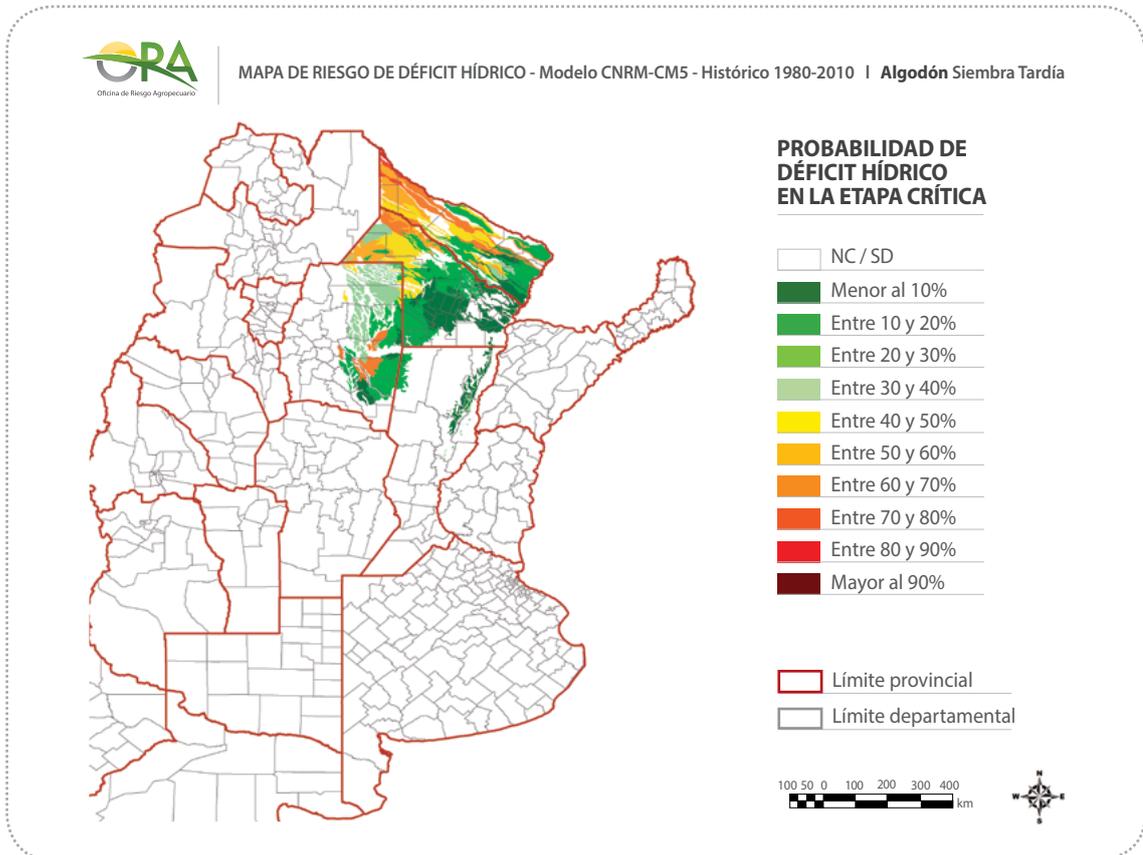
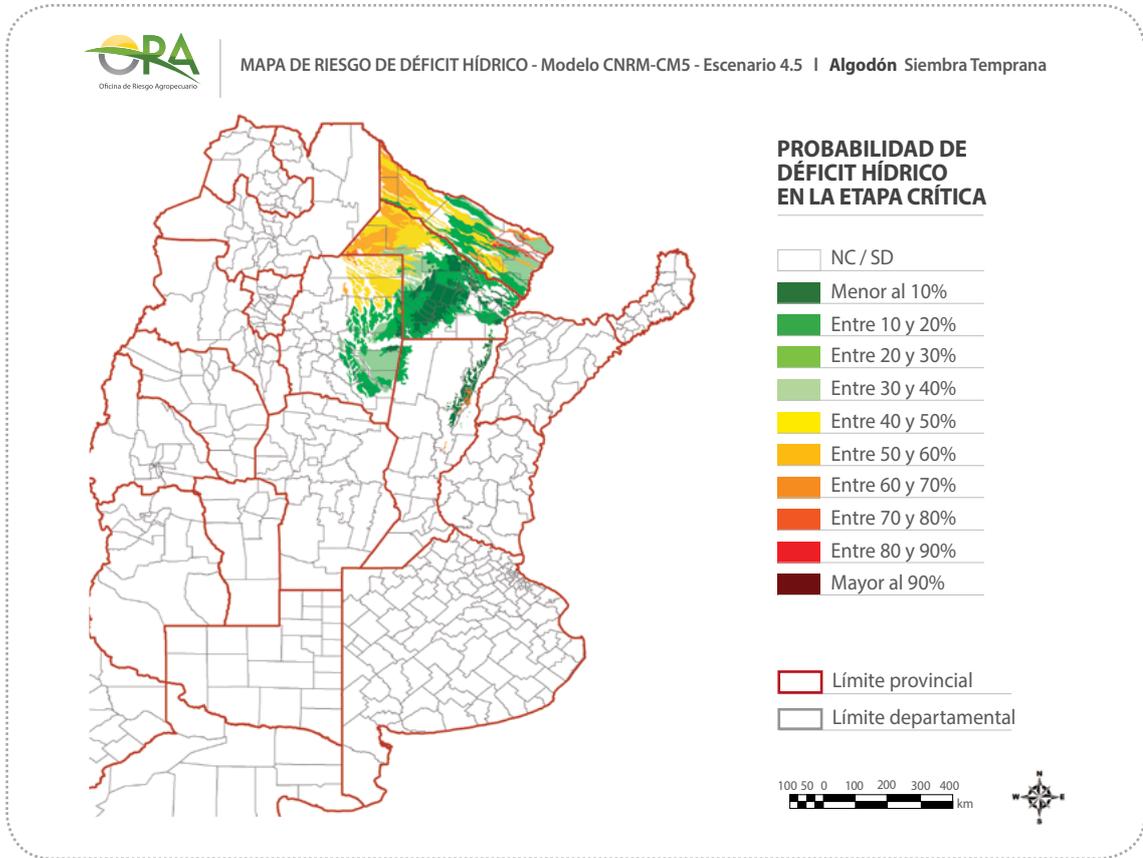
• **Periodo crítico para excesos hídricos (E):** 30 días antes de cosecha hasta cosecha

Los periodos críticos para déficit para A1.1 se extienden desde diciembre hasta febrero, mientras que para A1.2 van desde los últimos días del año hasta marzo. Los periodos críticos considerados son muy extendidos, abarcando entre dos y tres meses. Sin embargo, no son pocos los casos en que se presentan almacenajes inferiores al 25% de agua útil en el 70% o más de los días del periodo crítico para déficit (**Figuras 5 a 10** a continuación en páginas 24 a 26).

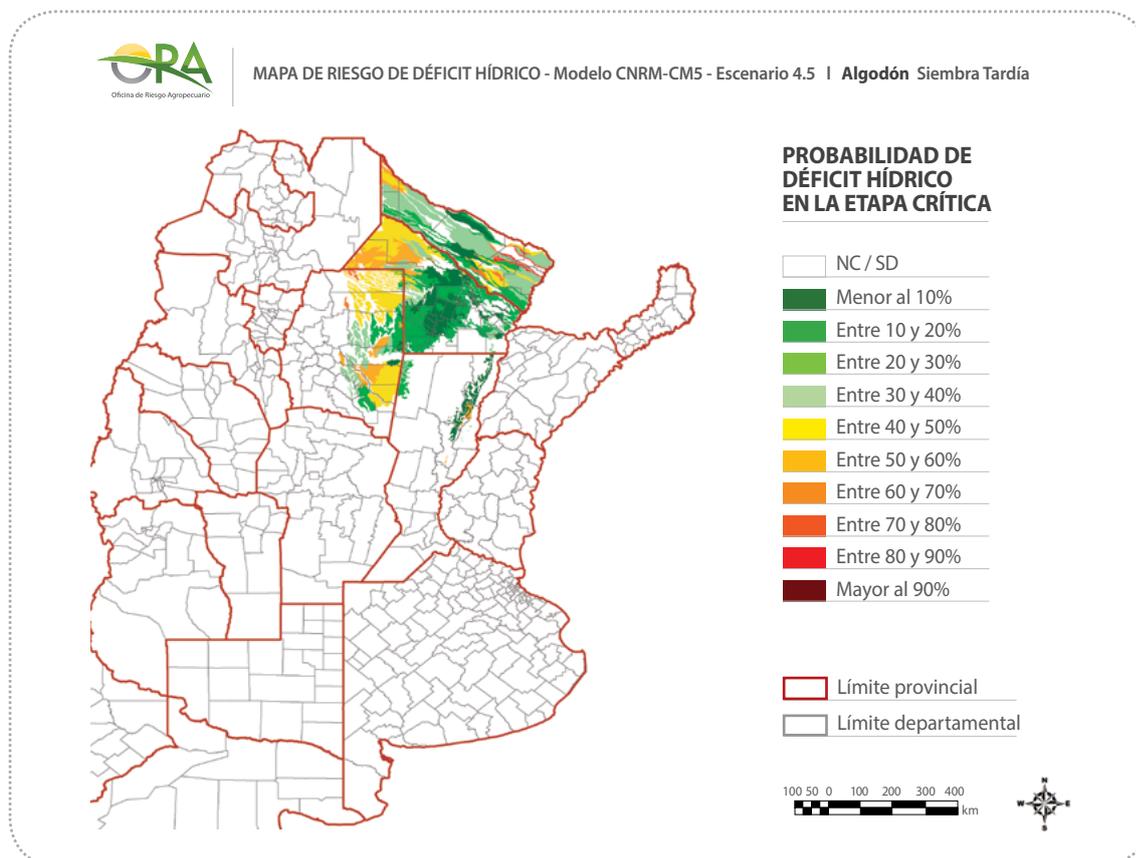
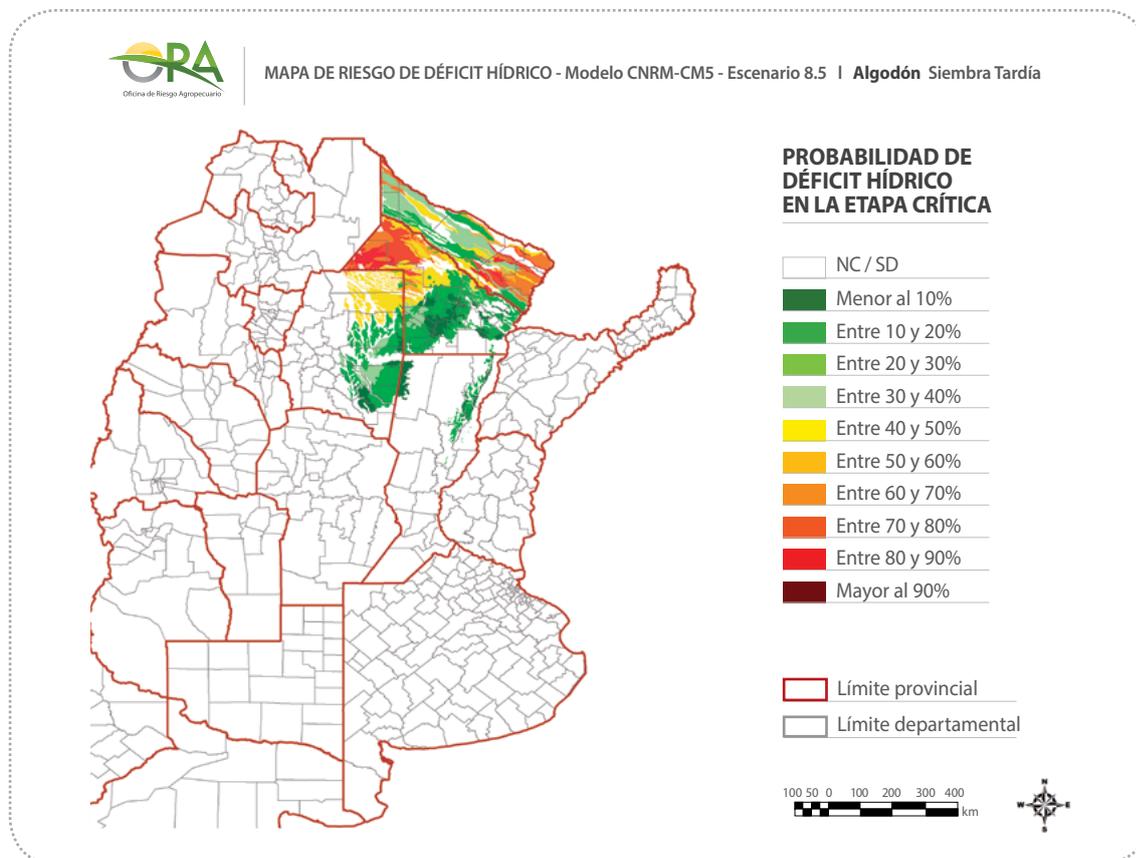
**Figuras 5 y 6:** Mapas de Riesgo para Déficit Hídrico en el cultivo de algodón, siembra temprana, considerando datos modelados para el pasado (arriba) y futuro con escenario extremo (abajo)



**Figuras 7 y 8:** Mapas de Riesgo para Déficit Hídrico en el cultivo de algodón, siembra temprana, considerando datos modelados para el futuro con escenario moderado (arriba) y siembra tardía con datos modelados para el pasado (abajo)



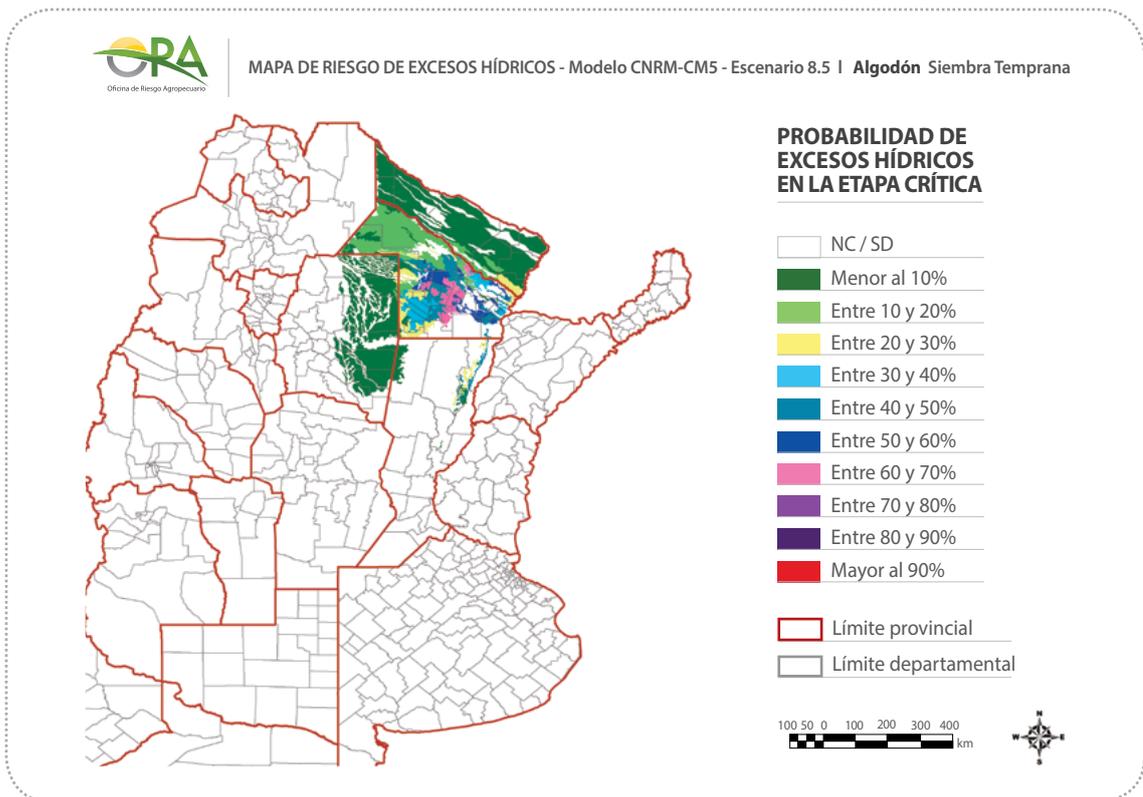
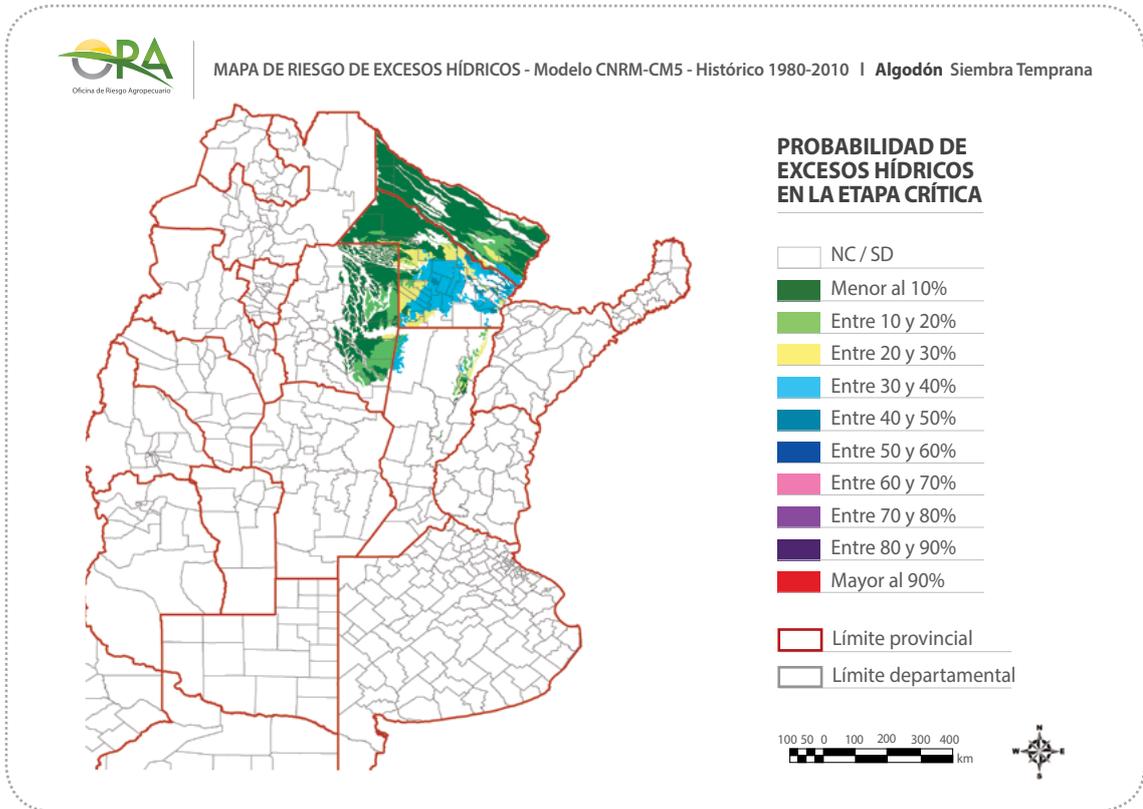
**Figuras 9 y 10:** Mapas de Riesgo para Déficit Hídrico en el cultivo de algodón, siembra tardía, considerando datos modelados para el futuro con escenario extremo (arriba) y con escenario moderado (abajo)



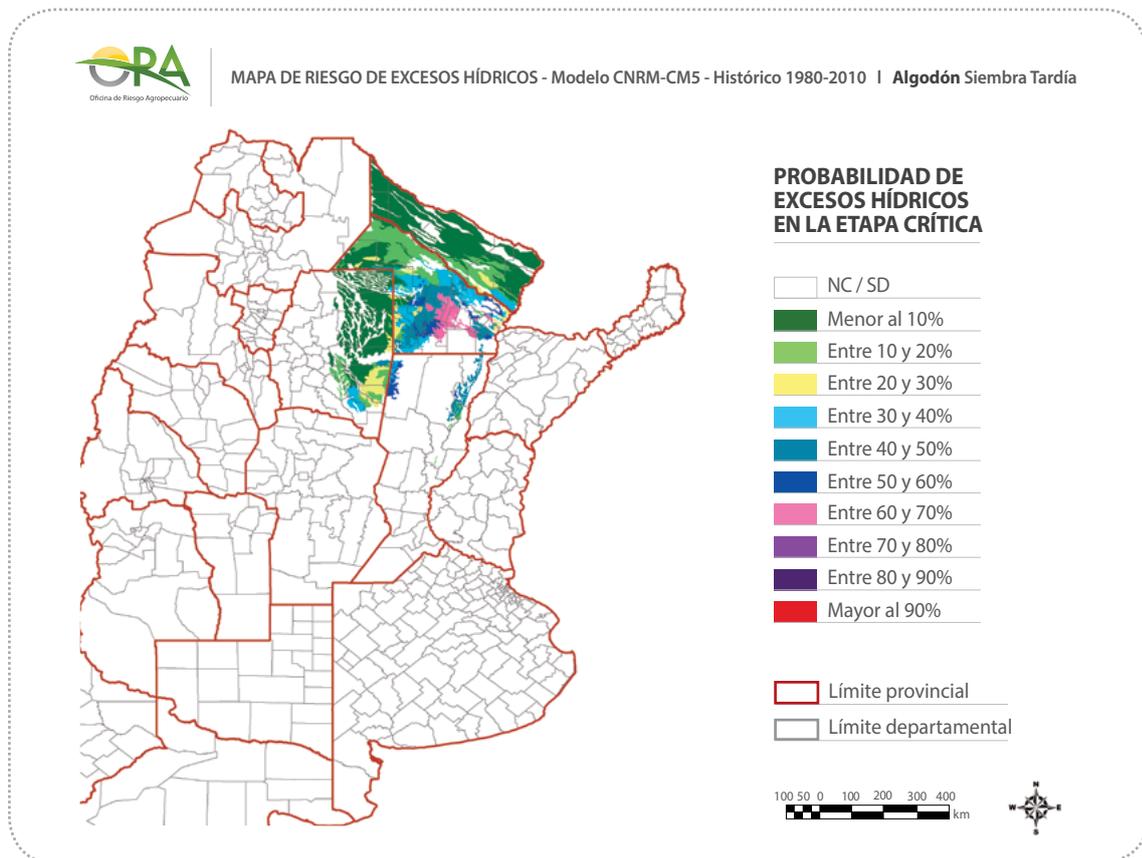
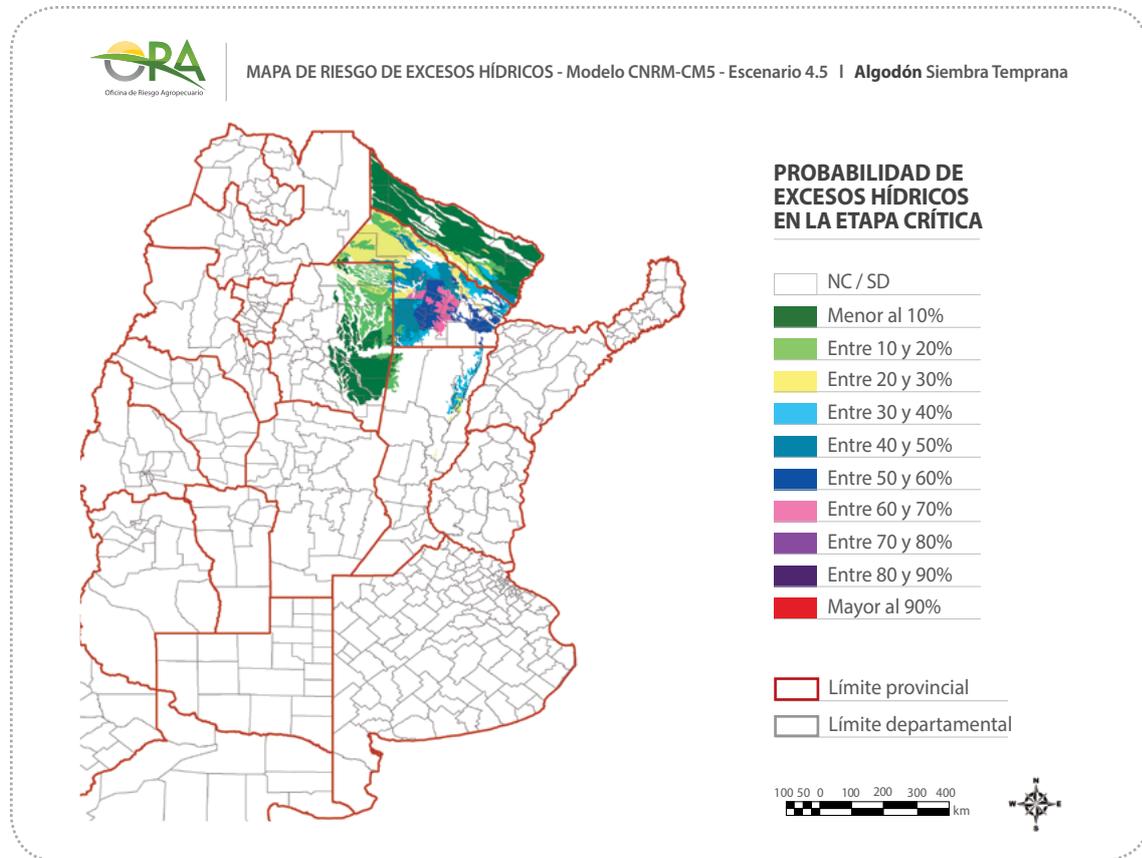
Los periodos críticos para excesos para A1.1 van de marzo hasta abril, y para A1.2 desde fines de

marzo hasta mayo. Por definición, estos periodos tienen una extensión de 30 días (**Figuras 11 a 16**).

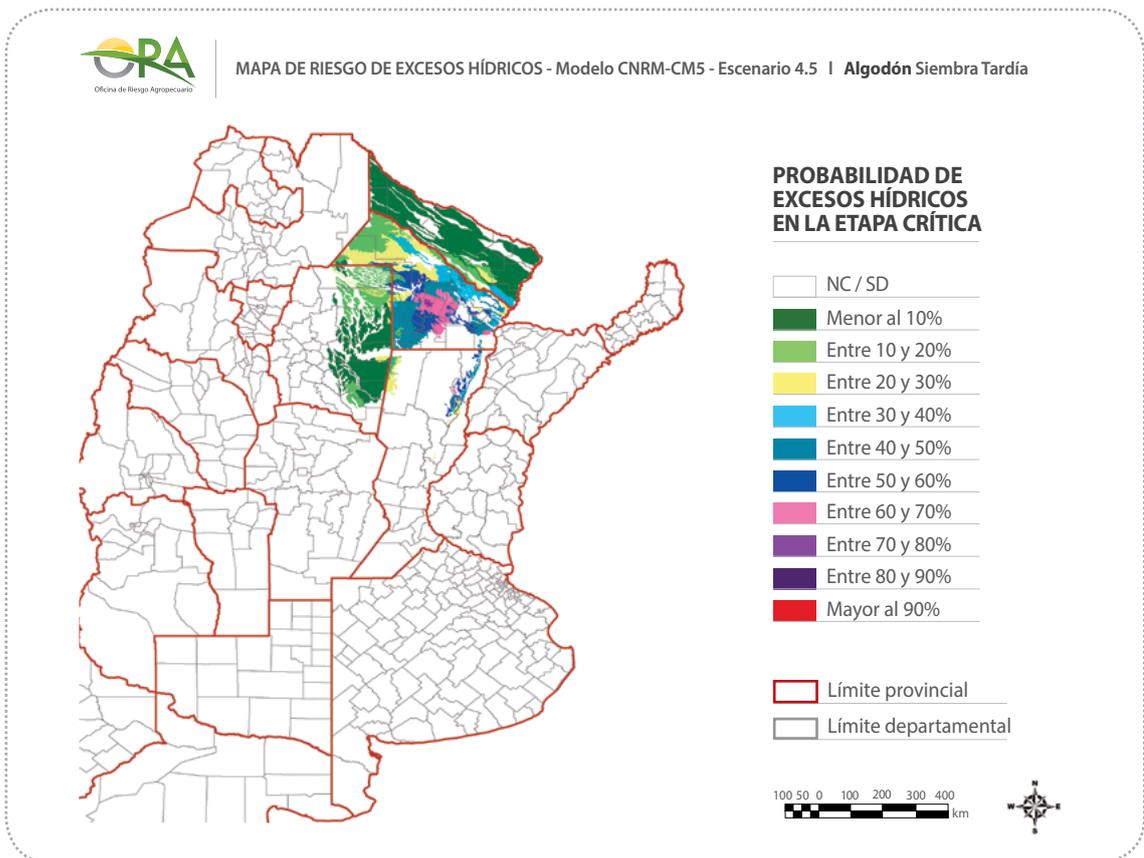
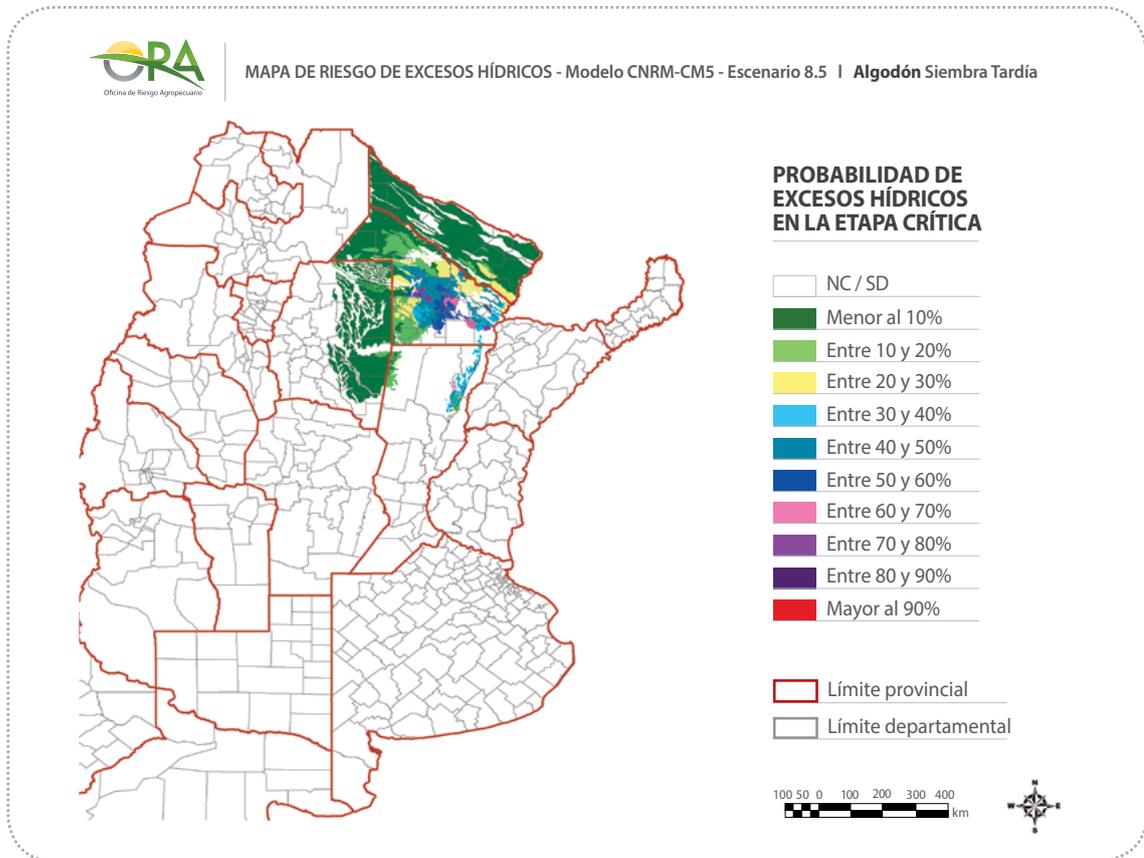
**Figuras 11 y 12:** Mapas de Riesgo para Excesos Hídricos en el cultivo de algodón, siembra temprana, considerando datos modelados para el pasado (arriba) y futuro con escenario extremo (abajo)



**Figuras 13 y 14:** Mapas de Riesgo para Excesos Hídricos en el cultivo de algodón, siembra temprana, considerando datos modelados para el futuro con escenario moderado (arriba) y siembra tardía con datos modelados para el pasado (abajo)



**Figuras 15 y 16:** Mapas de Riesgo para Excesos Hídricos en el cultivo de algodón, siembra tardía, considerando datos modelados para el futuro con escenario extremo (arriba) y con un escenario moderado (abajo)

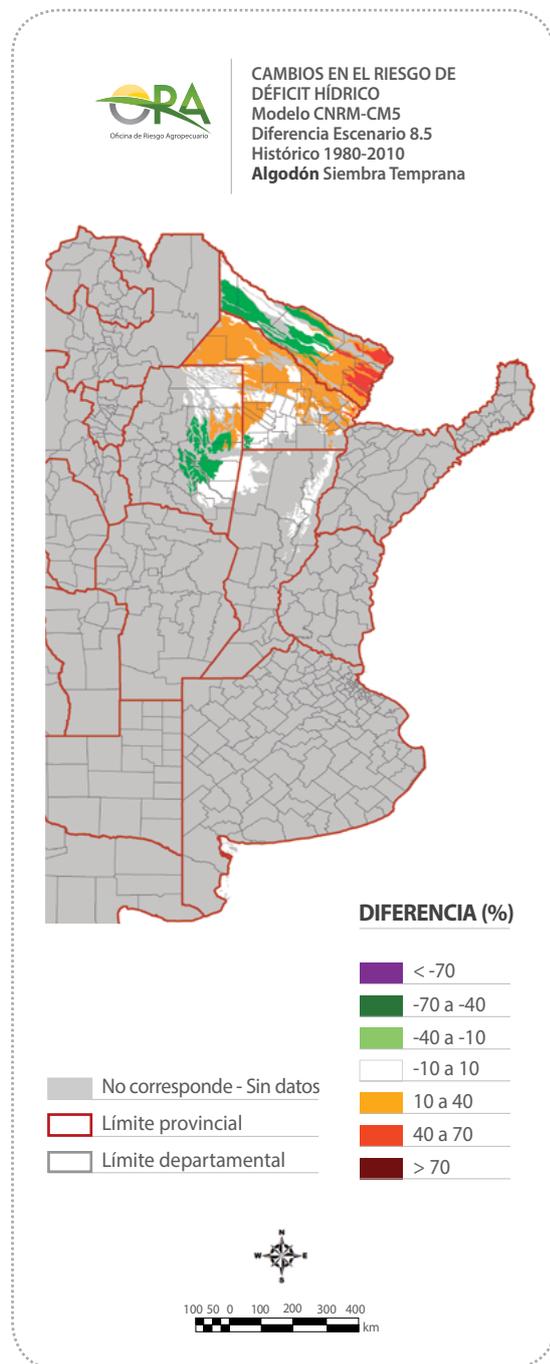
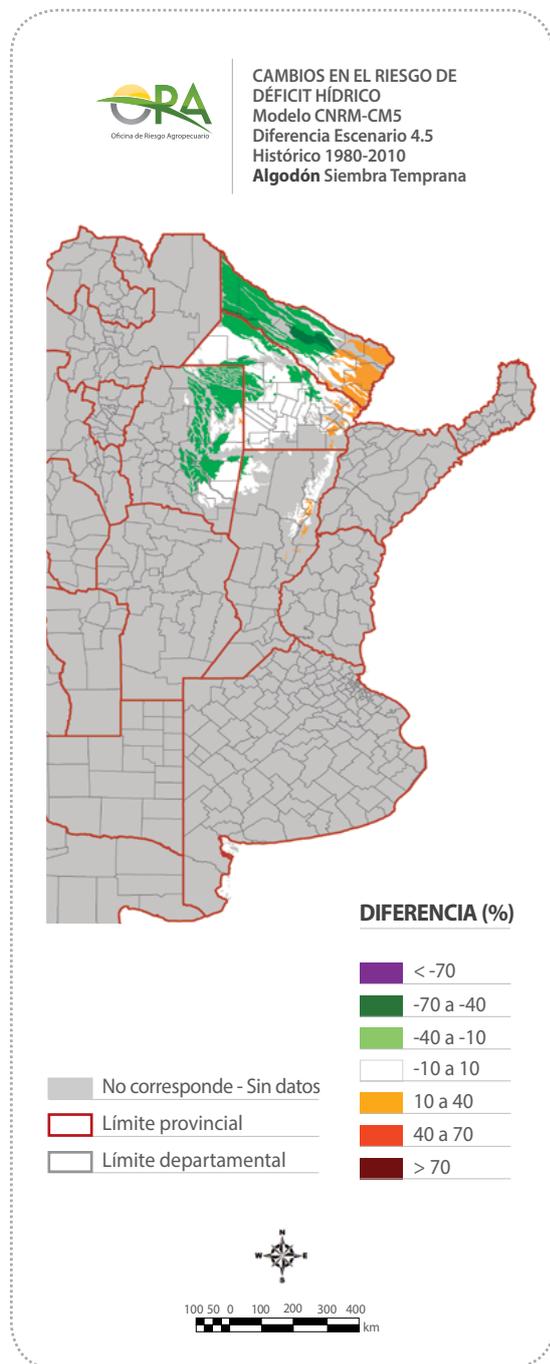


► **Riesgo de déficit hídrico**

Con el escenario moderado (**Figura 17** y **Figura 19**), se observa para la fecha de siembra más temprana (aquí abajo) un aumento del riesgo de déficit sobre el extremo este de Formosa, mientras que el resto del área no muestra cambios o evidenciaría una disminución del riesgo

(centro y este de Formosa y zonas de Santiago del Estero). Para la fecha de siembra más tardía (a continuación en página 31), se mantiene el aumento del riesgo sobre el este de Formosa, pero aparecen además otras áreas con aumento más al sur.

**Figuras 17 y 18:** Cambios en el Riesgo de Déficit Hídrico para el cultivo de algodón de siembra temprana, considerando escenarios moderado (izquierda) o extremo (derecha) respecto del análisis histórico

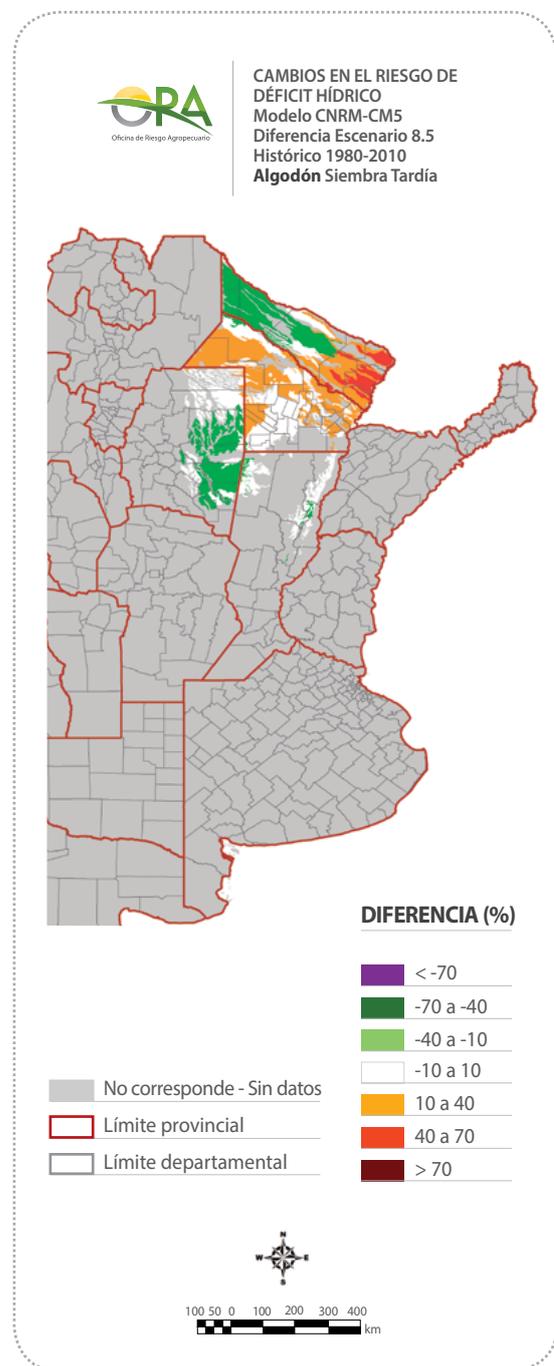
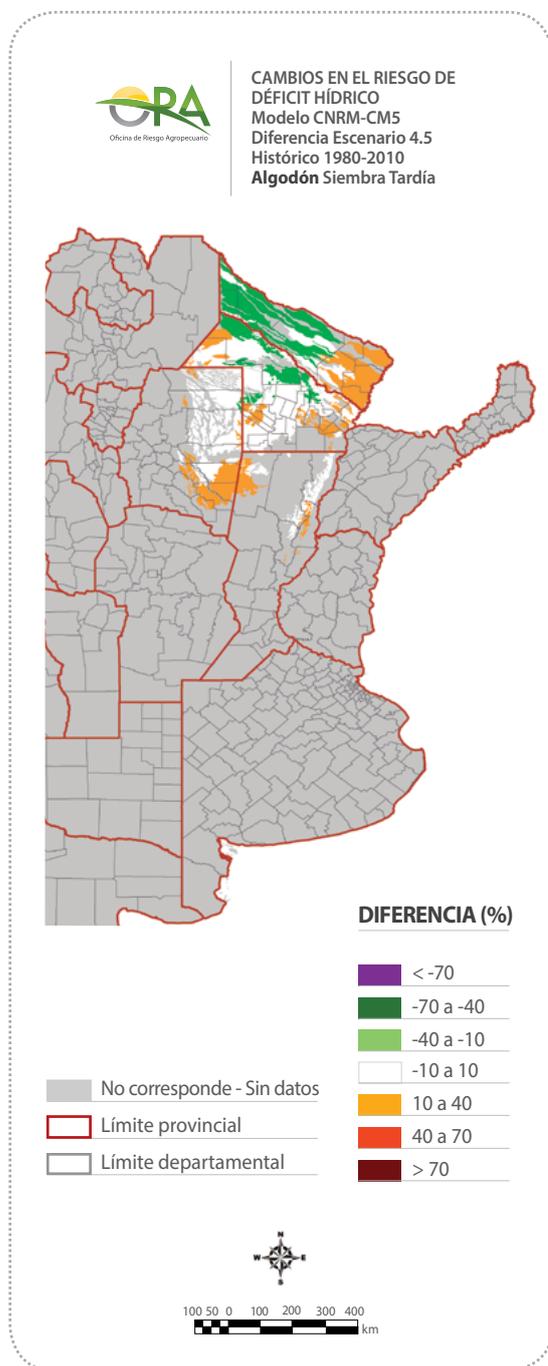


Con el escenario extremo (**Figura 18 y Figura 20**), el aumento del riesgo de déficit en el este de Formosa se vuelve moderado para la fecha de siembra temprana (página 30) y prácticamente toda la provincia de Chaco muestra aumento del riesgo. El resultado es muy similar para la fecha de siembra tardía (aquí abajo),

aunque aumenta un poco el área con disminución del riesgo en Formosa y Santiago del Estero.

El aumento moderado del riesgo de déficit hídrico con el escenario extremo se genera por la fuerte disminución en la precipitación del mes

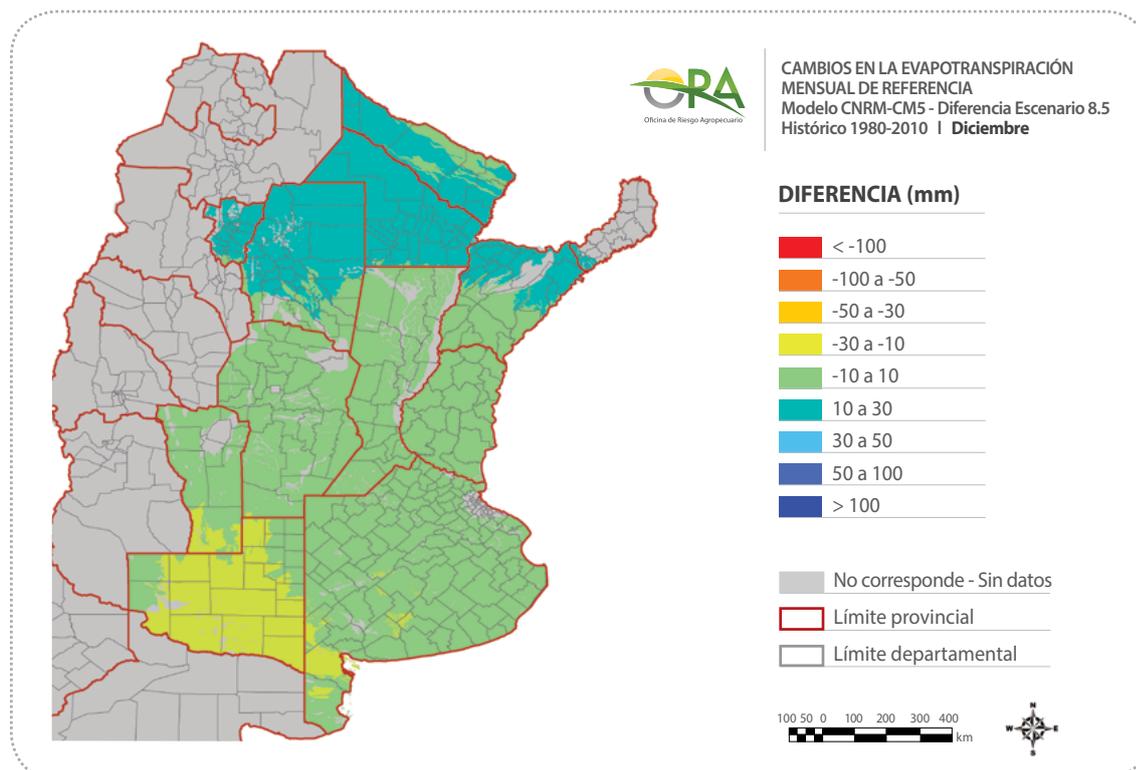
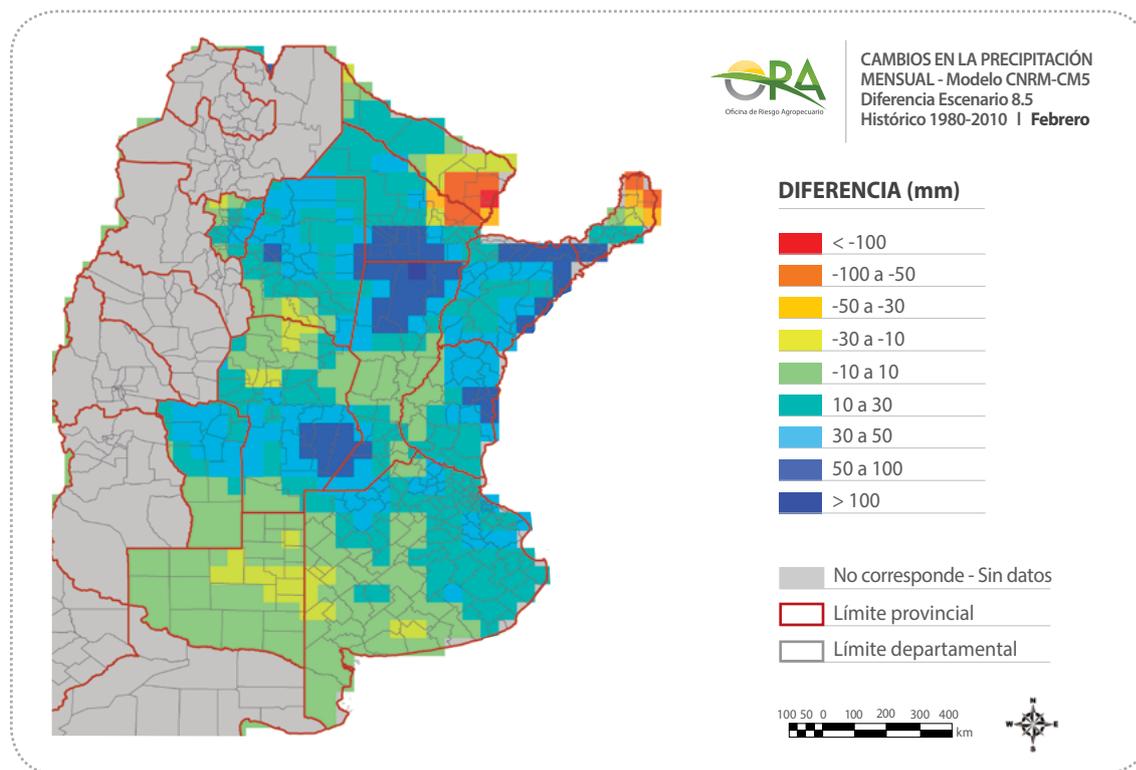
**Figuras 19 y 20:** Cambios en el Riesgo de Déficit Hídrico para el cultivo de algodón de siembra tardía, considerando escenarios moderado (izquierda) o extremo (derecha) respecto del análisis histórico



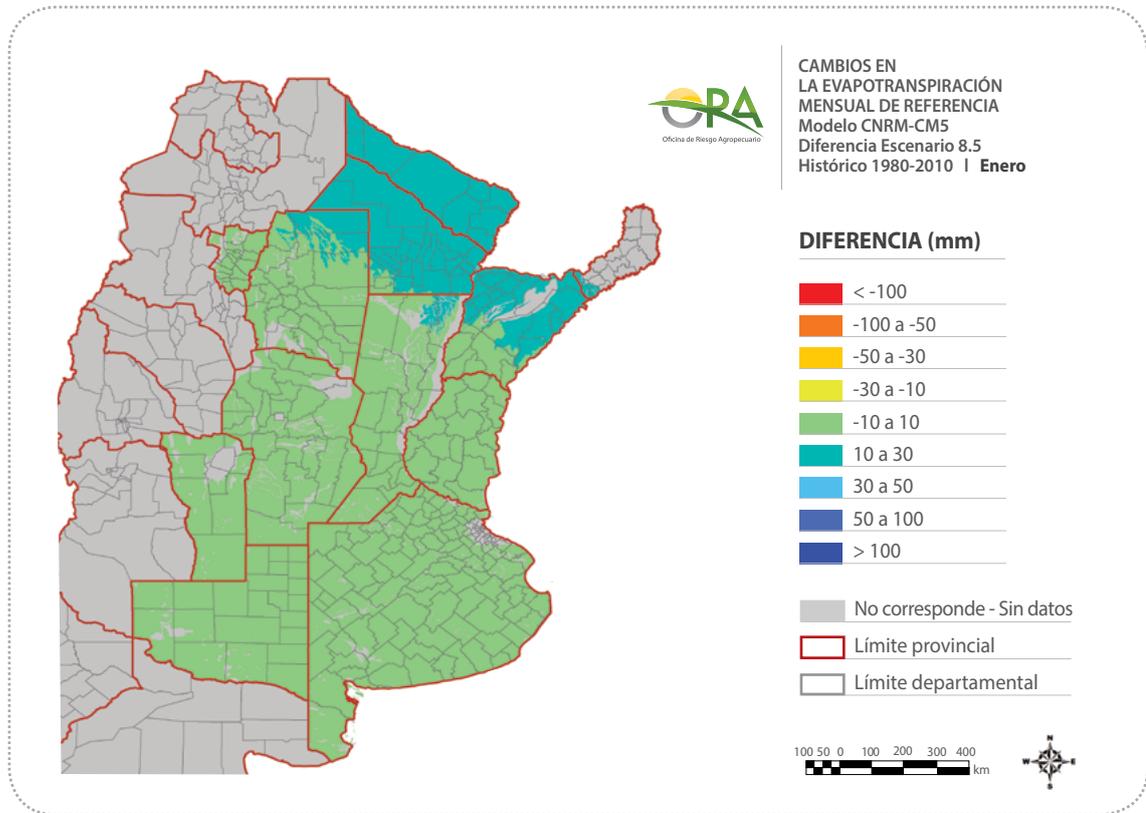
de febrero (-50mm a -100mm) (Figura 21) que estima el modelo para ese escenario. La evapotranspiración muestra un leve incremento

(10mm a 30mm) en prácticamente toda la zona en los meses de diciembre y enero (Figura 22 y Figura 23 a continuación en página 33).

**Figuras 21 y 22:** Cambios en la precipitación del mes de febrero (arriba) y en la evapotranspiración de referencia para el mes de diciembre (abajo), para el escenario extremo respecto de la serie histórica



**Figura 23:** Cambios en la evapotranspiración de referencia para el mes de enero, para el escenario extremo respecto de la serie histórica



► **Riesgo de excesos hídricos**

Con el escenario moderado (**Figura 24 y Figura 26**), se observa para la fecha de siembra más temprana un aumento en el riesgo de excesos que abarca la provincia de Chaco y áreas del norte de la provincia de Santa Fe. Para la fecha más tardía, el aumento del riesgo se concentra en el oeste de Chaco y noreste de Santiago del Estero, predominando las áreas sin cambio previsto.

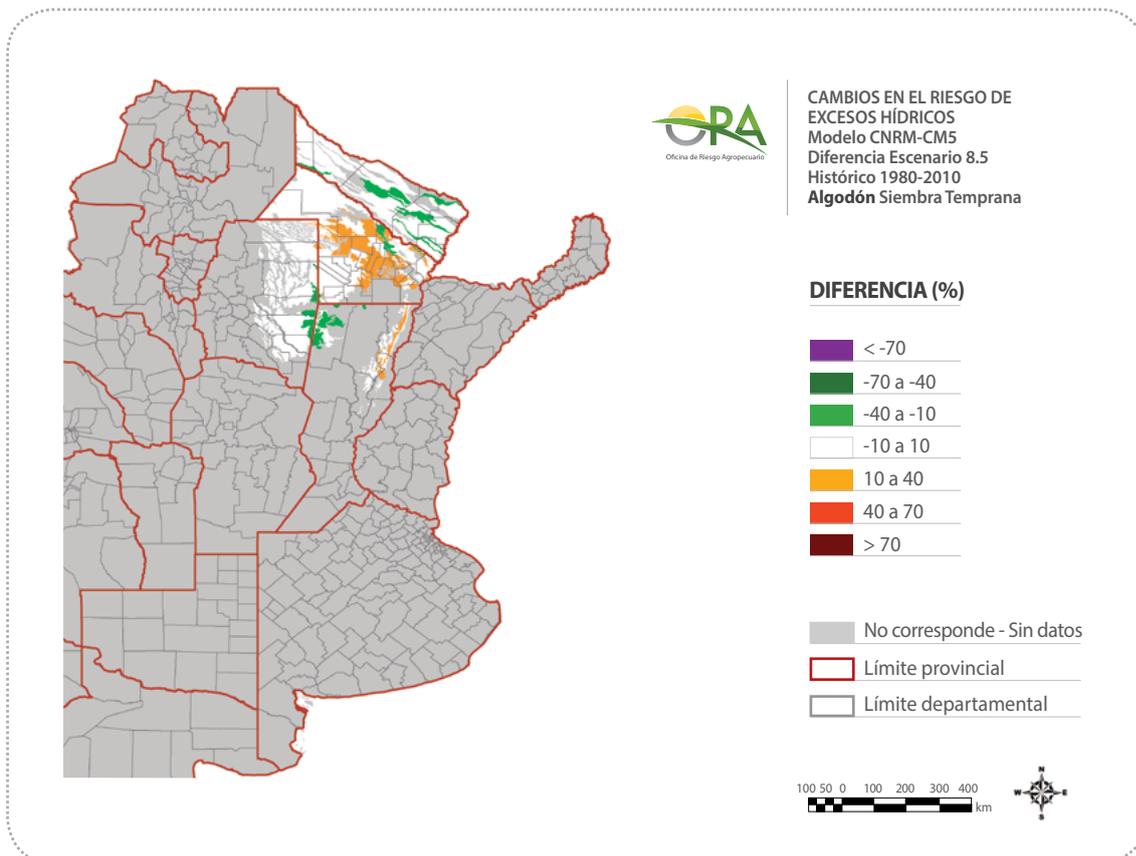
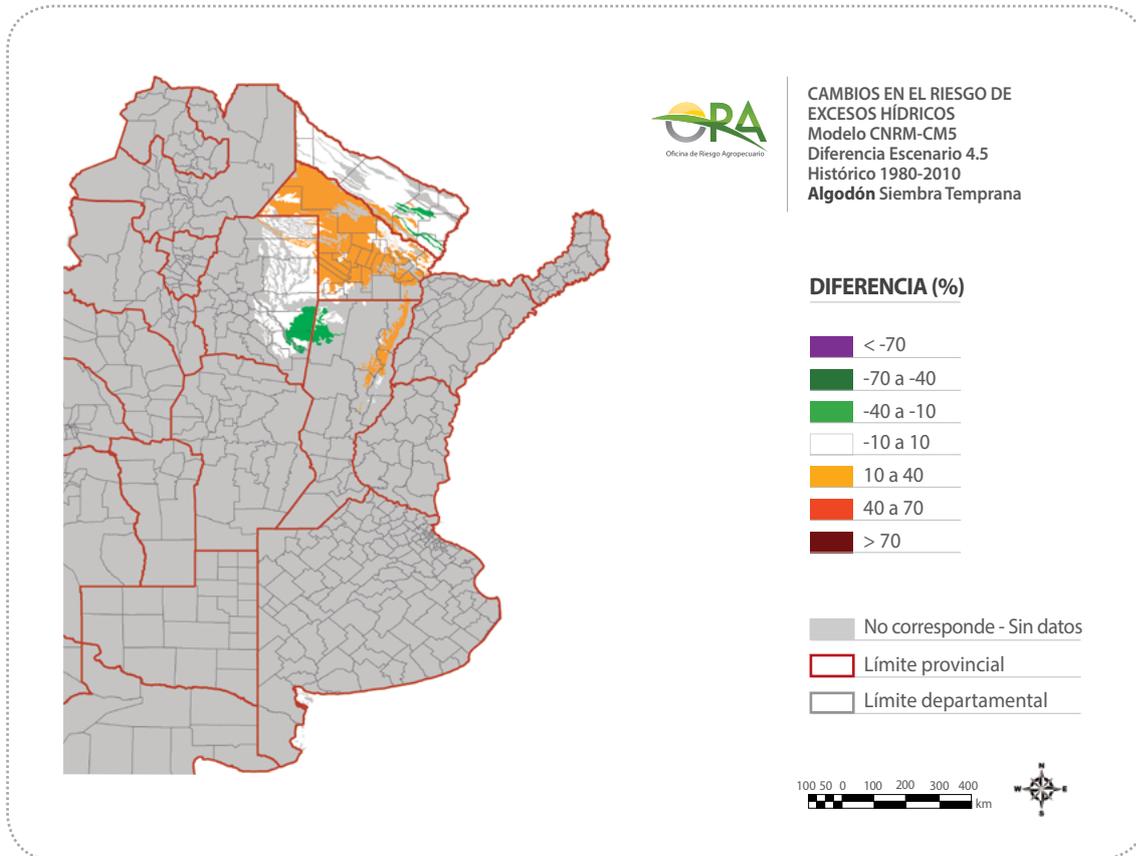
Con el escenario extremo (**Figura 25 y Figura 27**), el aumento del riesgo de excesos para la siembra temprana (página 34) es menor, también ubicado en la provincia de Chaco y norte de Santa Fe.

Con la siembra más tardía (**Figura 27** en pá-

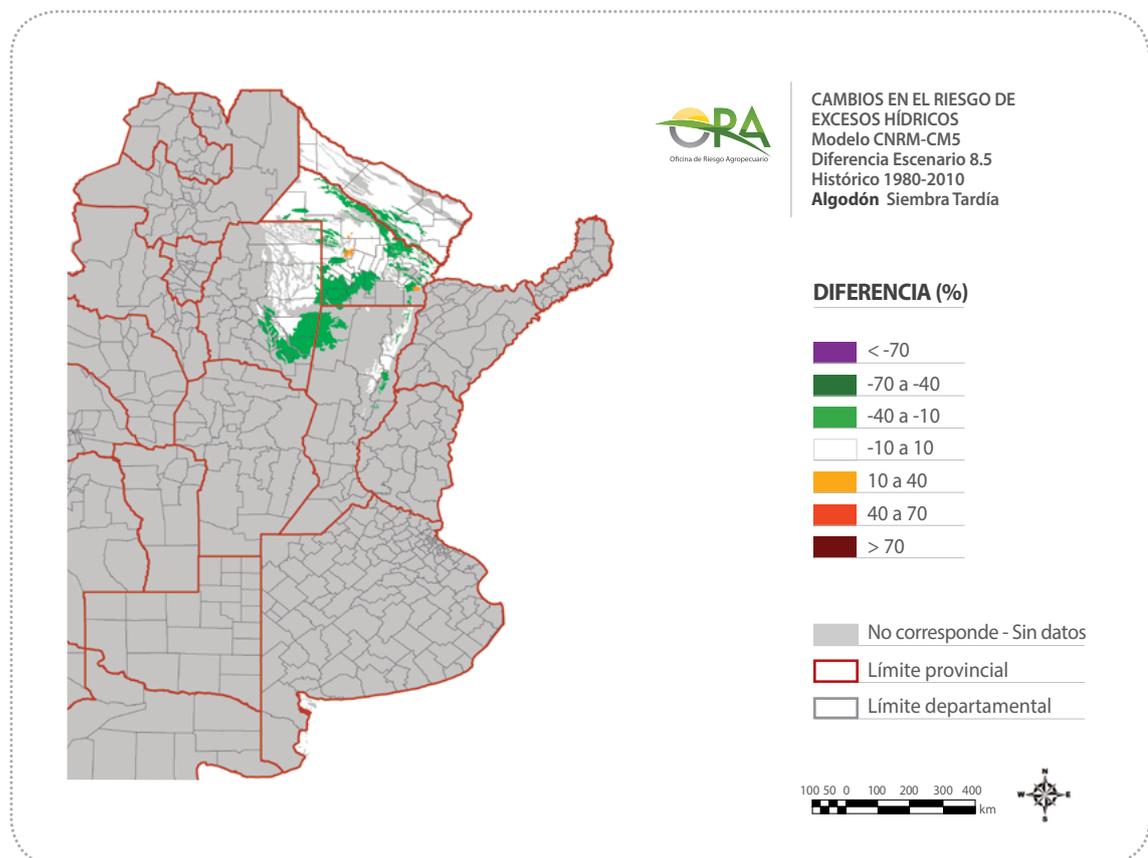
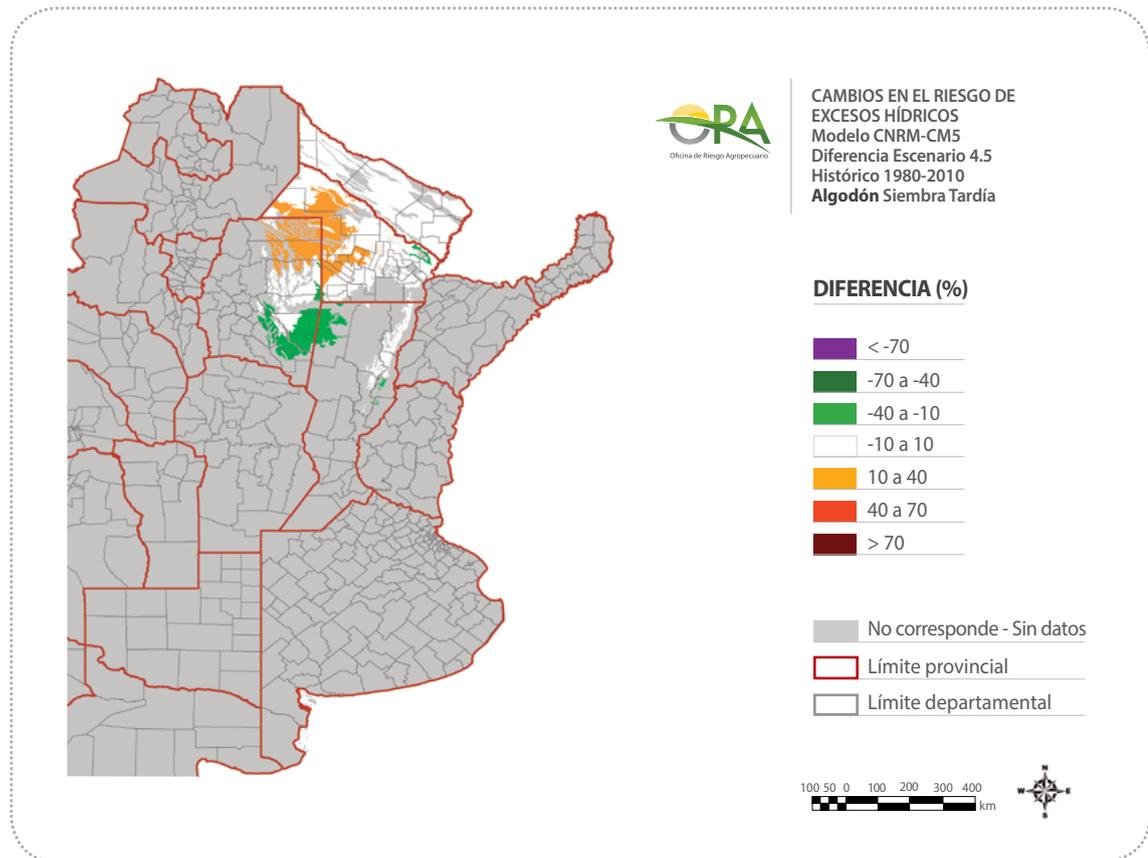
gina 35) predominan las áreas sin cambio y se observan áreas con disminución prevista en el riesgo en el sudeste de Santiago del Estero y sudoeste de Chaco.

El aumento en el riesgo para el escenario moderado y fecha temprana se debe al aumento en las precipitaciones de marzo (50mm a 100mm) (**Figura 28** más adelante en página 36) previstas por el modelo para la mayor parte de la provincia de Chaco. El escenario extremo prevé una disminución de las precipitaciones en el mes de abril (-30mm a -50mm) (**Figura 29** más adelante en página 36) en el sudeste de Santiago del Estero, lo cual genera una disminución en el riesgo de excesos para esta zona.

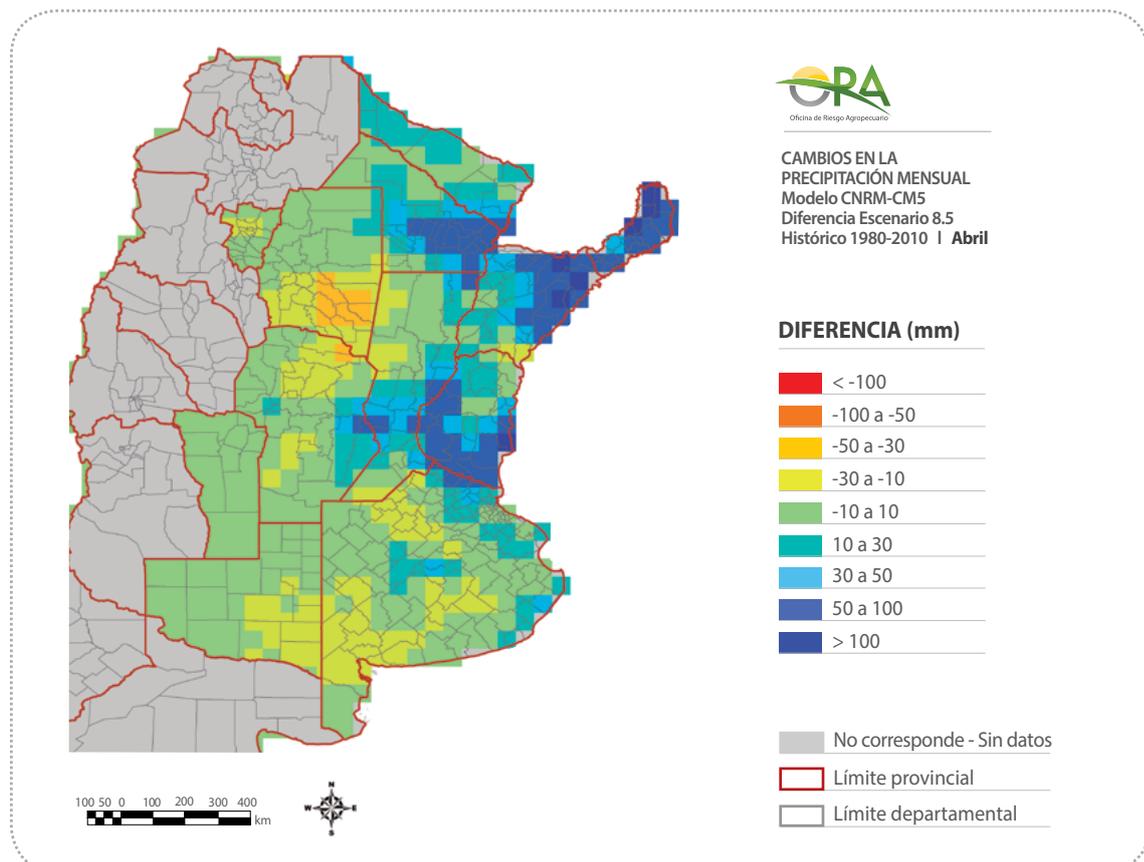
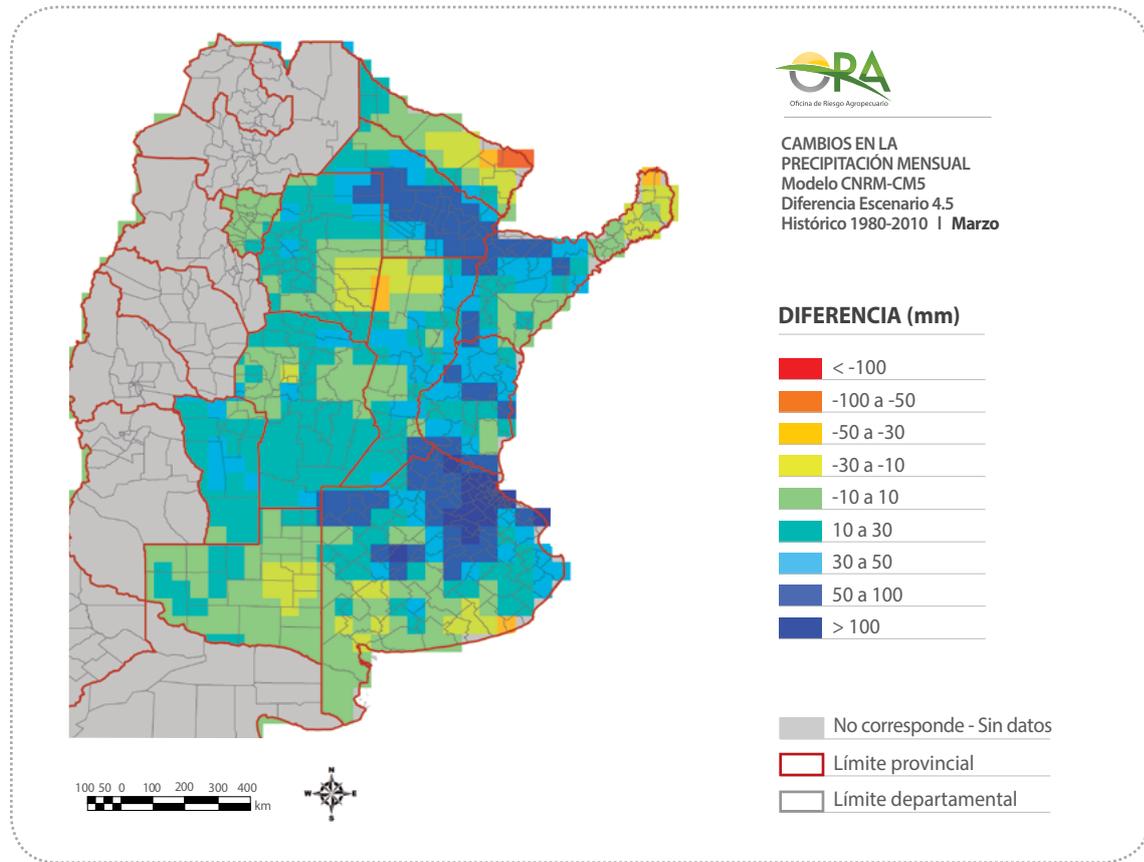
**Figuras 24 y 25:** Mapas de diferencias (aumentos y disminuciones) de Riesgo de Excesos Hídricos para algodón de siembra temprana



**Figuras 26 y 27:** Mapas de diferencias (aumentos y disminuciones) de Riesgo de Excesos Hídricos para algodón de siembra tardía



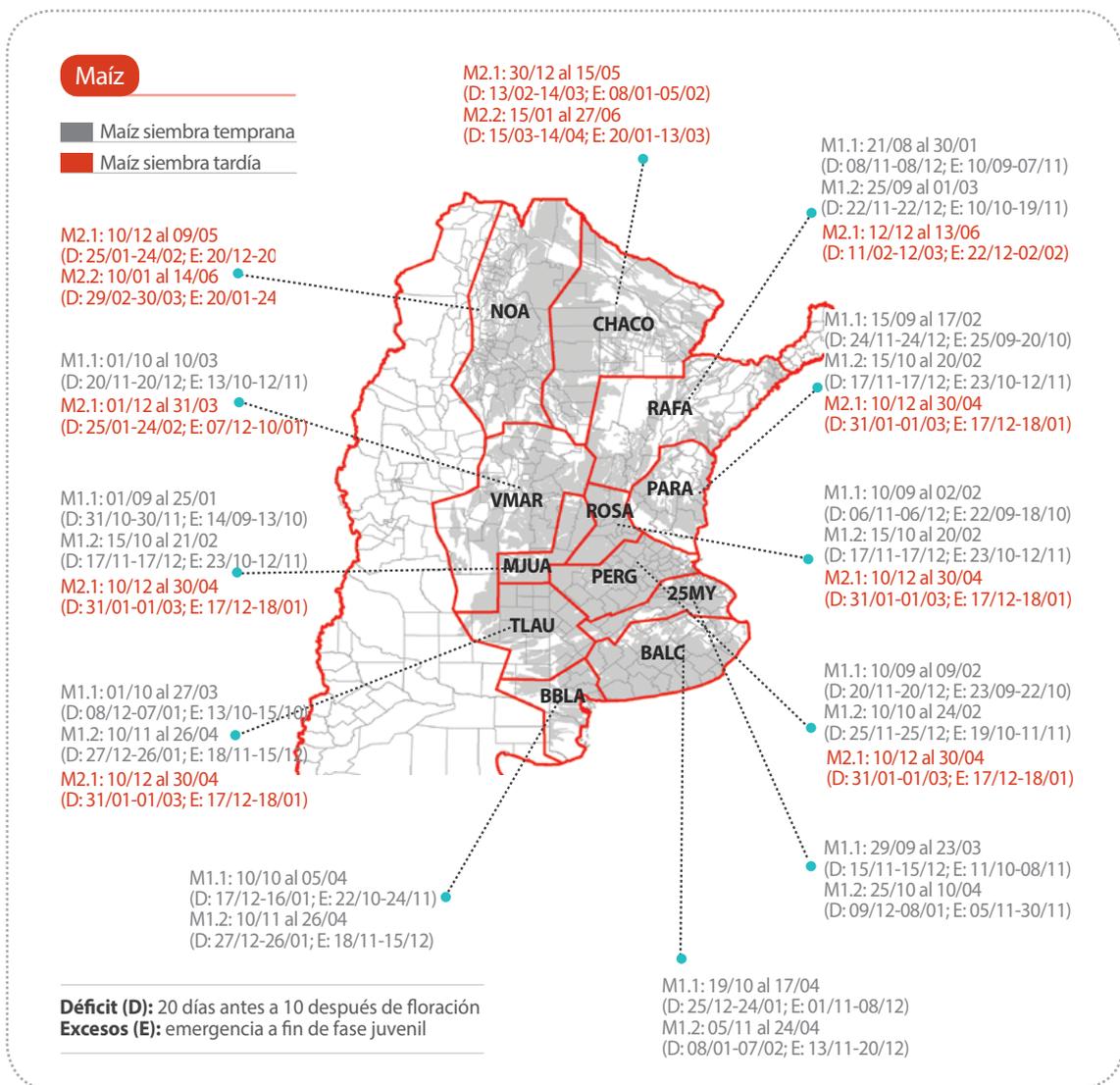
**Figuras 28 y 29:** Cambios en la precipitación del mes de marzo para el escenario moderado (arriba) y para el mes de abril para el escenario extremo respecto de la serie histórica (abajo)



El área de ocupación del **maíz** en el país (**Figura 30**) es muy amplia: abarca toda la región pampeana y el NEA, además de parte del NOA. La zona de estudio se halla dividida en 2 zonas homogéneas desde el punto de vista de sus

calendarios. En la zona CHACO se consideraron ciclos de siembra tardía solamente, mientras que en la zona RAFA se evaluaron ciclos de siembra temprana y una fecha tardía con siembra en diciembre.

**Figura 30:** zonas de fenología homogénea para maíz, inicio y fin del ciclo, periodos críticos para déficit (D) y excesos hídricos (E)



En general, y con respecto a otros cultivos, se considera que el maíz es sensible al estrés hídrico. El ajuste osmótico del maíz ante la carencia de agua no es tan bueno como el del algodón, el sorgo o el trigo. Adicionalmente y como ya se mencionó, su naturaleza altamente

determinada dificulta compensar la pérdida en productividad después de que el período de estrés hídrico se supera. El rendimiento de grano se reduce drásticamente como resultado de la polinización fallida por causa del estrés.

• **Periodo crítico para déficit hídrico (D):** 20 días antes a 10 días después de floración

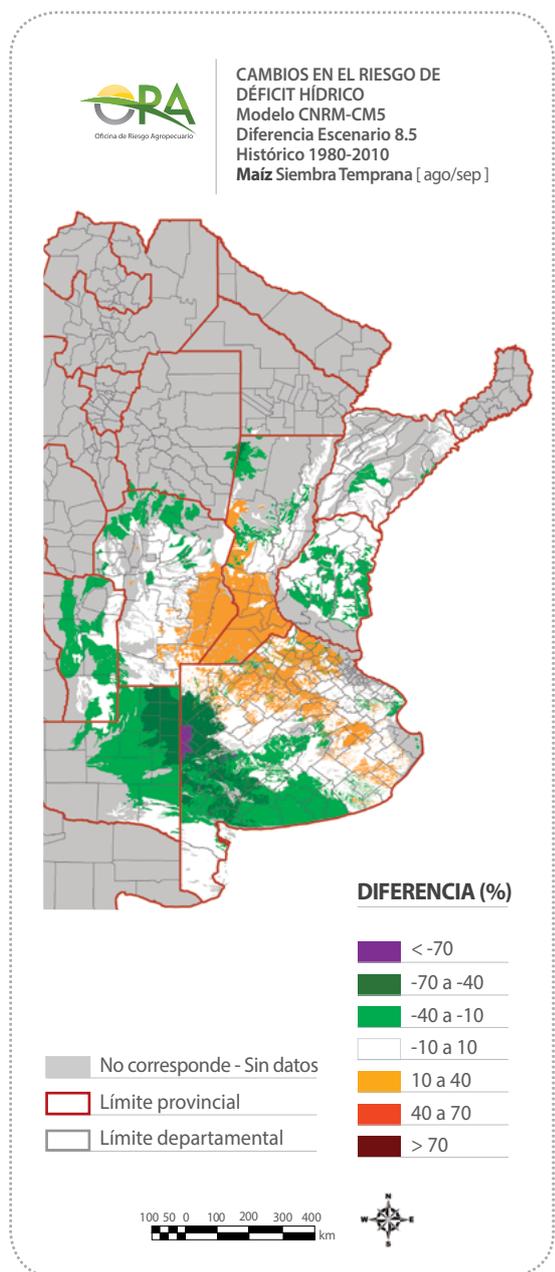
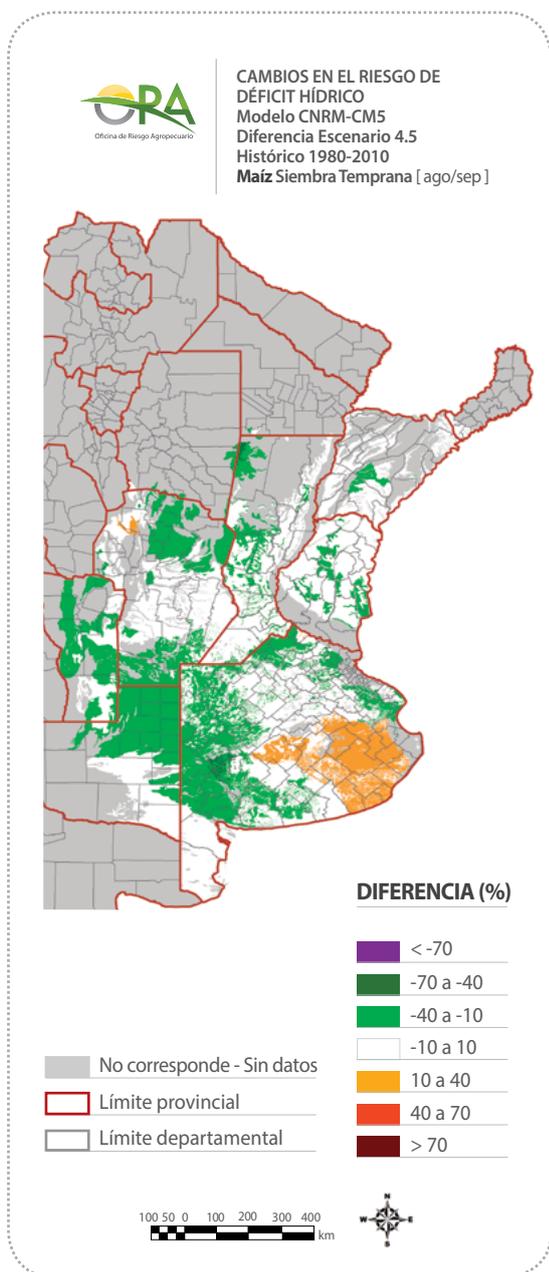
• **Periodo crítico para excesos hídricos (E):** Emergencia a fin de fase juvenil

Los periodos críticos para déficit para M1.1 y M1.2 se hallan dentro del periodo noviembre - diciembre, mientras que para M2.1 y M2.2 se concentran más en el bimestre febrero - marzo o

marzo – abril, respectivamente. Los periodos críticos considerados abarcan siempre 30 días.

Los periodos críticos para excesos tienen lugar antes, dentro del intervalo septiembre – octubre para M1.1 y M1.2 y fines de diciembre a principio de marzo para M2.1 y M2.2. Los periodos críticos para excesos tienen una extensión de entre 30 a 60 días.

**Figuras 31 y 32:** Cambios en el Riesgo de Déficit Hídrico para maíz de siembra temprana primera fecha, considerando escenario moderado (izquierda) o extremo (derecha) respecto del análisis histórico

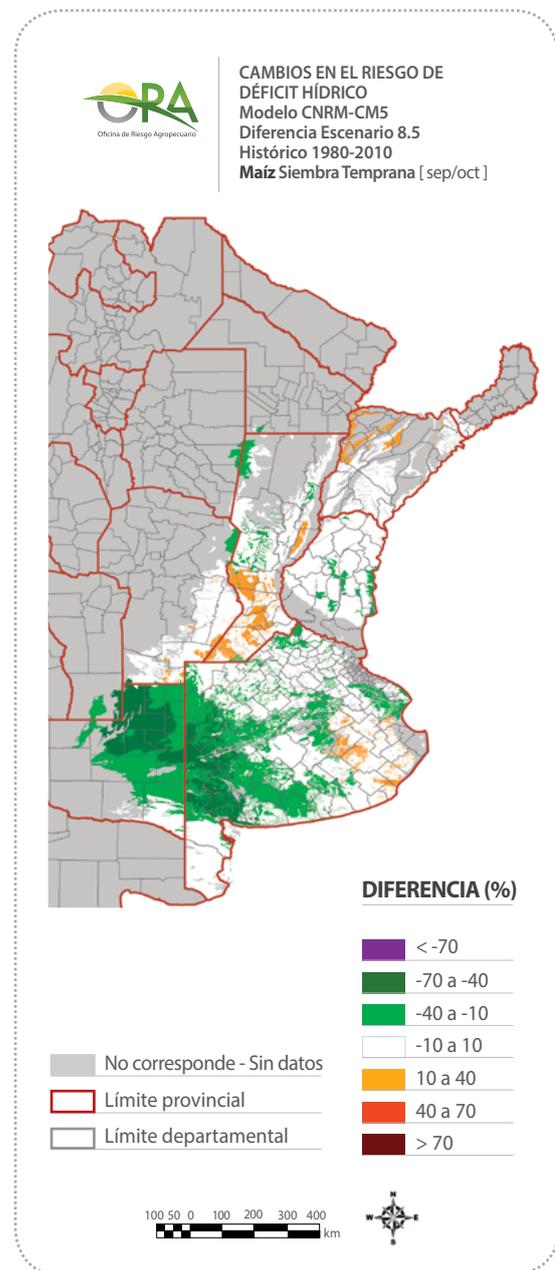
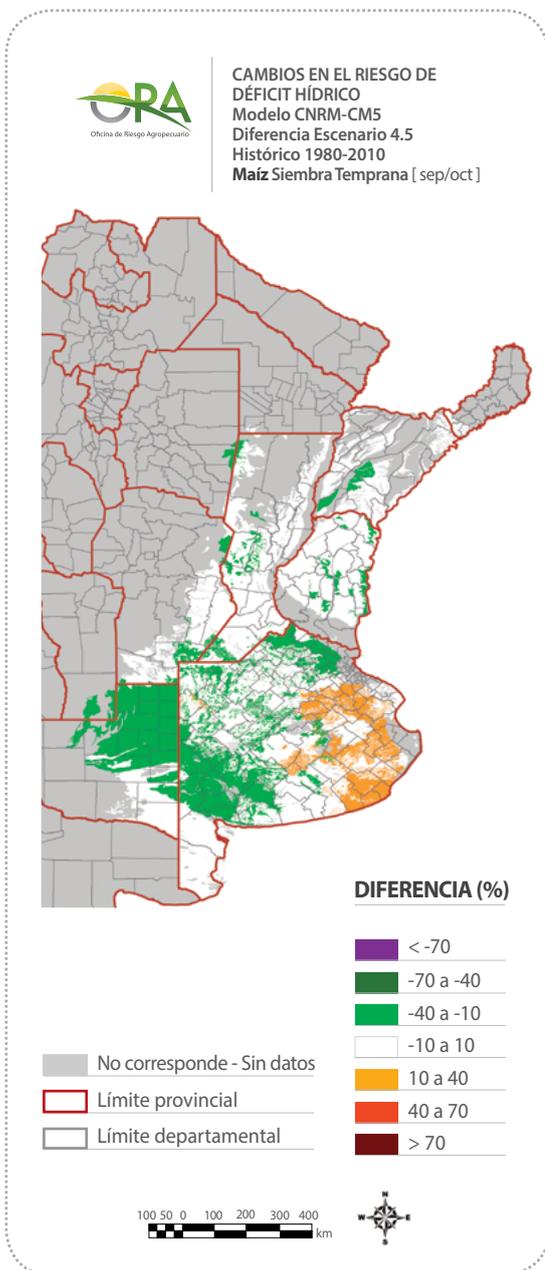


► Riesgo de déficit hídrico

Para siembras tempranas (**Figuras 31 a 34**), predominan las áreas sin cambios significativos en los niveles de riesgo en el área de estudio. Sólo aparecen algunas áreas menores con disminución en el riesgo en el norte de Santa Fe y Corrientes para el escenario moderado. En estas zonas el escenario moderado prevé un aumento de la precipitación en el mes de no-

viembre (30mm a 100mm). Con el escenario extremo, aparecen algunas áreas con aumento del riesgo en el noroeste de Corrientes para segunda fecha. Esto se debe a que el escenario extremo prevé una disminución de la precipitación de diciembre (-50mm a -100mm), además de un leve aumento en la evapotranspiración (10mm a 30mm).

**Figuras 33 y 34:** Cambios en el Riesgo de Déficit Hídrico para maíz de siembra temprana segunda fecha, considerando escenario moderado (izquierda) o extremo (derecha) respecto del análisis histórico

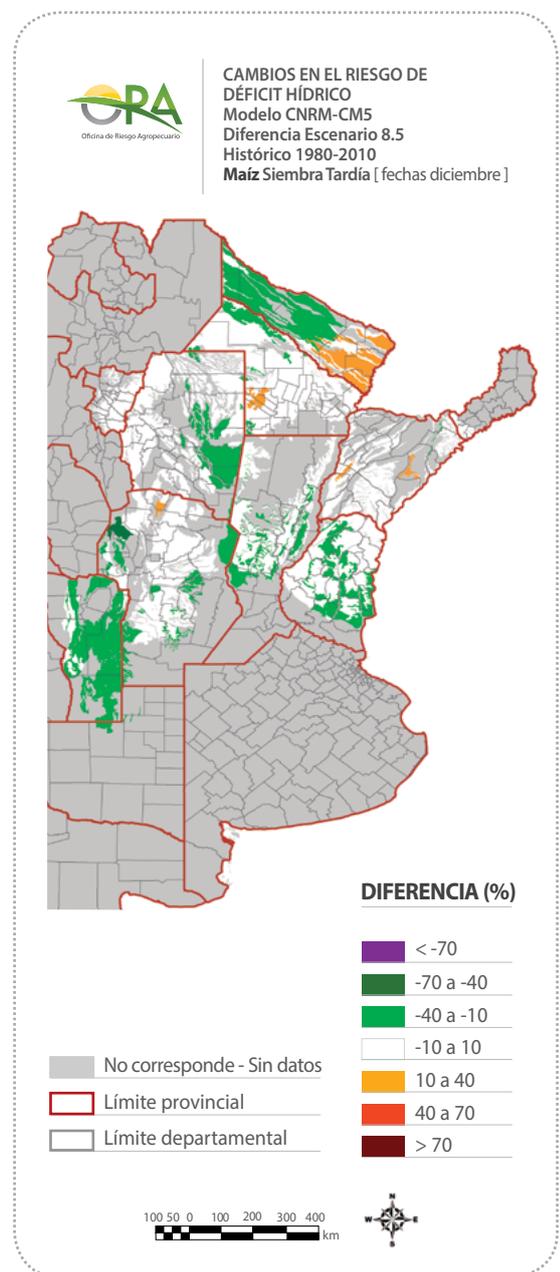
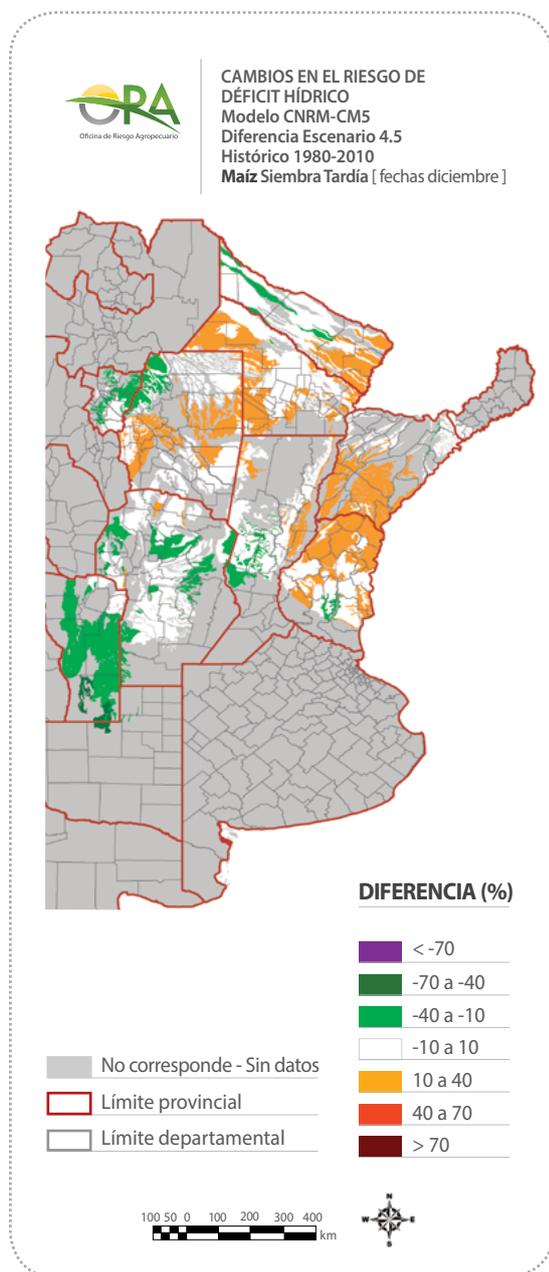


Para siembras tardías (**Figuras 35 y 36**), para la primera fecha y con el escenario moderado aparecen zonas con aumento del riesgo dispersas por toda el área de estudio. Esto se debe a la leve disminución prevista para las precipitaciones de febrero (-10mm a -30mm). En el este de Formosa la merma prevista en las lluvias de ese mes es mayor (-50mm a -100mm). Para el escenario extremo no se prevé esta disminución en las precipitaciones

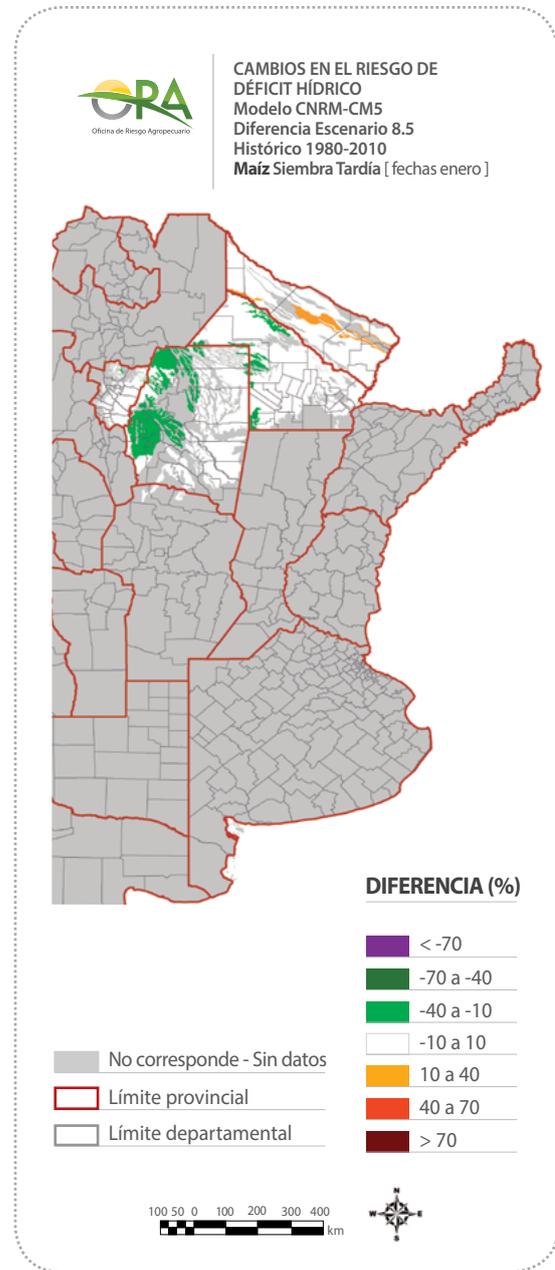
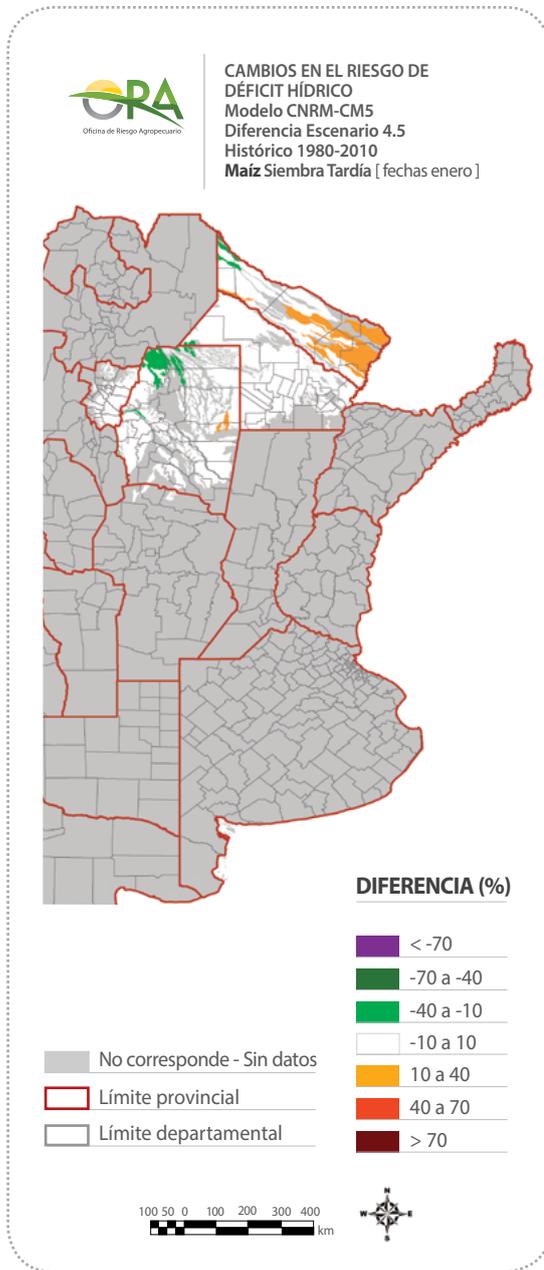
en general, pero se mantiene la merma esperada para el este de Formosa.

Para siembras tardías, para la segunda fecha y con ambos escenarios, los cambios previstos en los niveles de riesgo de déficit son menores. Se destaca el este de Formosa con un aumento en el riesgo para el escenario moderado, derivado de la disminución esperada en las precipitaciones de febrero.

**Figuras 35 y 36:** Cambios en el Riesgo de Déficit Hídrico para maíz de siembra tardía primera fecha, considerando escenario moderado (izquierda) o extremo (derecha) respecto del análisis histórico



**Figuras 37 y 38:** Cambios en el Riesgo de Déficit Hídrico para maíz de siembra tardía segunda fecha, considerando escenario moderado (izquierda) o extremo (derecha) respecto del análisis histórico



### ► Riesgo de excesos hídricos

Los escenarios y fechas de siembra arrojan resultados similares en el área de estudio para las siembras tempranas (**Figuras 39 a 42**), con predominio de zonas sin cambio significativo en los niveles de riesgo de excesos. Se destaca un aumento en el riesgo en el sudeste de Corrientes debido al aumento previsto en las precipitaciones de los

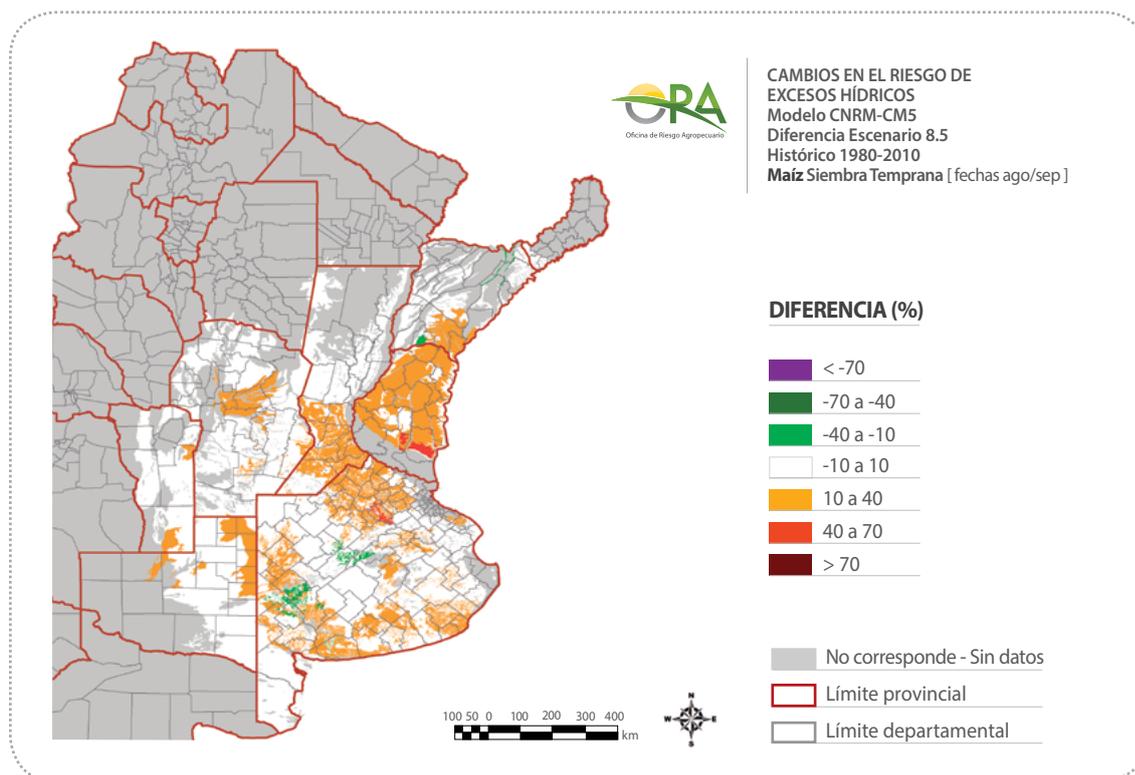
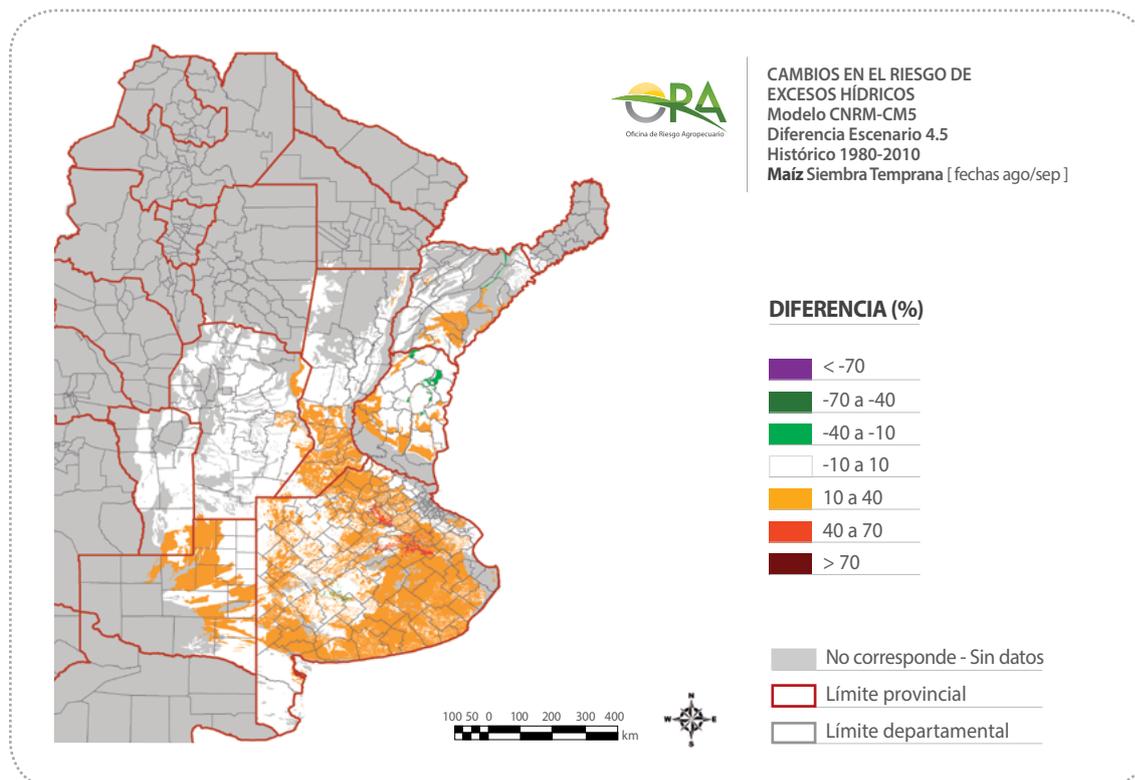
meses de septiembre y octubre (50mm a 100mm).

Las fechas de siembra tardía muestran un aumento del riesgo de excesos en el oeste de Formosa y en áreas de Santiago del Estero, para ambas fechas y con ambos escenarios (**Figuras 43 a 46**). Esto se asocia al aumento previsto en las preci-

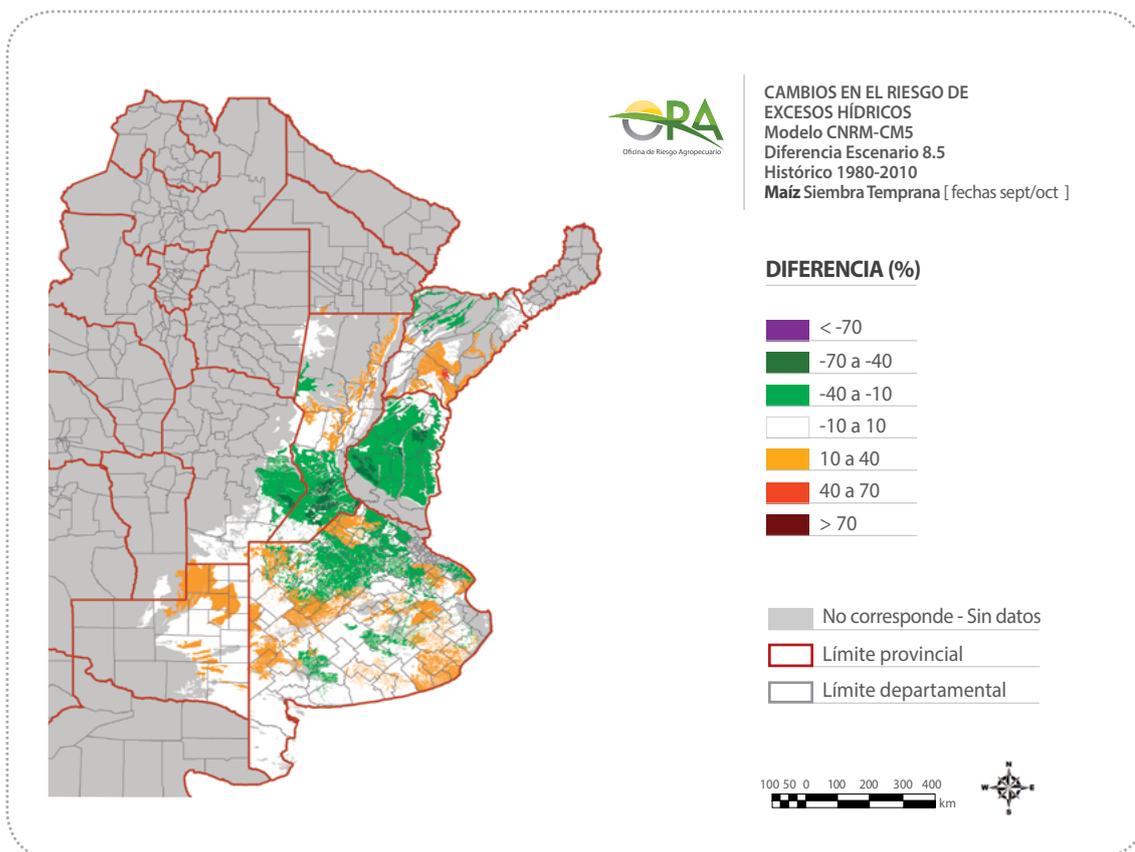
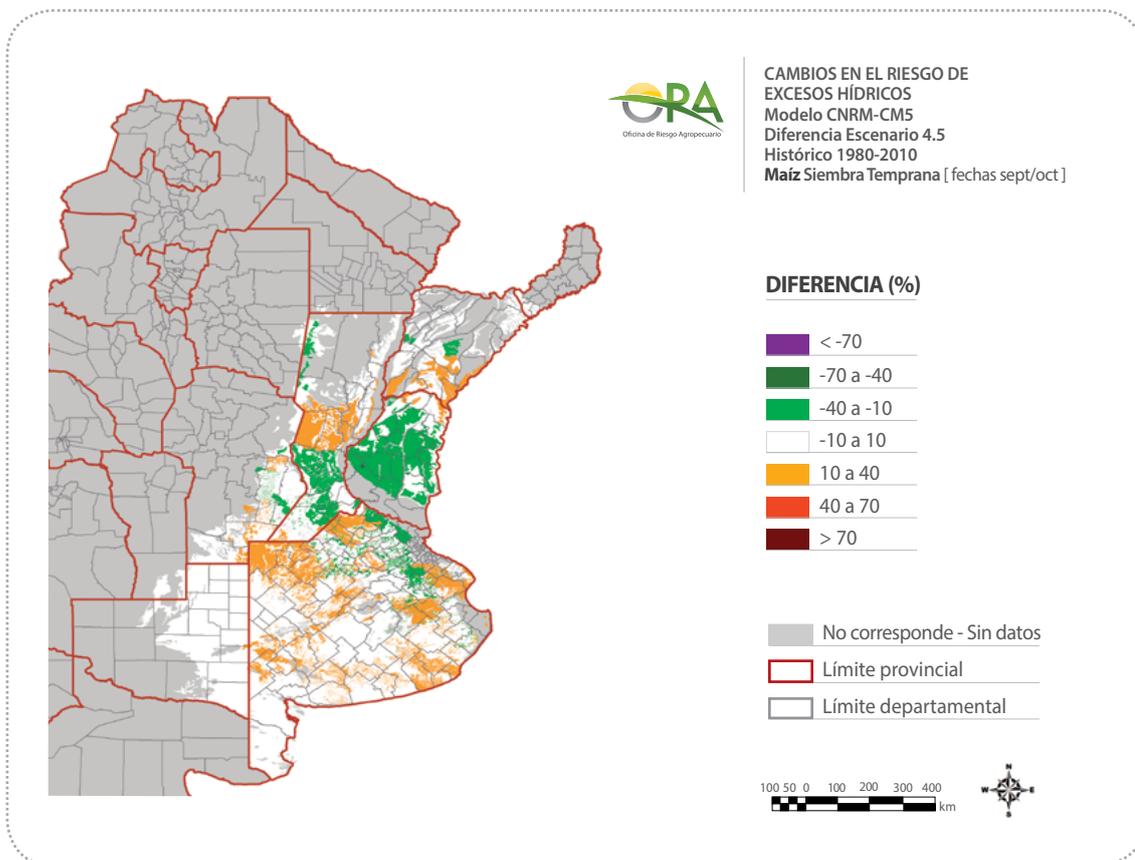
pitaciones de diciembre en Santiago del Estero (3mm a 100mm) y en enero en el oeste de For-

mosa (30mm a 50mm). Para el escenario extremo, estos aumentos se prevén también para marzo.

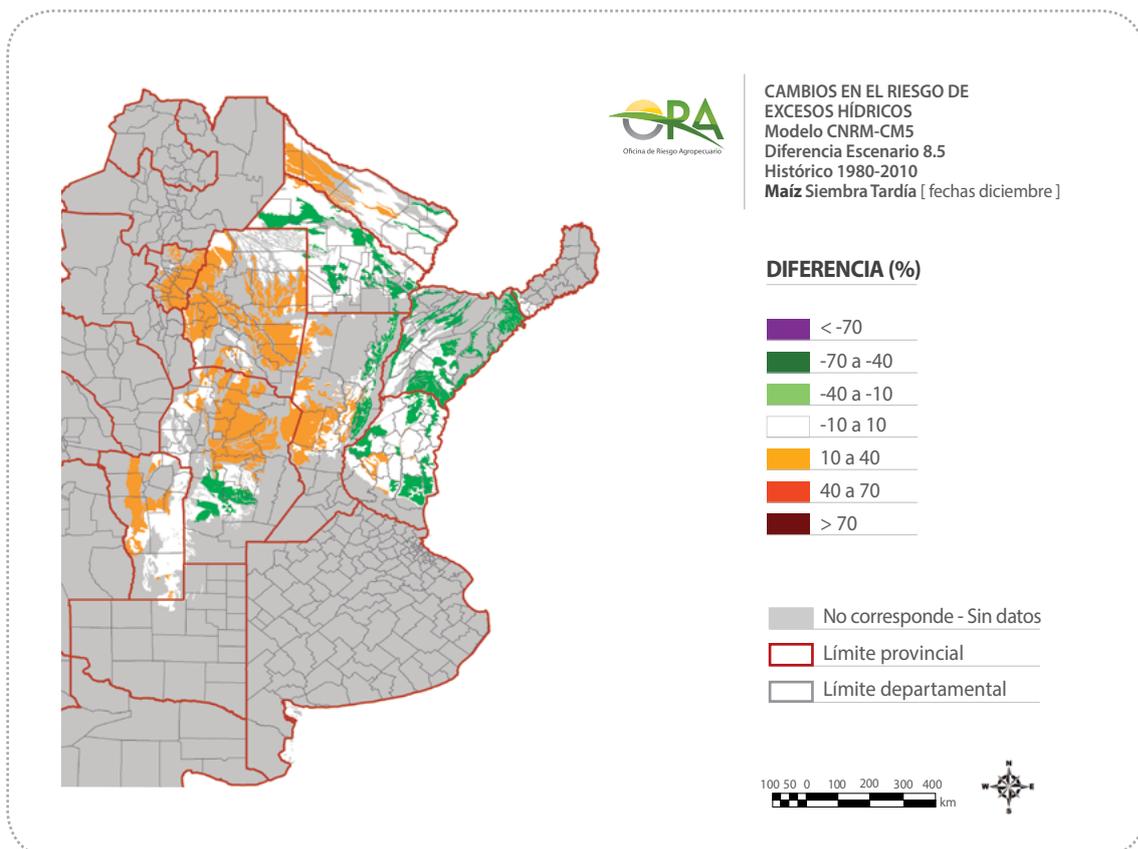
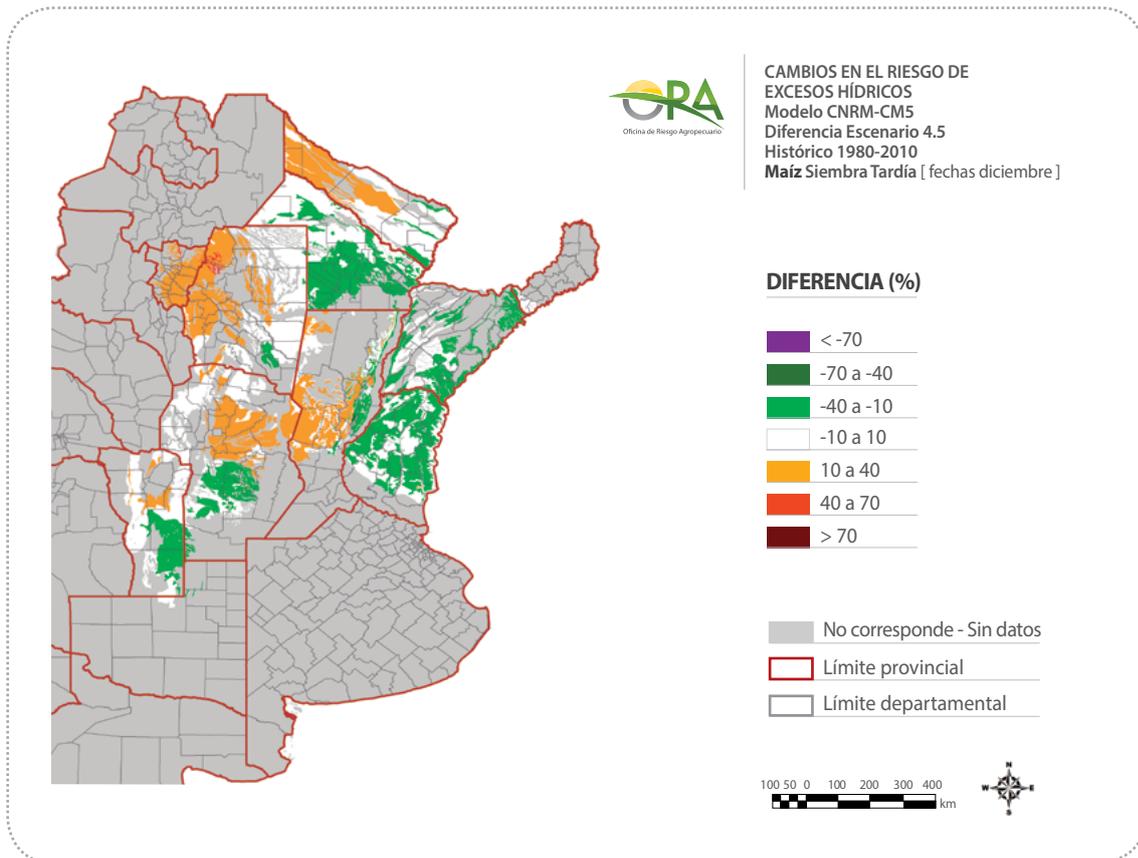
**Figuras 39 y 40:** Cambios en el Riesgo de Excesos Hídricos para maíz de siembra temprana primera fecha, considerando escenario moderado (arriba) o extremo (abajo) respecto del análisis histórico



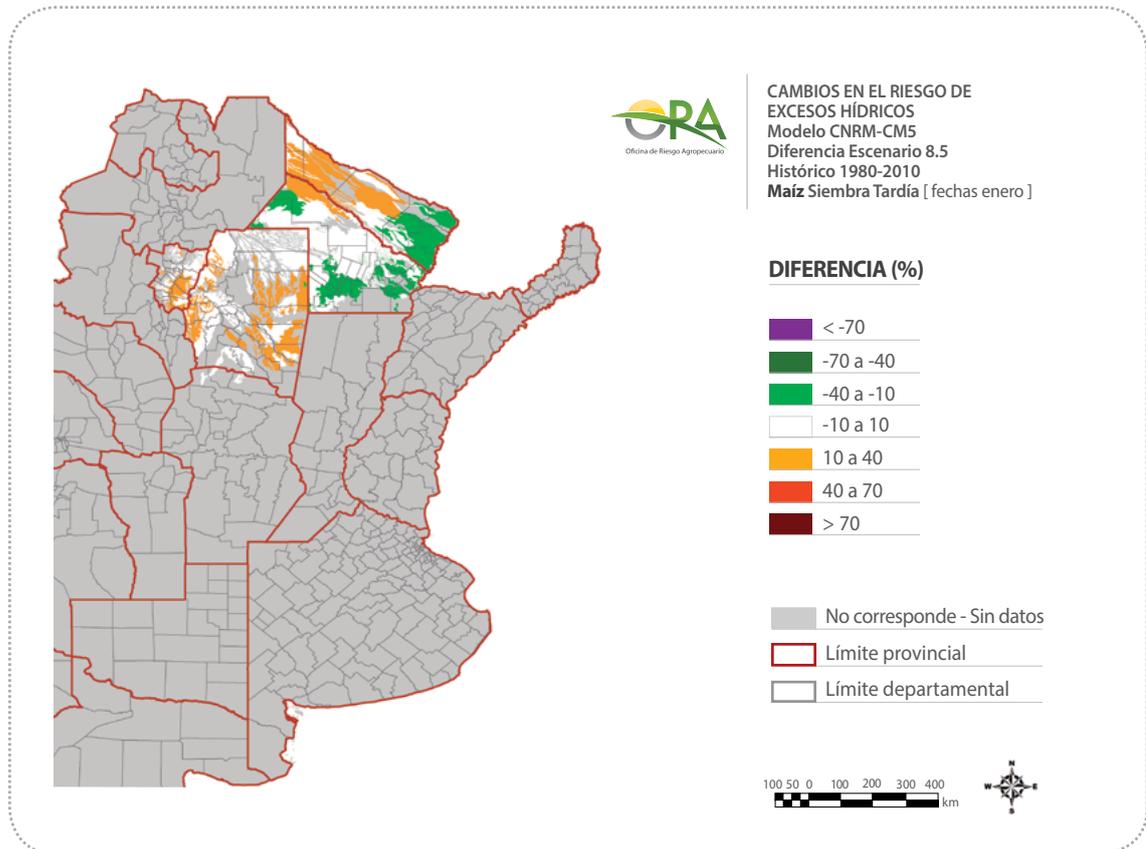
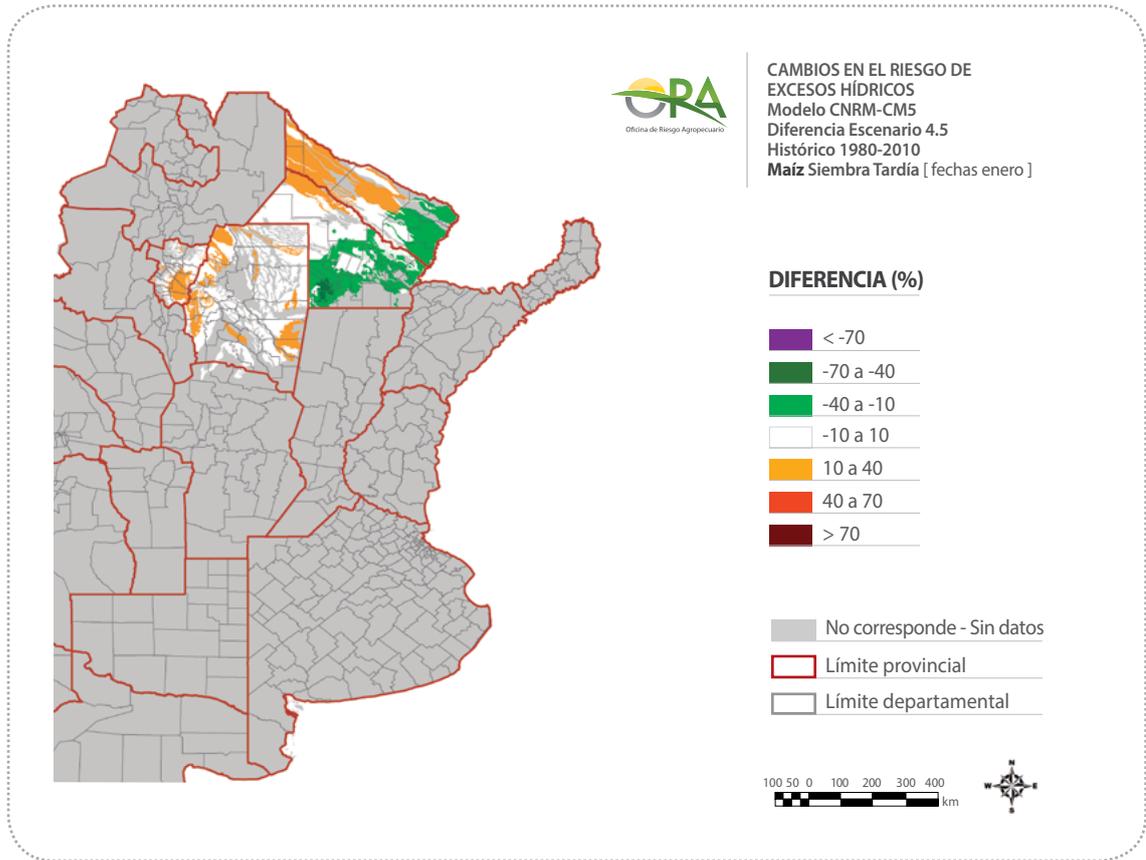
**Figuras 41 y 42:** Cambios en el Riesgo de Excesos Hídricos para maíz de siembra temprana segunda fecha, considerando escenario moderado (arriba) o extremo (abajo) respecto del análisis histórico



**Figuras 43 y 44:** Cambios en el Riesgo de Excesos Hídricos para maíz de siembra tardía primera fecha, considerando escenario moderado (arriba) o extremo (abajo) respecto del análisis histórico



**Figuras 45 y 46:** Cambios en el Riesgo de Excesos Hídricos para maíz de siembra tardía segunda fecha, considerando escenario moderado (arriba) o extremo (abajo) respecto del análisis histórico

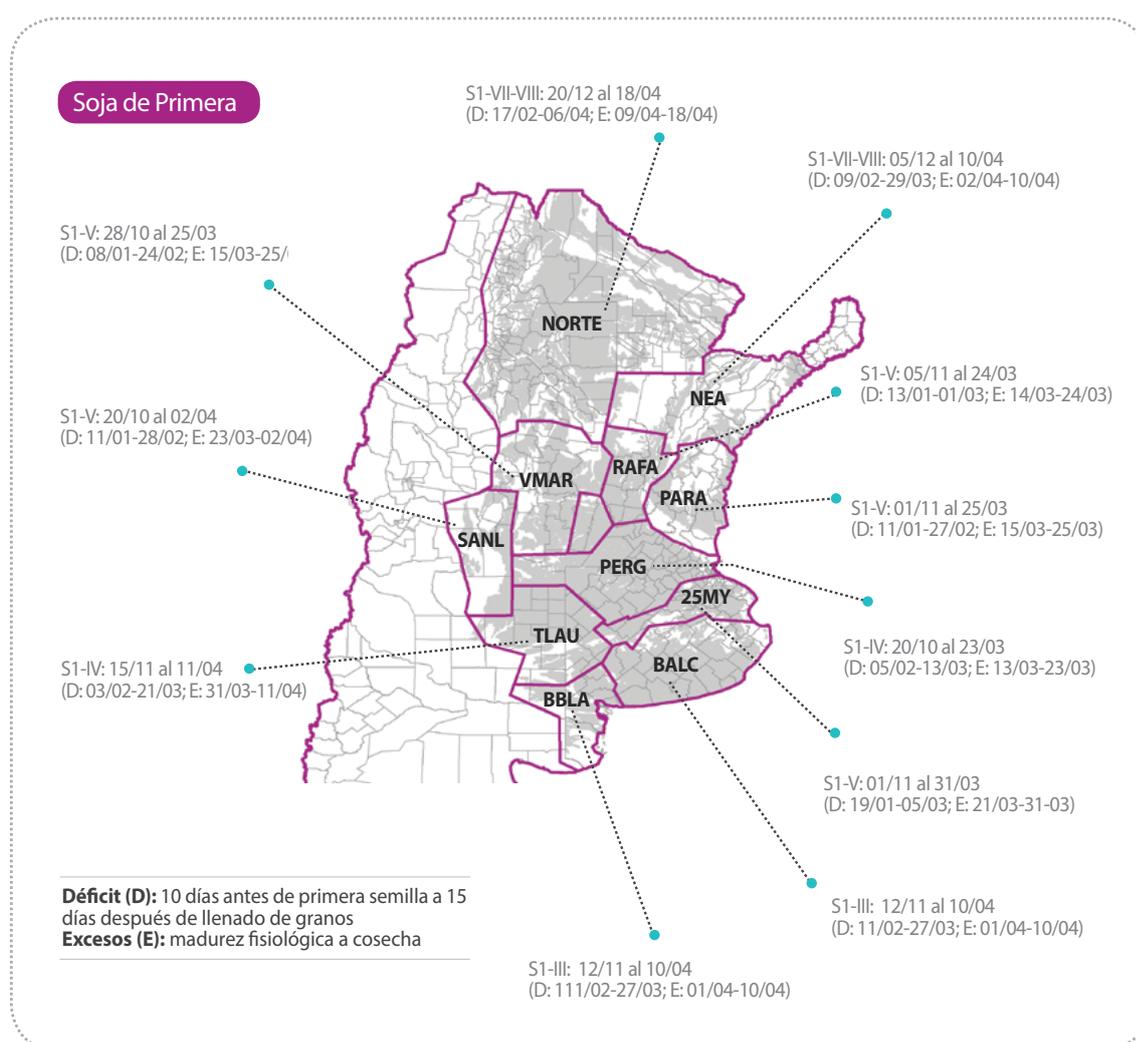


## Soja

El área considerada para la evaluación del cultivo de soja es toda la región pampeana y el NEA, además de parte del NOA. El área de estudio de este trabajo se halla totalmente dentro de la zona

fenológica NORTE (S1), donde se simulan los grupos VII y VIII con fecha de siembra a principios de diciembre. Para esta zona no se considera la opción de doble ocupación trigo - soja de segunda.

**Figura 47:** zonas de fenología homogénea para soja, inicio y fin del ciclo, periodos críticos para déficit (D) y excesos hídricos (E)



El crecimiento vegetativo (hoja y tallo) es muy sensible a los déficits hídricos. El estrés hídrico que ocurre al inicio de la formación de las vainas hasta el llenado completo de las semillas tiene un mayor impacto negativo sobre el rendimiento que en otras etapas. El período de llenado de las semillas es crucial para el rendimiento.

• **Periodo crítico para déficit hídrico (D):** 10

días antes de primera semilla hasta 15 días después de inicio de llenado de granos.

• **Periodo crítico para excesos hídricos (E):** Madurez fisiológica a cosecha.

Así, el periodo crítico a déficit va de mediados de febrero a principios de marzo, mientras que el de excesos abarca desde mediados hasta fines de abril. El rendimiento se puede reducir si una inun-

dación prolongada ocurre al iniciar la floración o al comienzo de la etapa de llenado de las semillas.

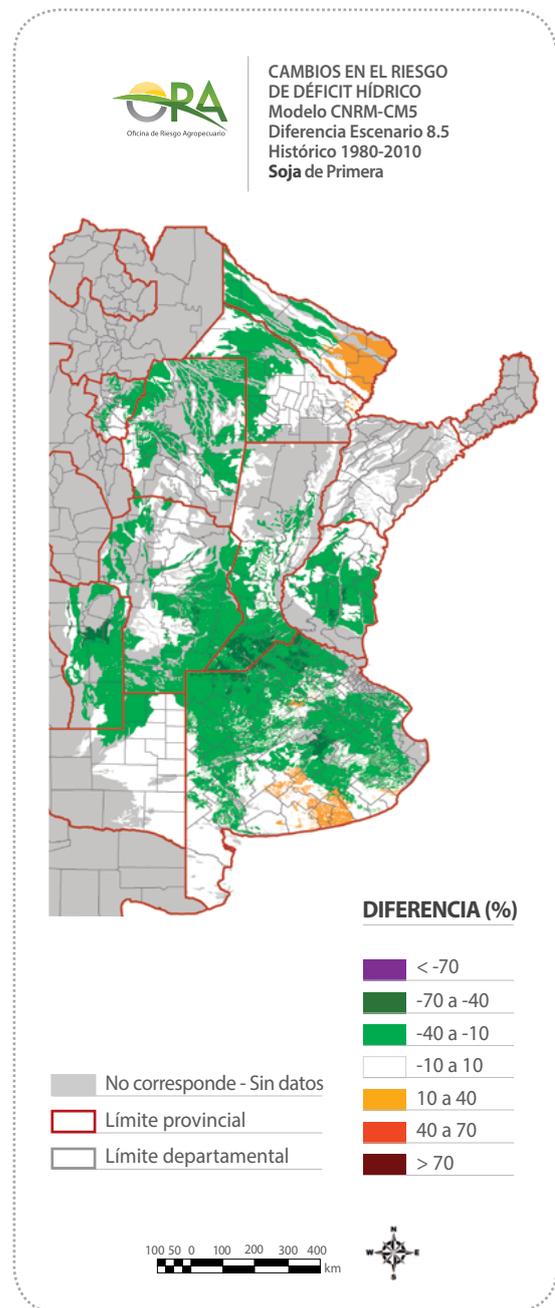
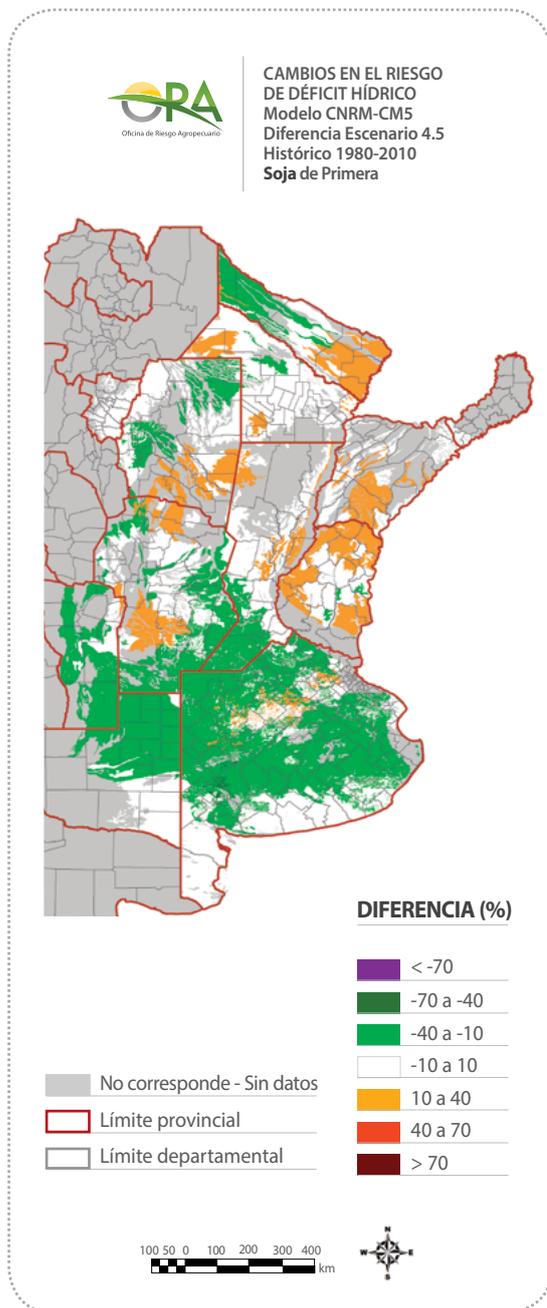
Además, los excesos hídricos afectan rendimientos y calidad si ocurren cerca de la fecha de cosecha.

► **Riesgo de déficit hídrico**

Con el escenario moderado (**Figura 48**) se esperaría un aumento en el riesgo de déficit hídrico en el este de Formosa, sur de Corrientes y sudeste de Santiago del Estero. Para el caso

de estas dos últimas zonas se prevé una disminución leve en la precipitación de febrero (-10mm a -30mm) y mayor en el este de Formosa (-50mm a -100mm).

**Figuras 48 y 49:** Cambios en el Riesgo de Déficit Hídrico para soja de primera considerando escenario moderado (izquierda) o extremo (derecha) respecto del análisis histórico

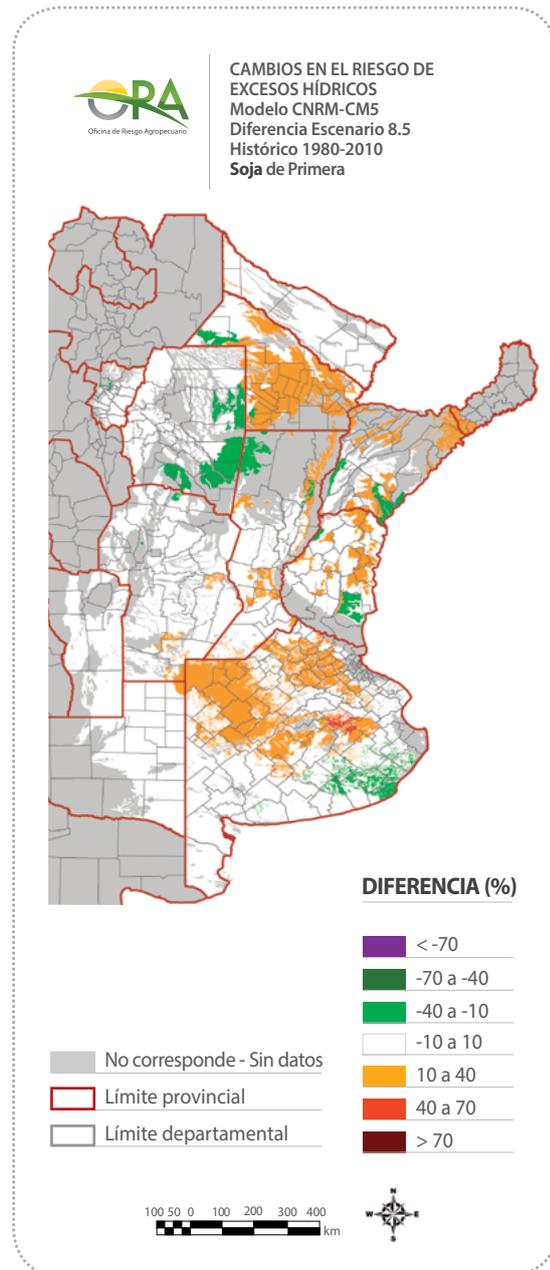
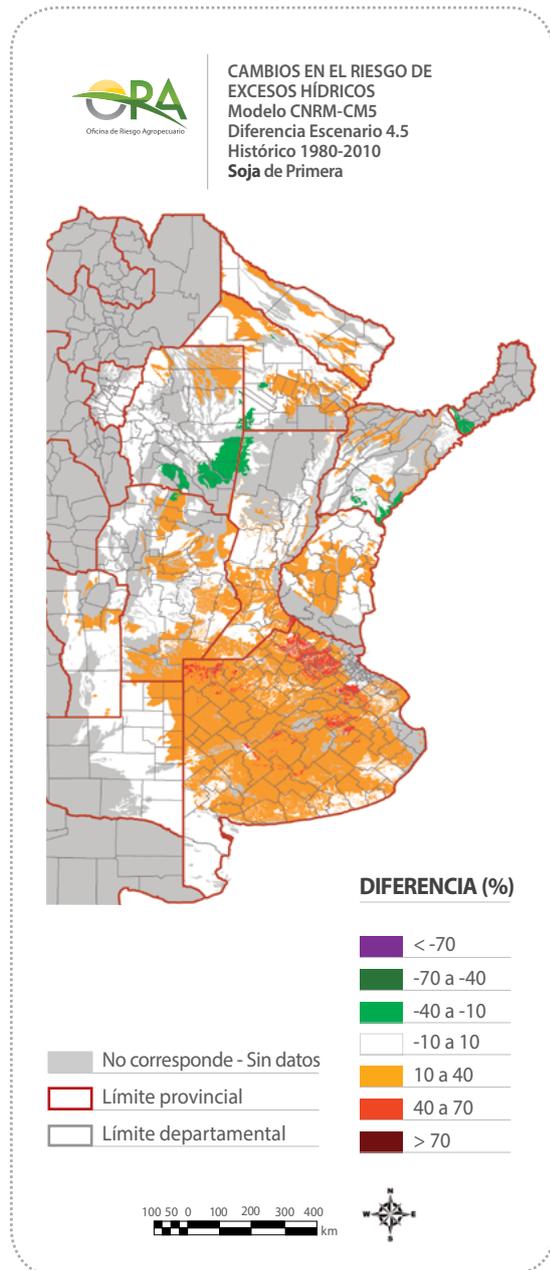


► Riesgo de excesos hídricos

Para el escenario extremo (**Figura 51**) se obtuvo un aumento generalizado del riesgo en la provincia de Chaco. El mismo se debe a que el

modelo prevé un aumento de las precipitaciones en esa provincia para los meses de febrero, marzo y abril.

**Figuras 50 y 51:** Cambios en el Riesgo de Excesos Hídricos para soja de primera considerando escenario moderado (izquierda) o extremo (derecha) respecto del análisis histórico



# Conclusiones

La metodología aplicada permitió calcular probabilidades de déficit y de excesos hídricos para los periodos más vulnerables de cinco diferentes cultivos y para cada mes del año considerando una cobertura de pasto natural, para el periodo 1980-2010 y para el periodo futuro 2015-2039, en este último caso para escenarios moderado (RCP 4.5) y extremo (RCP 8.5) de cambio climático.

La demanda de variables meteorológicas del modelo de balance hídrico aplicado disminuyó a cinco los modelos de cambio climático de posible utilización. Dentro de este grupo, sólo dos modelos mostraban un ajuste razonable a las condiciones climáticas determinadas según datos medidos en el pasado. Uno de estos dos modelos (MRI-CGM3) presentó resultados dudosos en los cambios en la evapotranspiración de los meses de verano, derivado del aumento del orden del 100% en la velocidad del viento previsto para el futuro cercano para algunas zonas dentro del área de estudio, por lo cual se decidió descartarlo hasta poder realizar mayores análisis. Por lo tanto, la evaluación realizada pudo llevarse a cabo sólo con el modelo CNRM-CM5.

Del análisis de variación de riesgo hídrico para algodón se concluye que, para ambas fechas de siembra (temprana y tardía), la probabilidad de déficit aumenta en el este de Formosa considerando el escenario moderado, mientras que con el escenario extremo se extiende el área de aumentos previstos en la probabilidad de déficit a la provincia de Chaco y se agrava en el este de Formosa. La probabilidad de aumento del riesgo de excesos hídricos se concentra en la provincia de Chaco y es mayor con el escenario moderado, para ambas fechas de siembra consideradas. Con la fecha más tardía, el área con aumento previsto en el riesgo de excesos es menor, con ambos escenarios.

Considerando el cultivo maíz, para la fecha de siembra de diciembre y escenario moderado, se prevé un aumento del riesgo de déficit hídrico en el este de Formosa, oeste de Chaco, centro de Santiago del Estero y sur de Corrientes. Con el escenario extremo el aumento se limita al este de Formosa. Para la fecha de siembra de enero el riesgo de déficit sólo aumenta en el este de Formosa. Para ambas fechas de siembra (diciembre y enero) y ambos escenarios, el riesgo de excesos hídricos aumenta al oeste del área de estudio, predominando las áreas con disminución del riesgo al este.

Se prevé un aumento en el riesgo de déficit hídrico para soja concentrado en el este de Formosa para ambos escenarios. Con el escenario extremo predominan las disminuciones del riesgo en el oeste del área de estudio. Para el riesgo de excesos hídricos el escenario extremo prevé un aumento que abarca la mayor parte de la provincia de Chaco.

De los mapas obtenidos de cambios esperados en los niveles de riesgo de déficit y de excesos hídricos es posible evaluar áreas prioritarias

para la adaptación, ya sea por aumento del riesgo de déficit como del de excesos que podrían afectar a los cultivos en sus periodos más vulnerables y a las pasturas en épocas específicas del año. También permiten evaluar políticas de expansión del área sembrada de cada cultivo hacia zonas en las que se prevé una disminución en los niveles de riesgo.

El análisis de riesgo de déficits y excesos hídricos según distintos escenarios de cambio climático proporciona valiosa información para el diseño de medidas de adaptación a la variabilidad y el cambio climático, tanto a nivel intra finca como a nivel de planificación y diseño de políticas públicas.

A nivel local, analizando los resultados de este trabajo, se puede concluir que mediante prácticas de manejo de cultivos tales como variación en la fecha de siembra o la utilización de cultivares adecuados se puede reducir el riesgo de déficits o excesos hídricos en los períodos críticos de los cultivos de secano. Asimismo, permite identificar regiones donde el incremento de los riesgos es más generalizado, en las cuales será necesario evaluar y priorizar otro tipo de medidas, tales como diseño de obras de infraestructura, utilización de riego complementario o bien medidas de transferencia de riesgos como seguros agrícolas o fondos de catástrofes.



# referencias

Acosta F., M. Calvi, E. Lysiak, M. Rodríguez, P.Sarco (2012). Análisis de resultados de sustentabilidad económica de sistemas ganaderos representativos del noroeste argentino. PE AEES 302442 Competitividad y Sustentabilidad de los Sistemas de Producción. PPR Proyecto Propio de la Red AEES-302001. Competitividad Sustentable y Dinámica Territorial de los Sistemas Agroalimentarios y Agroindustriales. Área Estratégica de Economía y Sociología.

Allen, Richard G., L. S. Pereira, D. RAES, M. Smith (1990). FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56: Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). Rome.

Cardona, O. D. (1993). Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo. Elementos para el ordenamiento y la planeación del desarrollo. En: Maskrey, A.: Los desastres no son aturales. LA RED de estudios sociales, Bogotá, pp. 45-65.

Edwards, J. Gustaffson, M. and Naslund-Landenmark, B. (2007). Handbook for vulnerability mapping. Disaster reduction through awareness, preparedness and prevention mechanisms in coastal settlements in Asia. Demonstration in tourism destinations. EU Asia Pro Eco Project. Swedish Rescue Services Agency.

Gerald C. Nelson, Mark W. Rosegrant, Jawoo Koo, Richard Robertson, Timothy Sulser, Tingju Zhu, Claudia Ringler, Siwa Msangi, Amanda Palazzo, Miroslav Batka, Marilia Magalhaes, Rowena Valmonte-Santos, Mandy Ewing, y David Le (2009). El impacto en la agricultura y los costos de adaptación. FAO.

IPCC (2013) Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Cambio climático 2013: Bases físicas.

Meehl, G., C. Covey, K. E. Taylor, T. Delworth, R. J. Stouffer, M. Latif, B. McAvaney y J. F. Mitchell (2007). The WCRP CMIP3 multimodel dataset: a new era in climate change research. Bull. Am. Meteorol. Soc., 88, 1383–1394.

Rashed T. and Weeks, J. (2003). Assessing vulnerability to earthquake hazards through spatial multicriteria analysis of urban areas. INT. J. Geographical Information Science, 2003. Vol. 00, No. 0, 1-30.

SAYDS - Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (2014). Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático. "Cambio Climático en Argentina; Tendencias y Proyecciones" (Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera). Buenos Aires, Argentina.

Stouffer, R. J., K. E. Taylor y G. A. Meeh (2011). CMIP5 Long-term experimental Design. CLIVAR Exchanges, 56, 5–7.

Steduto P., T. Hsiao, E. Fereres, D. Raes (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Estudio FAO 66: Riego y drenaje.

Taylor, K. E., R. J. Stouffer y G. A. Meehl (2012). An Overview of CMIP5 and the experiment design. Bulletin of the American Meteorological Society 93, 485–498.

Vera, C., G. Silvestri, B. Liebmann, y P. Gonzalez (2006). Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models. Geophys. Res. Lett., 33, L13707.





Secretaría  
de Agroindustria



Ministerio de Producción y Trabajo  
Presidencia de la Nación