

Paraguay

Paraguay Crop Risks Preparedness

Informe

Final

Implementación de un Sistema de Información Agroclimática en Paraguay

Junio, 2018

AGR



© 2017 The World Bank
1818 H Street NW, Washington DC 20433
Telephone: 202-473-1000; Internet: www.worldbank.org

Some rights reserved

This work is a product of the staff of The World Bank. The findings, interpretations, and conclusions expressed in this work do not necessarily reflect the views of the Executive Directors of The World Bank or the governments they represent. The World Bank does not guarantee the accuracy of the data included in this work. The boundaries, colors, denominations, and other information shown on any map in this work do not imply any judgment on the part of The World Bank concerning the legal status of any territory or the endorsement or acceptance of such boundaries.

Rights and Permissions

The material in this work is subject to copyright. Because The World Bank encourages dissemination of its knowledge, this work may be reproduced, in whole or in part, for noncommercial purposes as long as full attribution to this work is given.

Attribution—Please cite the work as follows: “World Bank. {YEAR OF PUBLICATION}. {TITLE}. © World Bank.”

All queries on rights and licenses, including subsidiary rights, should be addressed to World Bank Publications, The World Bank Group, 1818 H Street NW, Washington, DC 20433, USA; fax: 202-522-2625; e-mail: pubrights@worldbank.org.

INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACIÓN PARA LA AGRICULTURA



Informe Final

Contrato IICA – Banco Mundial

Implementación de un Sistema de Información Agroclimática en Paraguay

Junio, 2018
Paraguay

PRESENTACIÓN

El sector agrícola representa el principal componente de la dinámica económica del Paraguay. Entendido como una agregación de las cadenas: agrícola, pecuaria, forestal y de transformación primaria, representa el conjunto de bienes y servicios de intercambio comercial del país con el mundo.

Según el [MAG \(2013\)](#), Paraguay es un país que cuenta con una base económica donde predomina el sector agrario, de raíces sociales y culturales fuertemente vinculadas a la vida rural. La agricultura, más que motor del crecimiento económico, es también una fuente para el abastecimiento del consumo interno, con exitosas experiencias en exportación de productos agropecuarios.

BM (2017) encontró que además de contribuir con el 20 por ciento al PIB en 2016, el sector agrario ha generado más de dos tercios de las exportaciones nacionales y ha empleado alrededor del 40 por ciento de la población trabajadora. Así también, según el [BM \(2014\)](#) la actividad en el sector de la construcción, y en particular la construcción de viviendas, varía con el poder adquisitivo derivado del PIB agrícola. Y que este movimiento conjunto también se puede observar en otros sectores, como de hoteles y restaurantes o el comercio mayorista y minorista. En lo que refiere a la base industrial del país, se encuentra en discreto crecimiento y está conformada en su mayoría por procesadoras de materias primas de origen agropecuario.

Correlacionando el desempeño sectorial agrícola con la dinámica económica general, se confirma la importancia estratégica del complejo productivo agrario. Ya que, considerando los últimos 10 años, el sector agrícola sigue siendo el principal influyente en la tasa de crecimiento del PIB nacional. De hecho, las variaciones negativas del PIB a lo largo de los últimos 10 años coinciden con escenarios relacionados a la variación de precios internacionales de los commodities, brotes de enfermedades (como la fiebre aftosa en 2011) y la variabilidad climática cada vez más atenuante y que afecta directamente el rendimiento de la producción agropecuaria; por ejemplo, la sequía del 2009.

El sector agrario está principalmente dissociado en diferentes grupos o subsectores que se mueven y se desenvuelven en diferentes escenarios económicos, sociales y políticos (unos más competitivos que otros); pero tienen en común al escenario ambiental y las variabilidades climáticas, que influyen de manera transversal sobre todos los grupos, economías, sistemas tipos de producción.

La agricultura familiar (AF), la agricultura tecnificada (generalmente agroexportadora) y los sistemas de las comunidades indígenas (2% de la población del país); son considerados los tres principales grupos sociales que conforman el sector. Cada uno de ellos se encuentra igualmente expuesto a las amenazas climáticas (como sequías, heladas, excesos hídricos y otros) que pueden afectar en mayor o menor medida de acuerdo a la vulnerabilidad que presente el sujeto estudiado (cultivos, personas, animales, ecosistemas).

Según Basualdo (2017), Paraguay se identificó como el país con menor desarrollo de la región, en lo que respecta a capacidad de análisis de información satelital y sistemas de información geográfica y mapas de amenazas agroclimáticas.

Este sector tan importante para el desarrollo del Paraguay, se encuentra totalmente expuesto a las amenazas climáticas que de la noche a la mañana pueden comprometer seriamente la estabilidad del país.

Un informe de evaluación de riesgos agrícolas del BM (2015), menciona que las pérdidas por variabilidad climática han significado en promedio una pérdida de US\$230 millones al año (1995-2015). La sequía, las heladas y las inundaciones fueron consideradas como los eventos más notables en causar la inestabilidad económica general del Paraguay, además de afectar los cultivos, la seguridad alimentaria y en consecuencia a los medios de subsistencia.

Si bien, desde la agricultura tecnificada se están generando algunos avances de mitigación¹ y respuesta² a los riesgos agroclimáticos; para la agricultura familiar todavía está siendo limitada la capacidad limitada de gestionar dichos riesgos; y por lo tanto, permanecen preferentemente vulnerables a cualquier evento climático extremo.

A pesar del hecho que las predicciones de cambio climático muestran un aumento apreciable en la intensidad y frecuencia de los fenómenos meteorológicos, el país³ no tiene un sistema de información integrado fiable para supervisar condiciones de crecimiento de las cosechas y estimar el impacto de los fenómenos meteorológicos por cultivo y por región. Para afrontar este desafío nacional, el MAG y la DINAC han fusionado esfuerzos y con el apoyo técnico y financiero del BM y el IICA, para poder implementar un sistema de monitoreo, capaz de estimar la frecuencia y probabilidad de ocurrencia de amenazas climáticas, pudiendo posteriormente evaluar los impactos.

Entre los principales resultados obtenidos con la sinergia interinstitucional se encuentran:

- a) Una plataforma web que provee información (desde 1987 en adelante) con actualización automática diaria de: (i) Cantidad de agua en el suelo y (ii) Ocurrencia de heladas, sequías, excesos hídricos o déficits hídricos. Ambos ubicados por unidad de suelo de la Región Oriental, por cultivo dentro de sus calendarios de siembra más comunes; mediante un Balance Hídrico Operativo.
- b) Un sistema que estima el impacto de las amenazas sobre la productividad de los cultivos.
- c) Una serie de mapas (i) de probabilidad de amenazas y (ii) de riesgos agroclimáticos.

Se espera que, con estos nuevos insumos y resultados de trabajo, el sector agrícola pueda fortalecer su sistema de información agroclimática y dar paso a nuevas iniciativas públicas, privadas y de la cooperación internacional para continuar con su tarea de optimizar su gestión integral de riesgos en la agricultura.

Ing. Agr. Mario León Frutos
Vice Ministro de Agricultura
Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG)
República del Paraguay

¹ Mediante la adopción de prácticas y tecnologías agrícolas resilientes a las variaciones climáticas.

² A través de seguros y otros mecanismos de transferencia de riesgos financieros.

³ A nivel mundial, Paraguay se encuentra entre los diez países más expuestos a "Riesgos de pérdida de productividad agrícola" y en primer lugar (junto con Bolivia) a nivel América del Sur, según el ranking del Centro de Desarrollo Global. Más info: <https://www.cgdev.org/page/mapping-impacts-climate-change>

LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

AD	Agua disponible
AF	Agricultura Familiar
ARP	Asociación Rural del Paraguay
AT	Agricultura Tecnificada
AW	Agua disponible
BDD	Base de Datos
BHAg	Balance Hídrico Agrícola
BM	Banco Mundial
CAH	Crédito Agrícola de Habilitación
CAN	Censo Agropecuario Nacional
CC	Capacidad de Campo
CIHB	Centro de Investigación Hernando Bertoni
DCEA	Dirección de Censos y Estadísticas Agropecuarias
DEA	Dirección de Educación Agraria
DEAg	Dirección de Extensión Agrarias
DGP	Dirección General de Planificación
DINAC	Dirección Nacional de Aeronáutica Civil
DMH	Dirección de Meteorología e Hidrología
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
FCA	Facultad de Ciencias Agrarias
FECOPROD	Federación de Cooperativas de Producción
FP	Facultad Politécnica
ha	hectárea
Helio	Heliofanía
HR	Humedad relativa
IICA	Instituto interamericano de cooperación para la agricultura
IPTA	Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria
K	Conductividad hidráulica
LST	Land surface temperature
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería
MEA	Marco estratégico agrario
MH	Ministerio de Hacienda
MODIS	Espectro radiómetro de resolución moderada de imágenes
Nub	Nubosidad
OFDA	Oficina de los Estados Unidos para asistencia de desastres en el extranjero
OGM	Organismo Genéticamente Modificado
OMM	Organización Meteorológica Mundial
PI	Proyectos insignia
PIB	Producto Interno Bruto
PMP	Punto de marchitez permanente
RO	Región Oriental
SAS	Secretaría de Acción Social

SEAM	Secretaría del Ambiente
SEN	Secretaría de Emergencia Nacional
SENACSA	Servicio Nacional de Calidad y Salud Animal
SENAVE	Servicio Nacional de Calidad y Sanidad Vegetal y de Semillas
SIGEST	Sistema Integrado de Gestión Territorial para el Desarrollo Rural
UGR	Unidad de Gestión de Riesgos
UNA	Universidad Nacional de Asunción
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos
VMA	Viceministerio de Agricultura
VMG	Viceministerio de Ganadería

CONTENIDO

Resumen ejecutivo	1
1. Desarrollo de una base de datos sobre cultivos, suelos y clima	3
1.1 Base de datos de los cultivos mandioca, maíz, algodón, sésamo, poroto y soja	3
1.2 Base de datos de suelos.....	8
1.3 Base de datos climática: de estaciones convencionales y de satélites.....	11
1.3.1 Información proveniente de estaciones meteorológicas convencionales.....	12
1.3.2 Información proveniente de imágenes satelitales	15
2. Balance Hídrico Agrícola e Interfaz Gráfica de Usuario	19
2.1 Balance hídrico Agrícola.....	19
2.2 Interfaz gráfica de usuario.....	26
3. Mapas de Riesgo basados en índices.....	33
3.1 Extremos hídricos	33
3.2 Extremos térmicos	37
4. Capacitación	42
Conclusiones Generales.....	45
Referencias Bibliográficas.....	47
ANEXO 1: Conceptos básicos.....	48
ANEXO 2: Uso de datos de estaciones meteorológicas en el algoritmo de balance hídrico por unidad de suelo	49
ANEXO 3: Evaluación del índice YR como estimador de caídas de rendimientos	51
ANEXO 4: Determinación de índices de déficit hídrico y sequía	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ficha agronómica de la Soja.....	6
Figura 2. Ficha agronómica de la Mandioca.....	6
Figura 3. Ficha agronómica del Sésamo	6
Figura 4. Ficha agronómica del Poroto.....	7
Figura 5. Ficha agronómica del Maíz	7
Figura 6. Ficha agronómica del Algodón.....	7
Figura 7. Temperatura promedio de estaciones (DMH) en relación con temperaturas promedio del producto AQUA-NIGHT ($r = 0.982$).....	17
Figura 8. Temperatura promedio de estaciones (DMH) en relación con temperaturas promedio del producto TERRA-NIGHT ($r = 0.970$).....	17
Figura 9. Componentes del Balance Hídrico Agrícola.....	19
Figura 10. Esquema de datos de entrada, cálculos y salidas del BHAg.	21
Figura 11. Comparación de resultados hallados para Itapúa (izquierda) y Misiones (derecha) al comparar valores de YR y apartamientos de los rendimientos según serie histórica del MAG.....	25
Figura 12. Esquema Conceptual del Sistema de Balance Hídrico.	28
Figura 13. Esquema conceptual del componente interfaz web de acceso público.	28
Figura 14. Interfaz web del BHAg, ejemplo para maíz en Canindeyú el 05/09/2011 (campana 2011/2012).....	29
Figura 15. Ejemplo de gráfico local de seguimiento del contenido de agua útil.....	30
Figura 16. Ejemplo de evolución de la satisfacción hídrica (WRSI) y porcentaje de rendimiento potencial asociado (calculado en función de YR).	31
Figura 17. Mapa de estado de las reservas de agua útil en el suelo para toda la Región Oriental, considerando el cultivo maíz, para el día 1/10/2008. Mapa realizado por unidad de suelo (izquierda) y por nodo de la malla regular de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (derecha).....	32
Figura 18. Ejemplo parcial de salida numérica por nodos de retícula de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ que cubre toda la Región Oriental, descargable desde la interfaz para usuarios especiales.	32
Figura 19. Mapa de probabilidad de déficit hídrico del maíz (agricultura familiar).	34
Figura 20. Mapa de probabilidad de excesos hídricos del maíz (agricultura familiar).	35
Figura 21. Combinaciones de probabilidad o frecuencia de ocurrencia (eje vertical) y vulnerabilidad (eje horizontal) que determinan las categorías de riesgo.	36
Figura 22. Mapa de riesgo de déficit hídrico para el maíz (agricultura familiar).	36
Figura 23. Mapa de riesgo de excesos hídricos para el maíz (agricultura familiar).	37
Figura 24. Resumen de heladas Región Oriental.....	38
Figura 25. Mapa de riesgo de helada agronómica en el periodo crítico de la mandioca (15-JUN al 27-SET) en la zona norte. Vulnerabilidad: leve.	40
Figura 26. Mapa de riesgo de helada agronómica en el periodo crítico del trigo (25-JUL al 4-SET) en la zona norte. Vulnerabilidad: muy alta.	41

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Organización de la base de datos de suelos (primera parte).....	10
Cuadro 2. Organización de la base de datos de suelos (segunda parte)	10
Cuadro 3. Organización de la base de datos de suelos (tercera parte).....	10
Cuadro 4. Organización de la base de datos de suelos (cuarta parte)	11
Cuadro 5. Estaciones meteorológicas DMH-DINAC seleccionadas y descartadas por análisis estadísticos.....	12
Cuadro 6. Medias normales mensuales de variables meteorológicas para el periodo 1986-2016 correspondientes a la estación Caazapá (DMH-DINAC)	14
Cuadro 7. Temperaturas (°C) y precipitaciones (mm) extremas mensuales y sus respectivos periodos de retorno (Tr) correspondientes a la estación Caazapá (DMH-DINAC).....	15
Cuadro 8. Ejemplo parcial de salida numérica (.csv) del BHAg.....	22
Cuadro 9. Ejemplo parcial de salida numérica (.csv) de la estimación de pérdida de rendimiento en cada campaña.	23
Cuadro 10. Grupos de departamentos con diferente grado de correlación entre pérdidas estimadas de rendimiento debido a déficit hídrico (YR) y rendimientos departamentales del MAG. Abajo, porcentaje de casos con $ R >0,5$ por cultivo.....	24
Cuadro 11. Umbrales determinados como límite para la estimación de caídas de rendimiento que sólo se han observado en 2 de los últimos 10 años de la serie MAG (2007-2016).....	26
Cuadro 12. Periodos críticos definidos para déficit hídrico por cultivo.	33
Cuadro 13. Periodos críticos definidos para excesos hídricos por cultivo.	33
Cuadro 14. Valoración numérica en base al nivel de vulnerabilidad.	35
Cuadro 15. Periodos críticos definidos para helada por cultivo.	38
Cuadro 16. Porcentaje de meses con afectación por heladas mayor al 50%.	39

Resumen ejecutivo

Con el objetivo de dotar al Paraguay de fuentes fiables de información sobre el monitoreo de las condiciones agroclimáticas que impactan de manera directa al rendimiento de los cultivos y a la economía del país; la alianza interinstitucional entre el MAG y la DINAC con el apoyo técnico y financiero del BM e IICA han desarrollado para la Región Oriental, tres principales herramientas de cruzamiento de información para la obtención de:

- a) Balance Hídrico Agrario funcional, operativo y diario para la detección de ocurrencia de sequías, heladas, excesos hídricos y déficits hídricos en seis cultivos: soja, maíz, mandioca, algodón, poroto y sésamo.
- b) Estimación del impacto de las amenazas climáticas sobre el rendimiento de los seis rubros seleccionados.
- c) Mapas de probabilidad de amenazas y riesgos agroclimáticos para los cultivos en cuestión.

Entre los principales resultados que se han generado y se seguirán generando, se destacan:

- Informaciones certeras sobre la ocurrencia o no ocurrencia de eventos extremos desde 1987, como la sequía del año 2011 que disminuyó notoriamente las exportaciones de soja y la contracción del PIB nacional.
- Análisis de las correlaciones entre los eventos extremos ocurridos en los últimos 10 años y los rendimientos de cultivos.
- Identificación de zonas con mayor y menor probabilidad de eventos extremos, asociados a los cultivos en sus periodos críticos.⁴
- Identificación de zonas de riesgo agroclimático ante eventos extremos de los cultivos seleccionados en sus periodos críticos.
- Equipo técnico del MAG y la DINAC especialmente fortalecido y capacitado para administrar y proponer mejoras en todo lo referido a los productos desarrollados.
- Un sector agrario fortalecido, en conocimiento y en proceso de socialización de las bondades que presentan los productos.

El presente informe se estructura en tres capítulos, los cuales abordan el paso a paso desarrollado para la obtención de los productos.

Se destaca que la construcción y el desarrollo de las herramientas y productos de la asistencia técnica y financiera del BM y del IICA, fue posible gracias al liderazgo de la UGR por parte del MAG y de la DMH por lado de la DINAC.

Con esta asistencia se espera que el país pueda reducir la vulnerabilidad del sector en el marco de una estrategia integrada de gestión del riesgo agrícola con un enfoque particular en los agricultores más vulnerables; mitigando el riesgo de los eventos que afectan negativamente y aumentando la resiliencia del país a través de mecanismos mejorados de respuesta a los riesgos. Se enfatizan seis cultivos, debido a su importancia en el desarrollo socioeconómico y ambiental del país, siendo estos: Soja (*Glycine max*), Mandioca (*Manihot*

⁴ Entiéndase por “periodo crítico”, la etapa vegetal en que la planta es mayormente vulnerable a padecer un estrés, perturbación o muerte a causa de un evento extremo (que puede ser una sequía o una helada, exceso hídrico, etc.).

esculenta), Sésamo (*Sesamun indicum*), Poroto (*Phaseolus vulgaris*), Maiz (*Zea mays*) y Algodón (*Ghossypium spp*)

1. Desarrollo de una base de datos sobre cultivos, suelos y clima

Para el desarrollo de los productos como Balance Hídrico Agrícola, análisis de rendimiento y mapas de riesgos agroclimáticos, el punto de partida siempre será una base de datos meteorológicos, edáficos y agrícolas.

El IICA mediante el Proyecto Insignia “Resiliencia y gestión integral de riesgos ambientales para la producción agropecuaria” del 2016, ha detectado que la información básica disponible en relación a clima, suelos y cultivos; sólo en algunos casos se encuentra disponible, generalmente restringida, otras veces dispersa (no integrada) y en última instancia: ausente. En consecuencia, el primer paso consistió en consolidar, reunir, unificar y en algunos casos, generar; los diferentes componentes de la base de datos necesaria para la elaboración de los productos.

La base de datos consolidada y que contempla la posibilidad de ser actualizada periódicamente, se compone de datos de suelos, del clima y de los rubros a ser considerados: soja, maíz, mandioca, algodón, sésamo y poroto. La misma reúne toda la información necesaria para alimentar el BHAg generado y la realización de los mapas de riesgo agroclimáticos.

En lo que respecta a la información sobre cultivos, fue desarrollada una caracterización fenológica de los mismos, con la identificación de sus periodos críticos o momentos de mayor vulnerabilidad durante su ciclo de vida.

La información edáfica contempla todo lo referido a estructura, características físicas y parámetros hidráulicas de todas las unidades de suelo de la Región Oriental.

Y por último la información climática, obtenida desde dos fuentes analizadas: datos de estaciones meteorológicas y datos de imágenes satelitales.

A continuación, el lector podrá apreciar la metodología de obtención de datos con ejemplos obtenidos por cada uno de los tres componentes: cultivos, suelos y clima.

1.1 Base de datos de los cultivos mandioca, maíz, algodón, sésamo, poroto y soja

Dado que cada uno de los seis cultivos considerados posee una distribución diferente de consumo hídrico a lo largo del año —lo cual debe determinarse para poder simular la evapotranspiración de cultivo (ETc) de cada uno, teniendo en cuenta su cultivo antecesor— deben completarse calendarios habituales por zonas, donde consten las fechas normales de siembra, cosecha, profundidad de raíces y etapas fenológicas a lo largo del ciclo del cultivo y periodos críticos. La información agronómica necesaria para esta evaluación no se ha encontrado sistematizada en trabajos previos y, por lo tanto, debió ser compilada y generada por medio del presente trabajo.

En los próximos párrafos se detallan las principales actividades llevadas a cabo para el relevamiento de la base de datos de cultivos.

Información primaria. Se realizó una búsqueda de información sobre profundidad de enraizamiento de los principales cultivos en base a investigaciones realizadas en el país. Las informaciones recogidas fueron incorporadas en una BDD Agronómica (Anexo digital 1), con estructura y formato adecuado para su uso posterior en SIG. Ante la escasez de información sobre la profundidad de raíces, tanto a nivel nacional como internacional, se pudo acceder a datos de observaciones y mediciones realizadas en la década del 80 por especialistas de la misión técnica del Japón en el CRIA Cap. Miranda del MAG (actualmente IPTA). En parcelas del CIHB (Caacupé) se realizaron calicatas en las condiciones: con y sin subsolado, a fin de medir la profundidad de raíces.

Información secundaria. Por medio de una consulta de la literatura actualizada: se dispuso de estudios, manuales e informes especializados publicados en Internet por el IICA, FAO, OMM, Banco Mundial, e informes o publicaciones de EE.UU., Brasil, Argentina, México y Uruguay, en particular. Además, fueron revisados materiales provistos por especialistas del IICA, ORA-Argentina y documentos científicos y divulgativos de: CIMMYT (Maíz); CIAT (Mandioca); IITA (Poroto); EMBRAPA (Soja, Mandioca y Poroto); además de otras fuentes internacionales (Anexo digital 2).

Seguidamente, para la mejor organización de la base de datos agrícola o de cultivos, se determinaron zonas homogéneas definidas como conjuntos de departamentos que presentaban calendarios habituales de siembra similares; que fueron validados (los calendarios de siembra) mediante un taller con técnicos extensionistas de todos los departamentos que conforman la Región Oriental.

Una vez identificadas las fechas de siembra estándar, se determinaron las etapas fenológicas mediante información secundaria y experiencias de campo. A cada una de estas etapas se le asignó un coeficiente de cultivo (Kc) y un factor de reducción de rendimiento (Ky) basándose en valores propuestos por la FAO. Además, se relacionaron los fenómenos climáticos adversos con niveles de vulnerabilidad por etapas fenológicas, definiendo finalmente los periodos más críticos y umbrales de estrés hídrico y temperaturas extremos para cada cultivo. La definición de periodos críticos se obtuvo mediante revisión bibliográfica y consultas a expertos.

Entre las principales actividades llevadas a cabo para la caracterización de cultivos, se destacan:

- Identificación de las zonas homogéneas para las etapas fenológicas de cada cultivo;
- Identificación de tipos de producción, agricultura familiar (AF) y agricultura tecnificada (AT) y los diferentes grupos de variedades para cada cultivo;
- Elaboración de calendarios habituales y profundidad de enraizamiento de cultivo por tipo de producción (AF y AT) a partir de información primaria y secundaria;
- Determinación de la duración de las principales etapas fenológicas y los fenómenos meteorológicos adversos y nivel de vulnerabilidad de los mismos en cada etapa fenológica (alta, moderada, baja, nula), con énfasis en sequía, excesos hídricos y heladas;
- Estimación de coeficientes de cultivos (Kc) y factores de pérdida de rendimiento (Ky) basados en valores propuestos por FAO en su metodología estándar de estimación;
- Definición de los períodos críticos en los períodos considerados para los cultivos. Para el caso de umbrales de temperatura se ha determinado para todos los cultivos que por helada agronómica se entendería una temperatura igual o menor que 3°C, mientras que por alta temperatura se entendería un valor superior a 39°C.

Resultados obtenidos

Se obtuvo como resultado una base de datos agronómica donde se desarrolla la información sistematizada de los cultivos analizados en los apartados que se describen a continuación:

CÓDIGOS. Indica los códigos alfanuméricos con los que son identificados los seis cultivos considerados, también los fenómenos adversos (déficit hídrico, excesos hídricos, heladas), los departamentos, tipos de producción (tecnificada o familiar) y grados de vulnerabilidad (muy alta, alta, etc.) de los cultivos ante los fenómenos adversos.

ETAPAS, Kc, Ky, PC. Sintetiza los valores de los coeficientes de cultivo (Kc), coeficiente de caída de rendimiento por falta de agua (Ky) y profundidad radicular en las diferentes etapas fenológicas de cada cultivo. En la solapa también se indican los periodos críticos (PC) en el ciclo productivo ante posibles fenómenos adversos —en relación a la potencial caída del rendimiento— y su grado de vulnerabilidad.

CALENDARIO. Para cada cultivo señala los departamentos incluidos en cada zona fenológica homogénea y las fechas locales asociadas con el inicio de cada etapa; así también el cultivo antecesor para el caso de cultivos dobles (cuando dos cultivos diferentes ocupan sucesivamente el mismo lote en un mismo año, como por ejemplo trigo seguido de soja).

PC DÉFICIT HÍDRICO. Se agrupa para cada cultivo y su etapa fenológica, según zona homogénea, las fechas de inicio y fin del periodo crítico (PC) por su mayor vulnerabilidad al déficit hídrico, la duración de este periodo y la cantidad de días consecutivos dentro de ese intervalo de tiempo que deberán considerarse con déficit para que se contabilice como caso de déficit hídrico.

PC EXCESO HÍDRICO. Indica para cada cultivo y su etapa fenológica, las zonas homogéneas, las fechas de inicio y fin del periodo más crítico (PC) por su mayor vulnerabilidad a los excesos hídricos, con la duración y cantidad de días consecutivos dentro de ese intervalo de tiempo que deberán considerarse con excesos para que se contabilice como caso de excesos hídricos.

PC HELADAS. Señala para cada cultivo y su etapa fenológica las homogéneas, las fechas de inicio y fin del periodo crítico (PC) por su mayor vulnerabilidad a heladas y su duración.

Así se obtuvieron fichas específicas por cultivo, como las que se muestran a continuación:

Zona	Calendario por Etapa Fenológica de la soja							Cultivo Antecesor	Departamento
	Siembra	Emergencia	1ª flor	1ª vaina	1ª grano	Maduración	Cosecha		
Sur-Este	15-sep	20-set	30-oct	09-nov	07-dic	20-ene	23-ene	Trigo	Itapúa Alto Paraná Canindeyú San Pedro Caazapá Misiones
Centro-Norte	25-sep	01-oct	09-oct	19-oct	17-dic	30-ene	02-feb	Trigo	Amambay Caaguazú
Kc	0,4	0,4	1,15	1,15	1,15	0,5	0,5	Vulnerabilidad	
Ky	0,2	0,2	0,8	1	1	0,8	0		
PR - AT	3 cm	20 cm	65 cm	75 cm	100 cm	120 cm	120 cm		
PR - AF	3 cm	20 cm	66 cm	76 cm	100 cm	100 cm	100 cm		
Puntos Críticos	Exceso Hídrico		Déficit Hídrico						Muy Alta
			Helada						Alta
									Alta
			Altas Temperaturas						Moderada

Figura 1. Ficha agronómica de la Soja

Zona	Calendario por Etapa Fenológica - Año 1 de la mandioca					Departamento	
	Plantación	Enraizamiento	Tuberización	Engrosamiento	Acumulación		
Norte	15-jun	15-jul	28-sep	28-oct	10-feb	Concepción San Pedro	
Centro	15-ago	14-sep	28-nov	28-dic	12-abr	Paraguarí Guairá Caazapá Cordillera	
Este	01-ago	31-ago	14-nov	14-dic	29-mar	Caaguazú Alto Paraná	
Sur-Este	01-sep	01-oct	15-dic	14-ene	29-abr	Misiones Itapúa Canindeyú	
Kc	0,3	0,3	0,3	0,8	0,3	Vulnerabilidad	
Ky	0,2	0,2	0,5	0,5	0,25		
PR - AT	no	no	no	no	no		
PR - AF	3	60	120	150	150		
Puntos críticos	Déficit Hídrico		Déficit Hídrico				Moderada
			Exceso Hídrico				Leve
	Helada						Leve
			Altas temperaturas				Nula

Figura 2. Ficha agronómica de la Mandioca

Zona	Calendario por Etapa Fenológica del sésamo					Departamento			
	Siembra	Vegetativa	Reproductiva	Maduración	Secado				
Norte	15-sep	28-oct	14-nov	14-dic	15-ene	Concepción San Pedro			
Centro	01-oct	13-nov	30-nov	30-dic	31-ene	Caaguazú, Guairá, Caazapá			
Noreste	20-sep	02-nov	19-nov	19-dic	20-ene	Canindeyú			
Sur	15-oct	27-nov	14-dic	13-ene	14-feb	Itapúa Paraguarí			
Kc	0,25	0,35	1,1	0,25	0,25	Vulnerabilidad			
Ky	0,2	0,2	0,8	0,6	0,2				
PR - AT	no	no	no	no	no				
PR - AF	3 cm	25 cm	75 cm	100 cm	100 cm				
Puntos críticos			Déficit Hídrico					Moderada	
						Exceso Hídrico		Alta	
			Helada						Nula
			Altas Temperaturas					Moderada	

Figura 3. Ficha agronómica del Sésamo

Inicio	Calendario por Etapa Fenológica							Departamento
	Siembra	Emergencia	1° flor	1° vaina	1° grano	Maduración	Cosecha	
Temprana	10-ago	13-ago	20-sep	23-sep	29-sep	15-oct	24-oct	Cordillera, Caaguazú, Itapúa
Intermedia	10-sep	13-sep	21-oct	24-oct	30-oct	15-nov	24-nov	Concepción, San Pedro Guairá, Cazapá , Misiones, Alto Paraná, Canindeyú
Tardía	10-oct	13-oct	20-nov	23-nov	29-nov	15-dic	24-dic	Paraguari
Kc	0,4	0,4	0,4	1,15	1,15	1,15	0,35	Vulnerabilidad
Ky	0,2	0,2	0,5	0,92	0,92	0,25	0,2	
PR - AT	no	no	no	no	no	no	no	
PR - AF	0	20	40	45	60	100	100	
Puntos críticos				Déficit Hídrico				Moderada
	Exceso Hídrico							Alta
	Heladas							Alta
				Altas Temperaturas				Leve

Figura 4. Ficha agronómica del Poroto

Zona	Calendario por Etapa Fenológica del maíz								Cultivo antecesor	Departamento
	Siembra	Emergencia	Fin fase juvenil	Inicio floración	Floración plena	Inicio llenado	Madurez	Cosecha		
Norte	30-jun	05-jul	24-ago	28-ago	02-sep	10-oct	23-oct	07-nov		Concepción, San Pedro, Amambay, Cordillera
Noreste	30-sep	04-sep	24-oct	28-oct	02-nov	10-dic	23-dic	07-ene		Canindeyú, Alto Paraná, Caaguazú
Sur	10-ago	15-ago	04-oct	08-oct	13-oct	20-nov	03-dic	18-dic		Central, Paraguari, Guairá, Cazapá , Neembucu , Misiones, Itapúa
Noreste	05-feb	10-feb	01-abr	06-abr	16-abr	26-may	15-jun	25-jun	Soja	Caaguazú, Canindeyú, Alto Paraná
Kc	0,4	0,5	0,8	0,9	1,2	0,9	0,8	0,4	Vulnerabilidad	
Ky	0,4	0,4	0,4	1,5	1,5	0,5	0,2	0		
PR - AT	0	2,5	50	76	85	100	120	120		
PR - AF	0	2,5	30	50	60	80	90	90		
Puntos Críticos				Déficit Hídrico					Alta	
	Exceso Hídrico								Moderada	
				Helada					Leve	
				Altas Temperaturas					Moderada	

Figura 5. Ficha agronómica del Maíz

Zona	Calendario por Etapa Fenológica del algodón							Departamento
	Siembra	Emergencia	1° botón floral	1° flor	1° capullo	75% capullos abiertos	Cosecha	
Norte	15-sep	21-sep	05-oct	09-nov	03-ene	02-feb	SD	Concepción, San Pedro, Caaguazú
Centro y Sur	10-oct	16-oct	09-nov	04-dic	28-ene	27-feb	SD	Guairá, Paraguari, Caazapá, Misiones, Canindeyú, Alto Paraná, Itapúa
Kc	0,4	0,4	0,7	1,05	1,05	0,8	0,65	Vulnerabilidad
Ky	0,2	0,2	0,7	0,7	0,05	0,25	0	
PR - AT	no	no	no	no	no	no	no	
PR - AF	3	15	50	90	100	140	140	
Puntos críticos				Déficit Hídrico				Muy Alta
	Exceso Hídrico						Exceso Hídrico	Alta
	Helada							Muy Alta
				Altas Temperaturas				Moderada

Figura 6. Ficha agronómica del Algodón

La determinación de los parámetros agronómicos consistió en el primer paso fundamental para la construcción del modelo de BHAg, puesto que gran parte de la información fue obtenida mediante investigaciones a campo y en revisiones bibliográficas.

Y los resultados obtenidos mostraron la variabilidad que implican los cuidados culturales en un mismo rubro y en diferentes partes del país; puestos que los mismos se adecuan a las condiciones ambientales, a la información manejada por el productor, al tipo de tecnología utilizada y a muchas otras variantes que cambian de productor a productor.

Metodológicamente, dicha variabilidad representó un desafío para el presente trabajo, puesto que, por ejemplo, las fechas de siembra no se correspondían en la realidad con una fecha fija en todo el territorio nacional, puesto que no la realizan a la vez todos los productores de una misma zona. Sin embargo, para este caso se debió determinar una fecha específica de siembra, puesto que el modelo de BHAg diseñado así lo exigía. Aunque sería ideal que para próximas investigaciones pueda permitirse la posibilidad de modificar las fechas de siembra.

1.2 Base de datos de suelos

El balance hídrico modelado requiere de información de suelos que incluye los siguientes parámetros hidráulicos, las cuales fueron calculados para cada unidad de suelo: capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP). Con ellos se pueden determinar finalmente la cantidad de agua disponible ($AU=CC-PMP$), también la llamada agua útil máxima, para los cultivos en campo. Todo esto fue determinado en base al conocimiento previo de ciertas características del suelo como lo son la textura, contenido de materia orgánica, salinidad, pendiente del terreno, entre otras. A la BDD se agregó una estimación de coeficiente de escurrimiento (CE) en función del tipo de pendiente y conductividad hidráulica.

Se partió de los datos publicados por el Estudio de Reconocimiento de Suelos, Capacidad de Uso de la Tierra y Propuesta de Ordenamiento Territorial Preliminar de la Región Oriental del Paraguay ([PRUT 1995](#)), escala 1:500.000 (Anexo digital 4), de donde se obtuvieron datos de textura, pendiente, drenaje, rocosidad, clase textural, materia orgánica, pH, entre otros. Así también, por medio del material elaborado por el SOTERLAC ([2005](#)) y el Atlas de suelos de América Latina y el Caribe ([2014](#)) se obtuvieron datos correspondientes a la Región Occidental del Paraguay (Chaco Paraguayo), en las cuales se tuvo acceso a datos como clase textural (a, c, l, f, etc.), pendiente, drenaje, materia orgánica, entre otras.

Fue utilizado el programa Soil Water Characteristics (SWC) para la obtención de parámetros hidráulicos de los suelos, las cuales permitirían estimar el almacenaje de agua de los suelos, mediante la determinación de la curva de retención hídrica (punto de marchitez permanente; capacidad de campo; punto de saturación) de un perfil de suelo agrícola a través de funciones de pedotransferencia de fácil obtención como textura, materia orgánica, salinidad y grado de compactación. Se determinó también la conductividad hidráulica saturada (K_{sat}) y no saturada (K).

Considerando que a nivel local no se cuenta con parámetros hidráulicos necesarios para la determinación de un balance hídrico, las estimaciones obtenidas por el programa SWC representaron una opción válida para la obtención de los mismos. Los parámetros de suelo determinados a partir de los datos de entrada introducidos en el SWC, se detallan a continuación:

Textura: indica el contenido relativo de partículas de diferente tamaño en el suelo, tales como la arena, limo y arcilla. La misma indicaría características básicas del suelo como finalidad, cantidad de agua, porosidad, capacidad de infiltración, entre otras. Las texturas de todos los horizontes del perfil se han normalizado según el diagrama triangular de textura de la [USDA \(1993\)](#).

Materia orgánica: es el producto de la descomposición química de las excreciones de animales y microorganismos, de residuos de plantas o de la degradación de cualquiera de ellos, tras su muerte. El contenido medio aproximado de materia orgánica en los suelos de labor oscila entre el 1 y el 6 %.

Punto de marchitez permanente: es determinado cuando ocurre el marchitamiento irreversible de la planta (senescencia total), no depende solamente del suelo, si no, también de las plantas que habitan en él. La misma puede ser determinado de forma directa o indirecta.

Capacidad de campo: normalmente definida como la cantidad de agua que un suelo puede retener después de haber ocurrido el drenaje natural del perfil del suelo. Esta puede ser determinado de forma directa o indirecta. Dependiendo de la textura del suelo la CC puede ser definida como el contenido de agua presente después de 24 a 48 horas después de la saturación del suelo por lluvia y/o riego.

Punto de saturación: se define como el grado o la proporción en que los espacios vacíos de un suelo contienen fluido (agua). Se expresa como un porcentaje en relación con el volumen total de vacíos. Es la relación porcentual entre el volumen de agua en una masa de suelo y el volumen total de espacios vacíos.

Agua disponible: es el total de agua que se encuentra entre el punto de capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) y la cual es fácilmente extraíble por las raíces.

Conductividad hidráulica saturada (Ksat) y no saturada (K): La conductividad hidráulica es un importante parámetro del flujo de agua en el suelo, cuando saturado (Ksat) está en función de la densidad, viscosidad del fluido (η) y de la permeabilidad intrínseca del suelo (k). Las unidades de la conductividad hidráulica son de velocidad y generalmente están dadas en cm/h. Los suelos con una alta porosidad y una pobre interconectividad entre los poros, tienen pequeños valores de Ksat. En el caso no saturado la conductividad hidráulica depende del potencial de succión ([Sumner, 2000](#)).

Para aquellos suelos con porcentaje de arcilla mayor a 60 %, los resultados fueron considerados no válidos, dado que ese contenido de arcilla es el máximo que puede ingresarse al modelo SWC. De igual manera, el porcentaje máximo de arena se limita al 96%; fue asumido el valor máximo de 96% para aquellos suelos con valores superiores a este. No se permiten tampoco valores inferiores de 2 % para cualquiera de las dos texturas con las cuales se trabaja (arena, arcilla). Datos faltantes (DF) fueron identificados y cuantificados para las regiones, Oriental y Occidental.

Resultados obtenidos

Se sintetizan en los cuadros siguientes los datos de suelos recolectados, así como los parámetros hidráulicos obtenidos para las unidades de suelo 1 a 10 de la Región Oriental. Se verá más adelante que estos resultados hallados para cada suelo y sus respectivas

unidades de medida están disponibles en la interfaz de usuario del balance hídrico una vez elegido el punto de interés.

Cuadro 1. Organización de la base de datos de suelos (primera parte)

DATOS BASE DEL PRUT (1995)					
ID del suelo	Área	Pendiente	Drenaje	Rocosisdad	Paisaje
1	0,002	3-8%	bueno	nula	lomada
2	0,013	0-3%	pobre	nula	llanura
3	0,009	0-3%	moderado	media	llanura
4	0,005	3-8%	bueno	fuerte	lomada
5	0,007	3-8%	bueno	fuerte	lomada
6	0,005	0-3%	bueno	nula	lomada
7	0,005	3-8%	bueno	nula	lomada
8	0,000	0-3%	bueno	nula	lomada
9	0,055	8->15%	nulo	fuerte	serrana
10	0,009	3-8%	bueno	nula	lomada

Cuadro 2. Organización de la base de datos de suelos (segunda parte)

CONDICIONES DEL SUELO						
ID del suelo	Saturación de Aluminio	Capacidad de Intercambio Catiónico	Bases de cambio	Saturación de bases	Potencial de hidrogeno	Materia Orgánica
1	39,1	6,84	1,87	27,35	4,6	1,72
2	0,0	17,80	14,81	83,18	6,9	3,10
3	0,0	13,90	12,90	92,83	7,3	2,92
4	39,1	6,84	1,87	27,35	4,6	1,72
5	39,1	6,84	1,87	27,35	4,6	1,72
6	0,0	10,30	3,40	33,02	6,0	0,86
7	0,0	10,30	3,40	33,02	6,0	0,86
8	0,0	10,30	3,40	33,02	6,0	0,86
9	39,1	6,84	1,87	27,35	4,6	1,72
10	0,0	10,30	4,39	42,62	6,1	3,27

Cuadro 3. Organización de la base de datos de suelos (tercera parte)

ID del suelo	TEXTURA			CARACTERÍSTICAS DEL SUELO DETERMINADAS POR SWC					
	Limo	Arcilla	Arena	Punto de marchitez (%)	Capacidad de campo (%)	Punto de saturación (%)	AW (cm/cm)	SHC (mm/hr)	MBD (g/cm3)
1	18	24	58	15,50	25,60	42,20	0,10	11,18	1,53
2	23	22	55	15,30	26,70	45,50	0,11	16,52	1,44
3	20	29	51	19,00	30,60	45,00	0,12	7,37	1,46
4	18	24	58	15,50	25,60	42,20	0,10	11,18	1,53
5	18	24	58	15,50	25,60	42,20	0,10	11,18	1,53
6	10	12	78	8,30	26,40	41,20	0,18	11,18	1,56
7	10	12	78	8,30	26,40	41,20	0,18	11,18	1,56
8	10	12	78	8,30	26,40	41,20	0,18	11,18	1,56
9	18	24	58	15,50	25,60	42,20	0,10	11,18	1,53
10	19	39	42	24,40	36,60	46,60	0,12	2,54	1,42

Cuadro 4. Organización de la base de datos de suelos (cuarta parte)

ID del suelo	Textura	Conductividad Hidráulica Saturada	Pastizal CE_P	Agrícola CE_A
1	Franco Arcillo Arenoso	Moderadamente Alta	0	0
2	Franco Arcillo Arenoso	Moderadamente Alta	0	0
3	Franco Arcillo Arenoso	Moderadamente Alta	0	0
4	Franco Arcillo Arenoso	Moderadamente Alta	0	0
5	Franco Arcillo Arenoso	Moderadamente Alta	0	0
6	Arenoso Franco	Alta	0	0
7	Arenoso Franco	Alta	0	0
8	Arenoso Franco	Alta	0	0
9	Franco Arcillo Arenoso	Moderadamente Alta	0	1
10	Franco Arcilloso	Moderadamente Baja	0	1

Entre las conclusiones del levantamiento y sistematización de la base de datos de suelos de la Región Oriental, se menciona que los parámetros hidráulicos de los suelos obtenidos mediante el modelo SWC, además de los datos de textura, clase Ksat y coeficientes de escurrimiento, todas se hallan dentro de los rangos previstos. Aunque estos fueron determinados específicamente para ser utilizados en el modelo de BHAg, representan un aporte al país, puesto que quedan disponibles para fines futuros, anexados a la base de datos PRUT y por lo tanto georreferenciados.

1.3 Base de datos climática: de estaciones convencionales y de satélites

Los datos climáticos representan un factor fundamental para la elaboración del BHAg y los mapas de riesgos agroclimáticos; ya que los mismos proporcionan información sobre precipitación y temperatura, datos básicos para cualquier generación de información meteorológica⁵ y/o climática⁶. En el caso específico de este trabajo, se utilizaron datos climáticos; los cuales fueron recabados de dos fuentes: estaciones meteorológicas con registros históricos de al menos 20 años (Anexo digital 5) e imágenes de satélite (Anexo digital 6) que permitan aproximar la probabilidad de ocurrencia de heladas.

Si bien el uso de los registros correspondientes a las informaciones diarias generadas por las estaciones convencionales de la Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH) de la DINAC, cuentan con una restricción limitada. Mediante un Convenio Específico entre DINAC, MAG, IICA y ACIDI/VOCA⁷ (Anexo digital 3), fue posible que la DMH provea de información meteorológica histórica y a tiempo real generada para alimentar y actualizar diariamente la base de datos climática que requiere el BHAg.

Cabe destacar que la información climática disponible a partir de las estaciones meteorológicas alcanza un nivel “aceptable” para la alimentación de un BHAg y la generación de series históricas de contenido de agua en el suelo, dado que la densidad de estaciones meteorológicas en el país todavía es escasa; dicha situación se deberá modificar

⁵ Se considera información meteorológica cuando la serie de datos (sea de precipitación o temperatura) no supera los 20 o 30 años.

⁶ Se considera información climática cuando la serie de informaciones registradas superan registros de 20 a 30 años en adelante.

⁷ ONG internacional que ha apoyado adicionalmente en conjunto con el BM el desarrollo del BHAg.

a futuro, aumentando la densidad de estas y mejorando la representatividad espacial de los resultados.

1.3.1 Información proveniente de estaciones meteorológicas convencionales

A partir del banco de datos de la red de estaciones meteorológicas de la DMH - DINAC, que cuenta con 23 estaciones meteorológicas distribuidas en todo el territorio nacional⁸, se han utilizado las series históricas de datos diarios, los cuales han sido revisados y evaluados mediante un control de calidad⁹.

A continuación, se citan las variables meteorológicas incorporadas en la base de datos y las cuales fueron sometidas a la fase de análisis y procesamiento:

- Temperatura media del aire (Tmed)
- Temperatura máxima (Tmax)
- Temperatura mínima (Tmin)
- Temperatura del punto de rocío (Td)
- Humedad relativa (HR)
- Nubosidad (Nub)
- Precipitación (Prec)
- Heliofanía (Helio)
- Dirección e intensidad del viento (vmax_d y vmed)
- Presión atmosférica al nivel de la estación
- Presión atmosférica ajustada al nivel medio del mar

La selección de las series de datos de las estaciones disponibles, se hicieron de acuerdo a los siguientes criterios:

- Series de datos con registros de los últimos 30 años, o en su defecto 20 años;
- Series de datos con por lo menos el 80% del total de los datos.

Cuadro 5. Estaciones meteorológicas DMH-DINAC seleccionadas y descartadas por análisis estadísticos

N°	Estación	Departamento	Lat.Sur	Lon.Oeste	Elevación (m)	Periodo disponible	Seleccionada
86134	Concepción	Concepción	23° 26'	57°25'	75	1987/2016	SI
86185	San Pedro	San Pedro	24° 5'	57°5'	81	1994/2016	SI
86192	San Estanislao	San Pedro	24°40'	56°26'	161	1987/2013	NO
86233	Villarrica	Guairá	25°45'	56°26'	163	1987/2016	SI
86234	Coronel Oviedo	Caaguazú	25°29'	56°22'	159	1990/2016	SI
86268	Caazapá	Caazapá	26°10'	56°21'	142	1987/2016	SI
86285	Capitán Meza	Itapúa	26°50'	55°19'	263	1987/2016	SI
86297	Encarnación	Itapúa	27°18'	55°53'	90	1987/2016	SI
86260	San Juan Bautista	Misiones	26°40'	57°8'	131	1987/2016	SI
86221	Paraguarí	Paraguarí	25°37'	57°8'	116	1987/2016	NO
86251	Quyquyho	Paraguarí	26°13'	56°59'	141	2010/2016	NO
86246	Aeropuerto Guaraní	Alto Paraná	25°27'	54°50'	247	1997/2013	SI
86218	Asunción, Aeropuerto	Central	25°14'	57°30'	83	1987/2016	SI
86255	Pilar	Ñeembucú	26°52'	58°19'	58	1987/2016	SI

⁸ Algunas de las cuales operan desde 1940 aproximadamente.

⁹ Cantidad de datos faltantes y outliers inferior al 20% de los datos totales.

N°	Estación	Departamento	Lat.Sur	Lon.Oeste	Elevación (m)	Periodo disponible	Seleccionada
86097	Pedro Juan Caballero	Amambay	22°38'	55°49'	563	1987/2016	SI
86210	Salto del Guairá	Canindeyú	24°1'	54°21'	297	1989/2016	SI
86128	Pozo Colorado	Pdte. Hayes	23°29'	58°47'	98	1995/2016	SI
86170	General Bruguez	Pdte. Hayes	24°44'	58°50'	89	1992/2016	SI
86033	Bahía Negra	Alto Paraguay	20°13'	58°10'	82	1990/2013	SI
86086	La Victoria	Alto Paraguay	22°16'	57°56'	78	1987/2016	SI
86011	Adrian Jara	Alto Paraguay	19°32'	59°29'	139	1987/2013	SI
86065	Pratts Gill	Boquerón	22°33'	61°33'	206	1987/2013	SI
86068	Mariscal Estigarribia	Boquerón	22°1'	60°37'	167	1987/2016	SI

En la columna Estación, celdas amarillas corresponden a estaciones meteorológicas convencionales de la Región Oriental y en celeste de la Región Occidental (Chaco).

El control de calidad de datos fue posible mediante la detección de valores considerados sospechosos, caracterizados como incorrectos y posteriormente apartados del banco de datos original evitando que estas interfirieran en productos estadísticos. Al control de calidad de datos se le suma el control que la misma DMH-DINAC implementa para la homogeneización de sus datos mediante un protocolo elaborado por Principios básicos para la Organización y Operatividad del Centro Regional sobre el Clima para el Sur de América del Sur (CRC-SAS), a fin de obtener un control sobre el banco de datos meteorológicos a nivel regional.

Considerando que la mayor parte de las estaciones mostró un alto porcentaje de faltantes en las variables velocidad del viento y heliofanía, las mismas no fueron consideradas para el descarte de estaciones examinadas.

Una vez considerada la base de datos libre de errores, se realizó un análisis estadístico básico para el período 1986-2016, calculando valores medios, desviación estándar, coeficiente de variación, moda, valores extremos, tendencia y por último probabilidad de ocurrencia de eventos extremos con sus respectivos periodos de retorno y coeficientes de determinación (R^2). También fue utilizado el método de [Gumbel \(1958\)](#) para determinar la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos¹⁰. Por medio del coeficiente de determinación (R^2) fue posible determinar las funciones de distribución de probabilidad que mejor representan a las series de extremos de variables como Tmax, Tmin y Prec.

En cuanto a los valores extremos de precipitación registrados anualmente, se han hallado los meses que presentan mayor y menor frecuencia, así como bajos o nulos registros de precipitaciones extremas. También se identificaron los años más secos y los más húmedos; los eventos de lluvia más extremos para el periodo observado con su acumulación de agua correspondiente. Y como panorama general se ha constatado con los resultados, una tendencia de incremento de la precipitación por año.

Resultados obtenidos

Con los controles de calidad fue identificada la exacta cantidad de datos faltantes o descartados en los controles, los cuales han sido muy diferentes entre las distintas estaciones y entre las distintas variables meteorológicas de una misma estación. Las variables relacionadas con viento presentaron una cantidad de faltantes que va del 34% a 41,2%. A modo de ejemplo se muestra el cuadro de resultados correspondiente a la estación de Caazapá.

¹⁰ Debido a que se ha demostrado teóricamente que se ajusta a los valores máximos

Fueron determinadas las medias mensuales, media anual y posteriormente la media normal para el periodo 1986-2016 para las variables T_{max} , T_{min} , T_{med} , T_d , HR, Helio, Nub y el total mensual y anual de precipitación para las 20 estaciones seleccionadas. Los resultados presentados para el departamento de Caazapá se exhiben a modo de ejemplo en el siguiente cuadro:

Cuadro 6. Medias normales mensuales de variables meteorológicas para el periodo 1986-2016 correspondientes a la estación Caazapá (DMH-DINAC)

Mes/Variable	Media Normal							Total Normal Prec (mm)
	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	T_{med} (°C)	T_d (°C)	HR (%)	Helio (hs)	Nub	
Enero	32,4	21,6	26,3	20,5	74,6	-	4,1	139,2
Febrero	31,7	21,2	25,7	20,4	76,5	-	4,2	130,9
Marzo	31,0	20,1	24,7	19,4	79,2	-	3,8	135,8
Abril	28,0	17,5	21,9	17,4	84,9	6,6	4,0	173,1
Mayo	23,9	13,7	18,1	14,5	86,1	-	4,1	145,6
Junio	22,5	12,5	16,8	13,4	82,9	-	4,6	117,9
Julio	22,4	11,3	16,1	12,3	78,0	-	3,7	90,4
Agosto	25,2	13,2	18,4	13,4	74,6	6,0	3,6	86,8
Septiembre	26,0	14,8	19,6	14,7	78,1	-	3,8	113,3
Octubre	28,4	17,8	22,5	17,5	81,2	-	4,2	198,1
Noviembre	30,0	18,8	23,9	18,4	75,6	7,8	3,9	168,4
Diciembre	31,7	20,8	25,7	19,9	74,5	7,8	4,1	164,4
Anual	27,8	16,9	21,6	16,8	78,8	-	4,0	1663,7

Entiéndase como: T_{max} = Temperatura máxima, T_{min} = Temperatura mínima, T_{med} = Temperatura media, T_d = temperatura de punto de rocío, HR= Humedad relativa, Helio= Heliofania, Nub= nubosidad, Prec= Precipitación.

Siguiendo el ejemplo de la estación de Caazapá, se muestran a continuación las probabilidades de ocurrencia de eventos de precipitación extrema, calculadas en base a la metodología de Gumbel y en contraste con los datos extremos observados en el periodo 1986-2016, demostrando así la fiabilidad del modelo a la hora de predecir la probabilidad de ocurrencia de dichos eventos, donde el R^2 varió de 0,61 a 0,97.

Los valores de T_{min} , T_{max} y Prec con sus respectivos tiempos de retorno (Tr) y probabilidad de ocurrencia (%) se han detallados de forma mensual, y han demostrado una tendencia de valores máximos con Tr largos y baja probabilidad de ocurrencia. Todas las informaciones fueron determinadas para cada una de las 20 estaciones seleccionadas.

Cuadro 7. Temperaturas (°C) y precipitaciones (mm) extremas mensuales y sus respectivos periodos de retorno (Tr) correspondientes a la estación Caazapá (DMH-DINAC)

Probabilidad (%)	Tr (años)	Temperatura mínima (°C, T _{min})											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	100	25,2	24,1	22,7	18,4	13,8	11,4	8,0	11,8	13,1	18,9	20,2	23,8
2	50	23,7	22,7	21,2	16,9	12,4	10,0	6,9	10,4	11,8	17,5	18,8	22,4
3	33	22,8	21,9	20,3	16,0	11,6	9,1	6,3	9,5	11,0	16,7	18,0	21,5
5	20	21,6	20,9	19,1	14,8	10,5	8,1	5,5	8,5	10,1	15,6	16,9	20,5
10	10	20,1	19,5	17,6	13,2	9,1	6,6	4,3	7,1	8,8	14,2	15,5	19,0
20	5	18,5	18,0	15,9	11,5	7,6	5,0	3,1	5,6	7,5	12,7	14,0	17,5
Temperatura máxima (°C, T _{max})													
1	100	40,8	41,0	40,0	37,8	37,3	35,2	36,1	39,0	39,8	39,9	39,8	41,0
2	50	40,1	40,2	39,3	37,2	36,2	34,3	35,2	38,1	39,0	39,1	39,2	40,2
3	33	39,6	39,7	38,8	36,9	35,5	33,8	34,7	37,6	38,6	38,7	38,8	39,8
5	20	39,1	39,0	38,3	36,4	34,7	33,1	34,0	37,0	38,0	38,1	38,3	39,2
10	10	38,3	38,2	37,5	35,8	33,6	32,2	33,1	36,0	37,2	37,4	37,6	38,4
20	5	37,5	37,2	36,8	35,1	32,5	31,2	32,2	35,1	36,4	36,6	36,9	37,5
Precipitación (mm, Prec)													
1	100	130,4	149,2	195,5	154,2	120,4	130,2	130,1	111,8	99,4	153,3	145,1	152,1
2	50	116,1	131,6	171,3	137,6	107,6	116,2	114,0	98,5	88,7	137,0	129,5	135,1
3	33	107,8	121,3	157,1	127,8	100,1	107,9	104,5	90,6	82,4	127,4	120,4	125,1
5	20	97,1	108,1	139,0	115,4	90,6	97,4	92,5	80,7	74,4	115,2	108,7	112,4
10	10	82,4	90,0	114,1	98,2	77,5	83,0	75,9	67,0	63,3	98,3	92,7	94,9
20	5	67,1	71,1	88,1	80,3	63,8	67,9	58,6	52,7	51,8	80,7	75,9	76,6

Las conclusiones del análisis de datos provenientes de estaciones convencionales, que se han considerado se presentan a continuación:

La cantidad de datos faltantes de las principales variables¹¹, no determinó que se descartara ninguna de las estaciones evaluadas.

La cantidad de estaciones seleccionadas en la Región Oriental fue de catorce (14), las cuales determinan una densidad de cobertura espacial regular¹², teniendo en cuenta la geografía del país presenta una superficie predominantemente plana, sin elevaciones montañosas importantes ni costas marinas.

De las 20 estaciones analizadas, seis de ellas fueron descartadas por no cumplir con la cantidad de años suficiente para un adecuado análisis estadístico que se precisa para los efectos de este trabajo.

1.3.2 Información proveniente de imágenes satelitales

Dado que las temperaturas mínimas suelen mostrar una relación marcada con la cercanía a cuerpos de agua y a variaciones locales en la altitud del terreno. Y que estas variaciones no pueden ser captadas del todo por los registros provenientes de estaciones

¹¹ Precipitación y temperatura, es decir, las que mayor impacto tienen en la determinación de riesgos hídricos y heladas.

¹² Sin embargo, otros países de Sudamérica (Argentina, Brasil, Uruguay) han realizado productos (similares a los abordados en este proceso) con densidad de estaciones meteorológicas con récord histórico muy similar a la de la Región Oriental.

meteorológicas¹³. Para el caso de temperatura de superficie, resulta posible realizar un análisis de la misma a partir de información satelital.

Dentro de las variables meteorológicas que se pueden estimar mediante información satelital, se encuentran la temperatura de la superficie (con altos niveles de confiabilidad), y la precipitación¹⁴.

Con el fin de elaborar una base de datos conteniendo información relacionada a la ocurrencia del fenómeno meteorológico extremo: helada, se evaluó la oferta de información satelital disponible, para la estimación de temperatura de superficie; con el uso de productos MODIS, dado que presenta adecuadas características de resolución espacial y frecuencia de revisita.

Para la evaluación de temperaturas mínimas y probabilidad de heladas, se sumó a la información proveniente de estimaciones satelitales de la DMH, también con productos MODIS. Dicha combinación ha permitido calibrar las estimaciones en función de los registros en estaciones meteorológicas y a la vez mejorar la resolución geográfica de la información.

Seguidamente se analizaron los diferentes productos MODIS que proveen valores estimados de LST¹⁵, identificando y seleccionando el mejor producto acorde a las mediciones in situ. Esto ha sido mediante una correlación de valores observados en las 14 estaciones meteorológicas de la Región Oriental junto con los valores adquiridos por las imágenes y se evaluó el nivel de ajuste entre los valores de las imágenes y los observados en las estaciones.

Fueron analizadas un total de 2869 escenas para cada producto MODIS LST/E. Este número de escenas corresponden a imágenes diarias de los meses de mayo a octubre para el periodo 2002-2017. La selección de los meses incluidos en este trabajo se basó en el registro de temperaturas mínimas observadas en las 14 estaciones meteorológicas. No se encontraron temperaturas inferiores a los 3° Celsius fuera de estos meses.

Los productos MODIS de los satélites AQUA-NIGHT y TERRA-NIGHT presentaron un comportamiento con fuerte asociación estadística significativa con los valores observados en las estaciones meteorológicas. La raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) ha sido menor en el producto AQUA NIGHT-time lo que indicaría una mejor distribución de los valores en torno a la media.

A continuación, se detallan los resultados del análisis estadístico efectuado para la comparación de los productos MODIS AQUA-NIGHT y TERRA-NIGHT seleccionados, con las temperaturas observadas y registradas en las estaciones meteorológicas de la DMH.

Los primeros resultados del análisis del producto MODIS AQUA-NIGHT-time, cuyo horario de paso por la región está registrado a las 1:00 am ha mostrado que el promedio de temperaturas observadas en las estaciones presenta una asociación fuerte y positiva ($r = 0.982$) con las estimaciones del producto AQUA-NIGHT. Al implementar una regresión lineal ordinaria (OLS), se vio que cuando el promedio de la temperatura de las estaciones aumenta en un grado, el promedio del producto MODIS aumenta en 0.88 ° C con un

¹³ Más aún por la baja densidad espacial de la red de estaciones convencionales.

¹⁴ Que suele mostrar diferencias importantes con las mediciones en estaciones meteorológicas.

¹⁵ Temperatura en la superficie de la tierra.

intervalo de confianza de 95% entre 0.867 a 0.907 ° C. El error cuadrático medio (RMSE) alcanza un valor ajustado de 0.67.

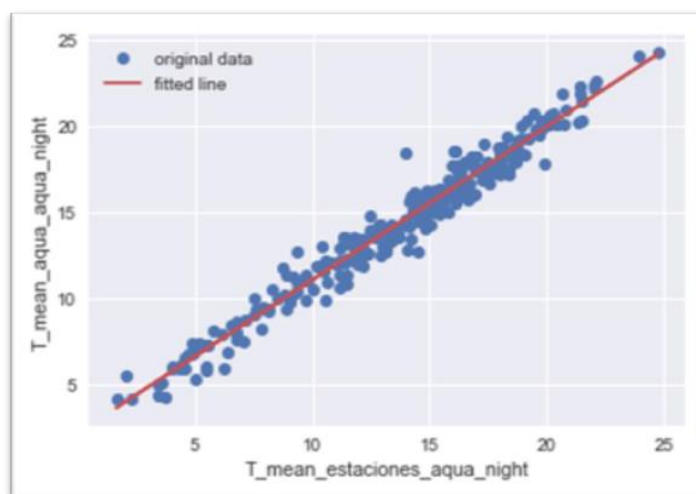


Figura 7. Temperatura promedio de estaciones (DMH) en relación con temperaturas promedio del producto AQUA-NIGHT ($r = 0.982$)

Con respecto al producto MODIS TERRA-NIGHT, cuyo horario de paso se encuentra registrado aproximadamente a las 22:00 horas, se observó que el promedio de temperaturas observadas presenta una importante asociación ($r = 0.970$) con las estimaciones provistas por el producto TERRA-NIGHT, con un valor estadísticamente significativo de $p = 8.17e-205$.

Fue observado que cuando el promedio de la temperatura de las estaciones aumenta en un grado, el promedio del producto MODIS aumenta en 0.91° C con un intervalo de confianza de 95% entre 0.89 a 0.93 ° C. El error cuadrático medio (RMSE) alcanza un valor ajustado de 0.77.

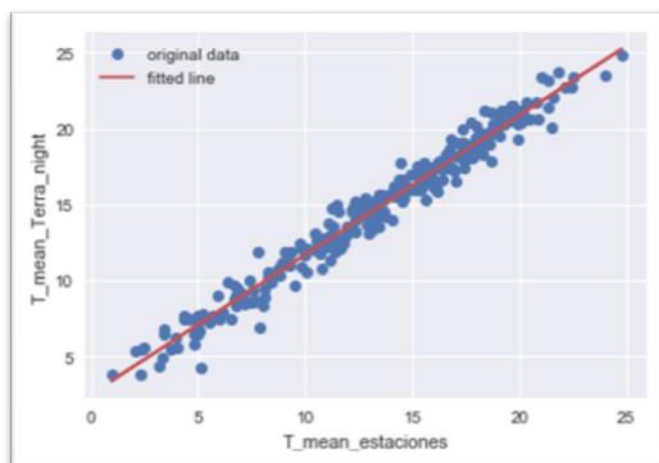


Figura 8. Temperatura promedio de estaciones (DMH) en relación con temperaturas promedio del producto TERRA-NIGHT ($r = 0.970$)

En consecuencia, se determinó que tanto las imágenes Aqua-Night y Terra-Night se encontraban en condiciones para realizar análisis de probabilidad de heladas.

Seguidamente, se estableció $T < 3^{\circ}\text{C}$ como umbral de temperatura para considerar una “helada agronómica”, a fin de diferenciarla de la “helada meteorológica”, definida como $T \leq 0^{\circ}\text{C}$ (umbral que no fue considerado).

Seguidamente se estableció el periodo de tiempo a ser analizado y los meses para los cuales se deseaba obtener los datos. El periodo establecido fue desde el año 2002 hasta el año 2017, sólo los meses de mayo, junio, julio, agosto, setiembre y octubre, ya que fuera de este periodo del año no se encontraron registros de $T < 3^{\circ}\text{C}$ en ninguna estación meteorológica.

Una vez seleccionados el umbral de temperatura y el periodo a analizar, se procedió a realizar una máscara para cada imagen de la colección de imágenes de la base de datos de temperaturas mínimas, en donde a todas las temperaturas menores a 3°C les fue asignado el valor 1, mientras que a temperaturas superiores a este umbral se les asignó 0.

Dado que el daño provocado por las heladas se encuentra determinado por las bajas temperaturas en combinación con la etapa del crecimiento del cultivo denominado periodo crítico del cultivo¹⁶, se programó la detección de modo constatar de que si al menos un evento de helada se presentó durante el periodo crítico del cultivo, se consideró que el rendimiento de la campaña se pudo ver afectada por heladas.

Así, para el periodo crítico de cada cultivo fue calculada la probabilidad de helada como “campañas con helada / campañas totales”. En el riesgo el caso del riesgo, fue calculado mediante la multiplicación de la probabilidad por la vulnerabilidad del cultivo (determinada en la base de datos agronómica).

¹⁶ El cual varía acorde a la especie y a la localización de este

2. Balance Hídrico Agrícola e Interfaz Gráfica de Usuario

2.1 Balance hídrico Agrícola

El desarrollo del Balance Hídrico Agrícola (BHAg), alimentado con las diferentes bases de datos de cultivos, clima y suelo, implica la evaluación de la intensidad de los eventos de sequía y excesos hídricos en diferentes unidades de suelo y para distintos cultivos.

El BHAg pasa a representar un instrumento vital del Sistema de Información Agrometeorológica Nacional, además de constituirse como una herramienta de monitoreo de las condiciones actuales, permitiendo la generación de mapas de riesgos agroclimáticos.

La implementación operativa del BHAg fue desarrollado en un servidor de la DMH-DINAC, mediante un Convenio Específico, que hizo posible la habilitación de credenciales de acceso en lo que refiere a la instalación y funcionamiento del BHAg y dependencias.

El BHAg consiste en un sistema automatizado con actualización diaria para cultivo; que funciona operativamente para (i) puntos de referencia de cada unidad de suelo y para (ii) nodos de malla regular, en formato de salida compatible con un sistema de información geográfica.

Las principales salidas calculadas fueron: porcentaje de agua útil en la profundidad radicular (AU%) y presencia de excesos hídricos en superficie; a partir de la base de datos con información edáfica, meteorológica y agronómica.

En la Figura 9 se puede observar el *modus operandi* del modelo de BHAg desarrollado. Teniendo en cuenta que, dependiendo del modelo de balance desarrollado, la cantidad de agua en el suelo puede variar y que generalmente los modelos suelen despreciar los flujos horizontales frente a los verticales, como ascensión capilar, percolación profunda y flujo subsuperficial por ser de orden menor al resto; los términos tachados en azul fueron descartados para la modelación del BHAg.

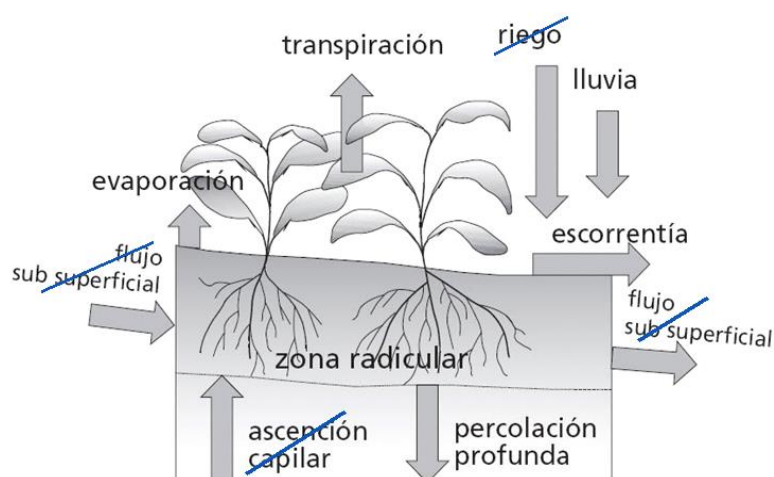


Figura 9. Componentes del Balance Hídrico Agrícola.

Una de las principales fortalezas del modelo BHAg desarrollado se basa en el cálculo de la evapotranspiración de los cultivos seleccionados. La evapotranspiración potencial o máxima de referencia (sin limitaciones de disponibilidad de agua), -ETP- fue calculada según el método Penman-FAO (1998) a partir de datos provenientes de las estaciones meteorológicas; en función de las variables: temperatura máxima, temperatura mínima, velocidad media del viento, humedad relativa y heliofanía (o en su defecto nubosidad).

Una vez calculados los valores de ETP, fueron calculados los valores de ETC (evapotranspiración potencial del cultivo), que consiste en la máxima cantidad de agua que puede evapotranspirarse desde un suelo con una cobertura vegetal determinada, que se desarrolla en óptimas condiciones, y sin limitaciones en la disponibilidad de agua. Esto se hace a través de coeficientes de cultivo (K_c) para cada etapa del cultivo, y que se aplica a los valores de ETP calculados ($ETC = K_c * ETP$).

El modelo, continúa con el cálculo de la evapotranspiración real del cultivo (ETR), que es la cantidad real de agua que puede evaporarse desde un suelo con una cobertura vegetal determinada, en función del agua disponible cada día en el suelo. La ETR será entonces en general menor a la ETC, igualándola sólo cuando el suelo se halle en capacidad de campo, es decir, sin limitantes para el consumo.

El modelo permite calcular para cada día, el contenido de humedad del suelo considerando el del día anterior más el aporte de la precipitación (si la hubo) y restando las pérdidas de agua por evaporación del suelo, transpiración de las plantas, escurrimiento superficial y percolación profunda.

Si con el cálculo del modelo se supera la capacidad de campo del suelo, se contabilizan los milímetros excedentes y se detectan excesos hídricos. Este cálculo se realiza para cada unidad de suelo, utilizando los parámetros hidráulicos (calculadas en la base de datos de suelos).

El modelo, también permite estimar la pérdida de rendimiento (YR) de un cultivo, mediante un método propuesto por la FAO, en función del nivel de satisfacción hídrica (WRSI) que el cultivo haya experimentado a lo largo de su ciclo. La documentación de este procedimiento se puede consultar en FAO 66: Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua y FAO 22: Yield response factors of field crops to deficit irrigation.

El módulo de cálculo de balance hídrico incluye el cálculo de WRSI diario como:

$$WRSI = ETR/ETC$$

La evapotranspiración real (ETR) y la evapotranspiración potencial o máxima del cultivo (ETC) fueron calculadas en el algoritmo de BHAg para determinar el consumo diario de agua del sistema suelo-planta, como se describió anteriormente.

El cálculo de YR utiliza, además del WRSI, un dato de sensibilidad al déficit hídrico (K_y), un valor que depende de la etapa fenológica del cultivo y es parte de la base de datos agronómica desarrollada para este trabajo.

Los valores de K_y se considerarán constantes desde el inicio al fin de cada etapa fenológica y los valores diarios de YR se obtienen dividiendo el valor de K_y de la etapa fenológica por la duración de la etapa (días).

La pérdida de rendimiento (%) de un día en particular se calcula como:

$$YR = K_y * (1 - ETR/ETC) = K_y * (1 - WRSI)$$

La pérdida total de rendimiento es la suma de todas las pérdidas diarias. Es decir, cada día se irán acumulando las pérdidas diarias. Si la pérdida se evalúa superior al 100% ($YR > 1$) entonces se considera que la pérdida es total.

La Figura 10 resume los datos de entrada y pasos para determinar diariamente el contenido de agua en el suelo y la presencia de excesos hídricos.

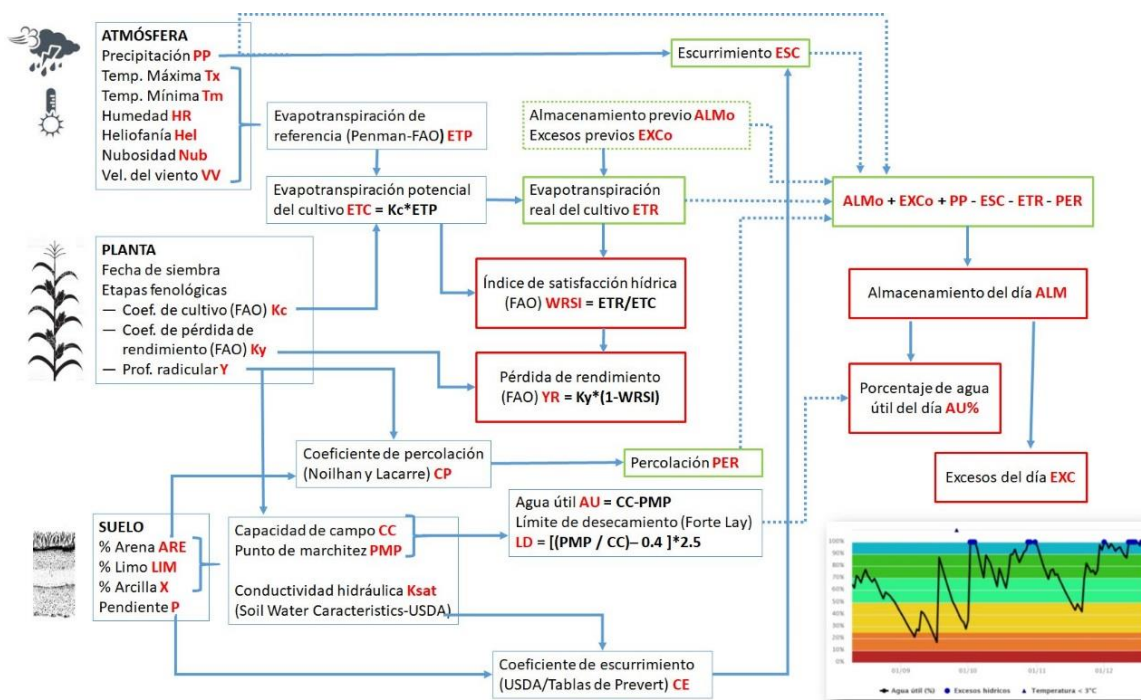


Figura 10. Esquema de datos de entrada, cálculos y salidas del BHAg.

Resultados obtenidos

El modelo BHAg consigue lograr salidas donde para cada unidad de suelo, cobertura vegetal y fecha (con actualización diaria), se obtienen los valores estimados de ETP, ETC, ETR, excesos, escurrimiento, percolación; para cualquier día entre 01/01/1987 y el presente. Estas salidas se pueden obtener en formato ascii (.csv) y también pueden ser visualizadas mediante la interfaz gráfica de usuario (página web), que se describirá en el siguiente ítem.

A modo de ejemplo en el Cuadro 8 se muestra la salida para los primeros 10 días del año 2009 para la unidad de suelo 107 (BDD PRUT), donde se simuló el consumo hídrico de la rotación de un doble cultivo con una primera ocupación de soja (antecesor) y una segunda ocupación de maíz zafriña (cultivo principal). La unidad de suelo corresponde al departamento de Canindeyú y la profundidad radicular estimada para esos días es de 1000 mm (1 m). Teniendo en cuenta esta profundidad, se puede ver la evolución del almacenaje, de los milímetros diarios evacuados por escurrimiento superficial y por percolación profunda.

En el BHAg se puede apreciar también los valores diarios de precipitación estimados en la unidad de suelo y obteniendo la generación de excesos en los últimos días. Otro de los resultados fundamentales es el contenido de agua útil expresada como porcentaje del agua útil máxima que el suelo es capaz de retener. Notar que se generan excesos sólo en el caso de que el agua útil estimada para el día, alcance el 100%.

Cuadro 8. Ejemplo parcial de salida numérica (.csv) del BHAg.

Fecha	Antecesor	Cultivo	Tipo	Departamento	Unidad de suelo	Profundidad de la raíz	Almacenamiento del día anterior	Excesos	Precipitación	ETP	ETC	Escurremient	Percolación	Almacenamiento	Agua disponible
01/01/2009	soja	maíz	familiar	Canindeyú	107	1000	32	0	19,54	4,998	3,901	0,113	0	0,457	0,116
02/01/2009	soja	maíz	familiar	Canindeyú	107	1000	56,56	0	29,1	4,998	3,828	0,709	0	0,808	0,687
03/01/2009	soja	maíz	familiar	Canindeyú	107	1000	52,29	0	0	4,998	3,754	0	1,228	0,747	0,588
04/01/2009	soja	maíz	familiar	Canindeyú	107	1000	48,96	0	0	4,998	3,68	0	0,578	0,699	0,51
05/01/2009	soja	maíz	familiar	Canindeyú	107	1000	46,35	0	0	4,998	3,606	0	0,07	0,662	0,45
06/01/2009	soja	maíz	familiar	Canindeyú	107	1000	44	0	0	4,998	3,532	0	0	0,628	0,395
07/01/2009	soja	maíz	familiar	Canindeyú	107	1000	41,82	0	0	4,998	3,458	0	0	0,597	0,344
08/01/2009	soja	maíz	familiar	Canindeyú	107	1000	39,79	0	0	4,998	3,385	0	0	0,568	0,297
09/01/2009	soja	maíz	familiar	Canindeyú	107	1000	37,89	0	0	4,998	3,311	0	0	0,541	0,253
10/01/2009	soja	maíz	familiar	Canindeyú	107	1000	47,31	0	12,75	4,998	3,237	0,092	0	0,675	0,472

El BHAg se realiza en forma ininterrumpida para cada día desde el 1 de enero de 1986. En los periodos sin ocupación de cultivos, se considera un coeficiente de cultivo constante correspondiente a un barbecho convencional ($Kc=0,4$) y profundidad de 30cm. El almacenaje inicial (1/1/1986) se considera arbitrariamente igual al 80% de la capacidad de campo. El primer año (1986) se descarta ya que es el tiempo estándar que el modelo tarda en autocalibrarse.

Fueron calculados también los valores de YR para cada cultivo, unidad de suelo y campaña (1987 en adelante), a fin de poder compararlos con series de rendimientos históricos. A nivel nacional, las series de datos históricos de rendimiento disponibles son las del MAG, a nivel de departamento y desde 2007 (10 años).

En el Cuadro 9 se muestra una salida numérica parcial de la evaluación de YR para la unidad de suelo 107 del departamento Canindeyú, para cada campaña, considerando una rotación soja (antecesor) seguida de maíz zafriña (cultivo principal). Las dos últimas columnas indican los valores calculados de pérdida de rendimiento para soja (YR_ant) y para maíz zafriña (YR_cult). Se han resaltado los 5 mayores valores de YR en cada caso: para soja, la mayor pérdida fue del 74% (2000) y para maíz 92% (2009).

Cuadro 9. Ejemplo parcial de salida numérica (.csv) de la estimación de pérdida de rendimiento en cada campaña.

Antecesor	Cultivo	Campaña	Tipo	Departamento	Unidad de suelo	YR del antecesor	YR del cultivo
soja	maíz	1986	tec	Canindeyú	107	0	0,192
soja	maíz	1987	fam	Canindeyú	107	0,547	0,132
soja	maíz	1988	fam	Canindeyú	107	0,316	0,312
soja	maíz	1989	fam	Canindeyú	107	0,387	0,698
soja	maíz	1990	tec	Canindeyú	107	0,318	0,193
soja	maíz	1991	tec	Canindeyú	107	542	0,395
soja	maíz	1992	fam	Canindeyú	107	0,409	0,065
soja	maíz	1993	fam	Canindeyú	107	0,367	0,137
soja	maíz	1994	tec	Canindeyú	107	0,328	0,324
soja	maíz	1995	fam	Canindeyú	107	0,268	0,658
soja	maíz	1996	tec	Canindeyú	107	0,5622	0,365
soja	maíz	1997	tec	Canindeyú	107	0,129	0,681
soja	maíz	1998	fam	Canindeyú	107	0,185	0,2
soja	maíz	1999	fam	Canindeyú	107	0,487	0,337
soja	maíz	2000	tec	Canindeyú	107	0,74	0,368
soja	maíz	2001	fam	Canindeyú	107	0,232	0,405
soja	maíz	2002	tec	Canindeyú	107	0,481	0,455
soja	maíz	2003	fam	Canindeyú	107	0,298	0,52
soja	maíz	2004	fam	Canindeyú	107	0,336	0,202
soja	maíz	2005	tec	Canindeyú	107	0,234	0,53
soja	maíz	2006	tec	Canindeyú	107	0,44	0,811
soja	maíz	2007	tec	Canindeyú	107	0,256	0,464
soja	maíz	2008	fam	Canindeyú	107	0,467	0,662
soja	maíz	2009	fam	Canindeyú	107	0,426	0,924
soja	maíz	2010	tec	Canindeyú	107	0,151	0,661
soja	maíz	2011	tec	Canindeyú	107	0,348	0,703
soja	maíz	2012	tec	Canindeyú	107	0,598	0,301
soja	maíz	2013	fam	Canindeyú	107	0,417	0,208
soja	maíz	2014	fam	Canindeyú	107	0,393	0,158
soja	maíz	2015	fam	Canindeyú	107	0,306	0,16
soja	maíz	2016	tec	Canindeyú	107	0,145	0,412

Se compararon los valores de YR obtenidos en cada campaña con las series departamentales de rendimientos del MAG (2007-2017). Los resultados de la comparación de los valores de rendimiento del MAG y del índice YR calculado en función del déficit hídrico en el modelo resultaron diferentes según el cultivo considerado y entre departamentos. Es de esperar que los coeficientes de correlación sean negativos ya que, a mayor pérdida de rendimiento estimada (YR) le deben corresponder menores rendimientos. En el cuadro siguiente se muestran los departamentos para los cuales se obtuvo una correlación con $|R| > 0,5$.

Cuadro 10. Grupos de departamentos con diferente grado de correlación entre pérdidas estimadas de rendimiento debido a déficit hídrico (YR) y rendimientos departamentales del MAG. Abajo, porcentaje de casos con $|R| > 0,5$ por cultivo.

Cultivo	Departamentos Con $ R > 0.5$	Departamentos Con $0,3 < R \leq 0,5$	Departamentos Con $ R \leq 0.3$
Maíz	Cordillera, Alto Paraná, Amambay, Canindeyú	Concepción, Caaguazú, Central	San Pedro, Guairá, Caazapá, Itapúa, Misiones, Paraguairí, Ñembucú
Soja	San Pedro, Caaguazú, Caazapá, Itapúa, Alto Paraná, Canindeyú		Misiones, Amambay
Sésamo	Paraguairí	Guairá, Caazapá, Itapúa	Concepción, San Pedro, Caaguazú, Canindeyú
Algodón	San Pedro, Guairá, Caaguazú, Caazapá, Itapúa, Paraguairí, Alto Paraná, Canindeyú	Misiones	Concepción
Poroto		Paraguairí	Concepción, San Pedro, Cordillera, Guairá, Caaguazú, Caazapá, Itapúa, Misiones, Alto Paraná, Canindeyú
Mandioca	Cordillera, Guairá	Itapúa, Misiones, Paraguairí	Concepción, San Pedro, Caaguazú, Caazapá, Alto Paraná, Canindeyú

	MAÍZ	SOJA	SÉSAMO	ALGODÓN	POROTO	MANDIOCA
% $ R > 0.5$	29%	75%	13%	80%	0%	18%

Si bien se ha tratado de evaluar estas relaciones (YR por Rendimiento) para los seis cultivos priorizados y todos los departamentos posibles, la realización de este análisis ha encontrado las siguientes limitaciones:

- La cantidad de años disponibles para el análisis (series históricas del MAG) son muy pocos como para llevar adelante un estudio estadístico significativo (10 años).
- El indicador YR sólo estima pérdidas relacionadas con falta de humedad en el suelo, pero las pérdidas también tienen lugar por excesos hídricos, heladas, etc.
- La agregación del resultado a nivel departamental no es adecuada debido a la dispersión interna de rendimientos. De hecho, el modelo indica valores de YR distintos para diferentes suelos dentro de un mismo departamento, que han debido promediarse para realizar la comparación.
- En el caso de maíz, no se dispone de estadísticas separadas de la variedad zafriña. En la misma serie se integran cultivos de primavera-verano (maíz) y de verano-otoño (maíz zafriña), que pueden presentar diferencias en sus rendimientos aún en la misma campaña agrícola.
- En el caso del sésamo, las tendencias de los rendimientos son decrecientes en el tiempo. Por otra parte, debe tenerse en cuenta que el indicador YR sólo estima pérdidas de rendimiento por déficit hídrico.

Se puede concluir que, para cultivos más tecnificados como la soja, las estadísticas del MAG representan mejor los rendimientos de cada campaña, y por lo tanto las

correlaciones halladas son buenas. En el otro extremo están los cultivos de la agricultura familiar de renta (sésamo) o consumo (poroto, mandioca) para los cuales las estimaciones de rendimiento del MAG no son ajustadas. En el caso del maíz, el principal inconveniente para la evaluación de los rendimientos históricos es la falta de datos separados para maíz y maíz zafriña.

Realizando un análisis para cada cultivo y departamento, es posible ver que los resultados arrojan información valiosa. Se comparan a continuación los resultados de la comparación YR-Rend para el cultivo algodón en dos departamentos contiguos del sur de la Región Oriental (Itapúa y Misiones) para los cuales se ha considerado que la fecha de siembra es normalmente la misma.

Se puede ver en la Figura 11 (izquierda) que, para el departamento de Itapúa, donde los suelos poseen una mejor aptitud agrícola y el porcentaje de área agrícola mecanizada es de alrededor del 40% (Sustentap), la correlación es muy buena y claramente se puede para las dos peores campañas (2009 y 2012) los valores estimados de YR son superiores a 0,3 y los apartamientos de los rendimientos con respecto a los valores esperados fue de -32% (2009) y -42% (2012). En cambio, para Misiones (derecha), con menos del 20% del área agrícola mecanizada (Sustentap), los resultados son menos claros.

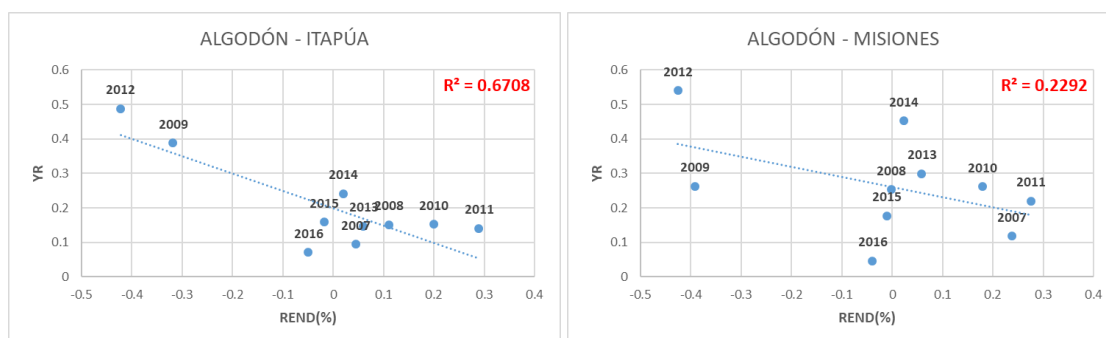


Figura 11. Comparación de resultados hallados para Itapúa (izquierda) y Misiones (derecha) al comparar valores de YR y apartamientos de los rendimientos según serie histórica del MAG.

Analizando casos particulares en que se conoce que se han producido eventos de sequía o de excesos hídricos importantes, expertos locales han podido verificar cualitativamente que el modelo estima el contenido de agua en el suelo adecuadamente. No fue posible realizar una comparación de los resultados del modelo con valores medidos a campo, ya que no se dispone de esta información, sin embargo, es recomendado este análisis en instancias futuras para arribar a una estimación del error relativo en las estimaciones.

El modelo ha permitido generar valores históricos de contenido de agua en el suelo que se analizaron luego estadísticamente para determinar probabilidades de déficit y de excesos hídricos, además de constituir una herramienta para el seguimiento de esta variable a tiempo real. Esto no era posible hasta el momento en el país y constituye un importante adelanto. En el futuro se podrán ajustar algunos parámetros del modelo para que resulten cada vez más ajustados a las observaciones de los técnicos locales o, si fuera posible, a mediciones de humedad en el suelo.

Para cultivos típicos de la agricultura familiar, la relación hallada entre los valores calculados de YR y los rendimientos departamentales del MAG no mostraron una buena correlación. Contrariamente, para los cultivos tecnificados —y especialmente en los departamentos con mayor porcentaje de agricultura mecanizada— los resultados fueron

muy buenos, permitiendo estimar valores umbrales de YR a partir de los cuales se obtienen rendimientos muy bajos, como se puede ver en el cuadro 11:

Cuadro 11. Umbrales determinados como límite para la estimación de caídas de rendimiento que sólo se han observado en 2 de los últimos 10 años de la serie MAG (2007-2016).

Departamento	Soja		Algodón	
	Umbral YY	Caída Rendimiento	Umbral YR	Caída Rendimiento
San Pedro	0.50	40%		
Caaguazú	0.45	30%		
Caazapá	0.45	40%		
Itapúa	0.35	35%	0.30	30%
Alto Paraná	0.40	30%	0.40	40%
Canindeyú	0.43	30%	0.40	35%

Se puede ver en el Cuadro 11 que los departamentos con mejor performance hallada para la obtención de umbrales de YR asociados a fuertes caídas de rendimiento son los del este de la Región Oriental, donde se ubica la mayor parte de la agricultura tecnificada.

Como los resultados se ajustan para cultivos y áreas más tecnificadas, es de esperar que resulten buenos indicadores en otras donde las estadísticas son más difusas. Por lo tanto, los resultados de contenido de agua en el suelo y el coeficiente derivado YR permitirán una mejor evaluación de las pérdidas en otros departamentos y en otros cultivos. Además, ya que se ajustan a nivel de promedio departamental, se deduce que permitirán estimar mejor las diferencias locales de rendimiento esperado (por unidades de suelo o distritos) dentro de un mismo departamento, información no disponible actualmente en el MAG.

2.2 Interfaz gráfica de usuario

Para facilitar el acceso a los resultados del BHAg tanto para el público en general como para instituciones o usuarios especiales (MAG, DMH), se desarrolló una interfaz gráfica que permite realizar una búsqueda específica (departamento, cultivo, campaña) y visualizar un mapa de estado de las reservas hídricas para cada día. Seleccionando un punto es posible visualizar y descargar la evolución de las reservas a lo largo de la campaña seleccionada.

Las actividades para el desarrollo de la interfaz fueron:

- Programación de un software de cálculo de balance hídrico de referencia que incluye: automatización de salidas numéricas y gráficas (i) por punto geográfico (estaciones meteorológicas) y (ii) en mallas regulares (mapas);
- Incorporación al programa de los valores de Kc y Ky para distintos cultivos, variedades, etapas fenológicas y fechas de siembra. Cálculo de WRSI y YR;
- Automatización de salidas numéricas, gráficos de seguimiento del estado de las reservas y de caídas de rendimiento en punto geográfico específicos y mapas de estado de las reservas en una fecha dada;
- Instalación del modelo de balance hídrico en un servidor del DMH y/o MAG para hacerlo operativo;
- Programación y aplicación operativa de un interfaz que permite el cálculo del balance hídrico por cultivo y lugar específico (zona de cultivo);

- Actualización automática y uso de datos capturados en las estaciones meteorológicas convencionales de la DMH. Incorporación automática de los datos en una base adecuada, con acceso para usuarios autorizados.

Las estaciones meteorológicas convencionales de la DMH establecidas para el BHAg tienen asociadas una estación automática a ser utilizada sólo en caso de que la misma se encuentre en el mismo lugar (parque meteorológico). El modelo BHAg prevé entonces una recolección y análisis de datos de estaciones meteorológicas automáticas. Para el análisis de datos de estaciones automáticas, se definen dos conjuntos de datos para analizar, teniendo en cuenta la forma en la que se registran sus datos y los siguientes puntos que se citan.

Aspectos considerados con respecto a las estaciones automáticas:

- El dato más antiguo con el que se cuenta de una estación automática, es del 13 de abril de 2014;
- Todas las estaciones automáticas con las que se trabajan transmiten datos cada 10 minutos;
- Un día completo consta de 144 transmisiones;
- Se consideran los datos de la estación automática solo si transmitió por lo menos 140 datos en el conjunto de datos requerido.

Los valores de las variables meteorológicas medidas en estaciones deben extrapolarse a cada unidad de suelo para realizar el balance hídrico en cada una de ellas. En el ANEXO 2 del presente documento: Uso de datos de estaciones meteorológicas en el algoritmo de balance hídrico por unidad de suelo, se detallan los criterios para designar estaciones cercanas al punto central (centroide) de cada unidad de suelo y las metodologías para estimar los valores de las variables meteorológicas diarias en esos puntos.

La programación del BHAg ha sido desarrollada en un lenguaje adecuado que ha incluido la automatización de salidas numéricas y gráficas por unidad de suelo (en correspondencia con las unidades de suelos del PRUT 1995), por estaciones meteorológicas y en mallas regulares. El modelo procesa todos sus componentes y permite a los administradores y usuarios finales, gestionar los datos y realizar los cálculos desde una interfaz de acceso público.

Conforme puede observarse en la Figura 12, el servidor web o de aplicaciones se conecta a su vez a tres servidores: al servidor principal de base de datos PostgreSQL/PostGIS y a otros dos servidores auxiliares: un servidor de caché en memoria y otro de colar de mensajes. El acceso se realiza a través de un firewall a fin de incrementar la seguridad de todo el sistema.

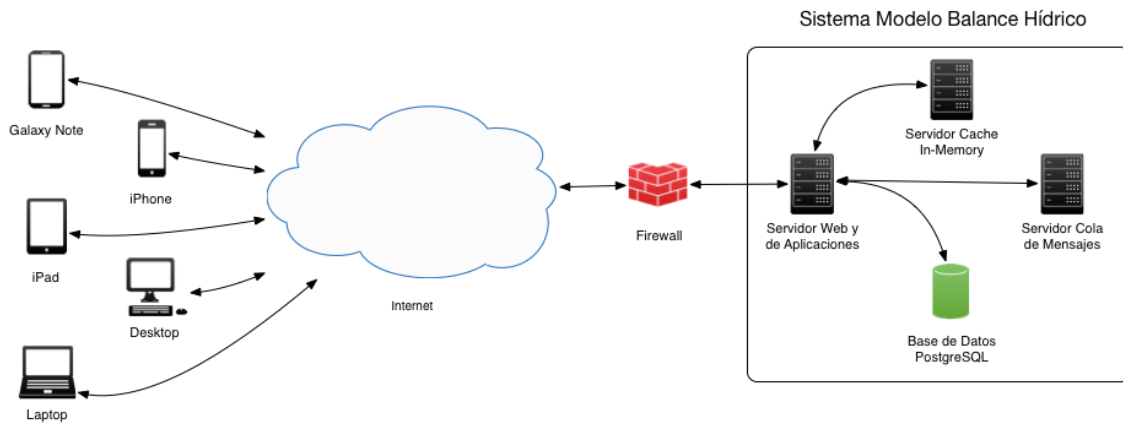


Figura 12. Esquema Conceptual del Sistema de Balance Hídrico.

Los tres componentes del sistema (el algoritmo de balance hídrico de cultivos o núcleo del sistema, la interfaz de acceso público y la interfaz web de administración) se describen a continuación:

Algoritmo del BHAg. Desarrollado en lenguaje Python (versión 3), tuvo en cuenta la facilidad de uso del lenguaje y la amplia disponibilidad de librerías disponibles para la generación y cálculo de grandes volúmenes de datos. Las librerías numpy y pandas han sido utilizadas para los cálculos. El algoritmo del balance hídrico para cultivos puede ser corroborado en la siguiente dirección:

<https://gist.github.com/everdaniel/ece0c0d3e61dc87e4fac8529e6499a1f>

Instalación del sistema. El Sistema Operativo instalado y configurado en el servidor virtual de la DMH-DINAC corresponde al Ubuntu Server 18.04 LTS (Long Term Support). Esta versión de Ubuntu Server garantiza correcciones de errores y parches de seguridad hasta el mes de Abril del año 2023 (5 años). Una vez instalado y configurado el sistema operativo, se procedió a instalar los paquetes necesarios para el funcionamiento del Sistema de BHAg.

Interfaz de acceso público. La interfaz de acceso público corresponde a una aplicación web que permite a los usuarios visualizar los datos del sistema BHAg en un mapa y adicionalmente realizar cálculos de balance hídrico en base a parametrizaciones personalizadas. Esta interfaz fue desarrollada en Javascript (AngularJS/TypeScript), dado que ha requerido de un alto nivel de interactividad. En la siguiente figura se puede apreciar el esquema conceptual de este componente.

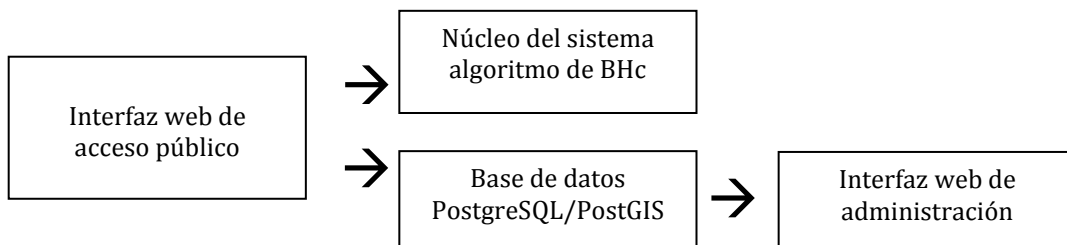


Figura 13. Esquema conceptual del componente interfaz web de acceso público.

Interfaz web de administración. La interfaz web de administración es una aplicación web, que permite a los administradores del sistema, gestionar y mantener los datos necesarios para la ejecución del modelo de BHAg. El acceso a esta interfaz es restringido a través de un usuario y contraseña. Fue desarrollada en PHP 7, utilizando el framework de código abierto Laravel 5.6 LTS (Long Term Support), el cual garantiza actualizaciones de seguridad hasta finales del 2020.

Para facilitar la gestión de la Interfaz web de administración, se han desarrollado los siguientes sub componentes:

- **Usuarios.** El sistema permite la gestión de varios usuarios, para lo cual, se prevé las siguientes interfaces: (1) Listar Usuarios, (2) Agregar Usuario, (3) Editar Usuario, (4) Borrar Usuario, (5) Cambiar Contraseña y (5) Recuperar Contraseña.
- **Instituciones.** El sistema permite la gestión de instituciones, donde cada usuario debe estar relacionado a una institución. Previendo las siguientes interfaces: (1) Listar Instituciones, (2) Agregar Institución, (3) Editar Institución y (4) Borrar Institución.
- **Estaciones.** El sistema permite la gestión de los datos de las estaciones, previendo las siguientes interfaces: (1) Listar Estaciones, (2) Agregar Estación, (3) Editar Estación y (4) Borrar Estación.
- **Datos Históricos.** El sistema permite la gestión de los datos meteorológicos históricos de las estaciones meteorológicas, para lo cual se han previsto las siguientes interfaces: (1) Listar Datos Históricos, (2) Agregar Dato Histórico, (3) Editar Dato Histórico y (4) Borrar Dato Histórico.

La Figura 14 muestra el aspecto al inicio de la activación de la interfaz web, disponible en <http://bhag.meteorologia.gov.py>. Cuando el usuario selecciona los parámetros de consulta (departamento, cultivo, tipo de producción y campaña) y hace click en el botón Consultar, la interfaz parametriza la consulta y lo envía al servidor Geoserver, el cual a su vez realiza la consulta de la salida del modelo en la base de datos PostgreSQL/PostGIS. Los datos que coinciden con los parámetros de consulta son retornados desde la base de datos PostgreSQL/PostGIS al servidor Geoserver, el cual lo vuelve a post-procesar para que estos datos numéricos puedan ser visualizados como datos GIS en el mapa.

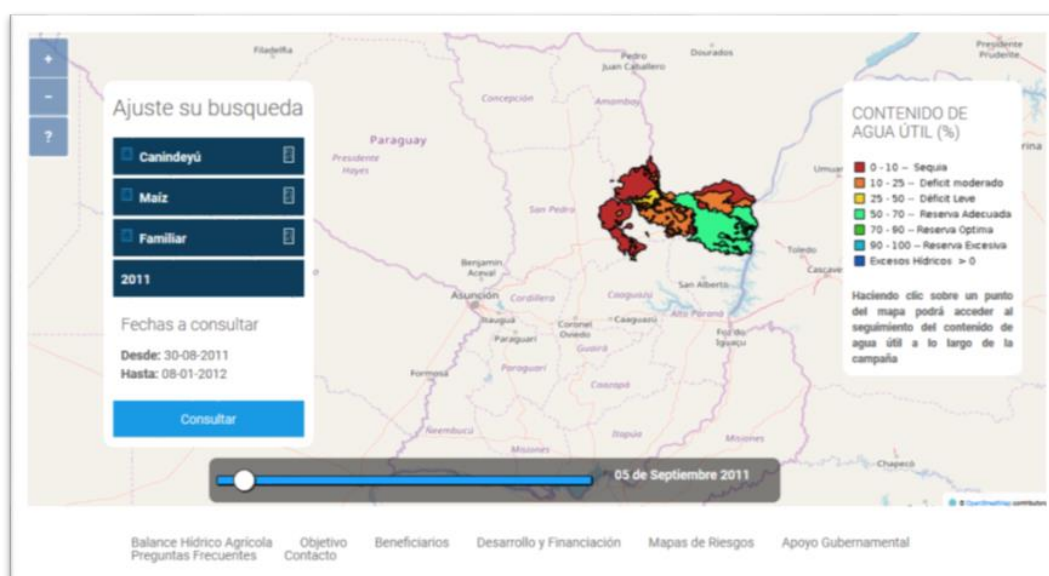


Figura 14. Interfaz web del BHAg, ejemplo para maíz en Canindeyú el 05/09/2011 (campaña 2011/2012).

La Figura 14 muestra un ejemplo de vista principal de la interfaz en la que se ha seleccionado el departamento Canindeyú, cultivo maíz, agricultura familiar y campaña 2011/2012. En el ángulo superior derecho de la figura se pueden ver las coordenadas de localización del sitio donde el usuario apoya el cursor, lo cual permite la identificación del sitio de interés. En el ángulo superior izquierdo se hallan los comandos de acercamiento o alejamiento. La escala de colores permite determinar categorías contenido de agua útil en todas las unidades de suelo del departamento seleccionado, en este caso para maíz en Canindeyú el día 5 de septiembre de 2011. Los comandos inferiores permiten cambiar la fecha.

Una vez seleccionada una localización específica haciendo clic sobre el mapa, se puede acceder al gráfico local de evolución del contenido de agua útil en el suelo para la campaña elegida. La Figura 15 muestra la evolución del agua útil (AU) disponible para consumo del cultivo en la profundidad radicular, expresada como porcentaje del máximo valor posible. Las variaciones en el porcentaje de AU se pueden ver en el gráfico como una línea negra que va mostrando oscilaciones entre la fecha de siembra (donde comienza el eje horizontal) hasta la fecha de cosecha (final del eje horizontal).



Figura 15. Ejemplo de gráfico local de seguimiento del contenido de agua útil.

Los colores de fondo indican distintas categorías de contenido de AU que se corresponden con la clasificación de la escala a la derecha, la misma que se puede ver en los mapas departamentales. Abajo hay un botón de acceso a las orientaciones para la correcta interpretación del gráfico, así también, se encuentran las opciones de descarga del mapa y los datos numéricos de porcentaje de AU.

En la solapa "Datos de suelo y cultivo" se puede acceder a los parámetros de la unidad de suelo considerada y a las principales características del cultivo simulado. En la solapa "Rendimiento esperado" se puede ver la caída de rendimiento estimada a lo largo de la campaña. Siguiendo el mismo ejemplo, la caída en el contenido de agua en el suelo a partir de fines de noviembre de 2011 habría producido una caída de rendimiento con respecto al potencial del cultivo que al 01/01/2012 se estimó en un 40% aproximadamente (Figura 16).

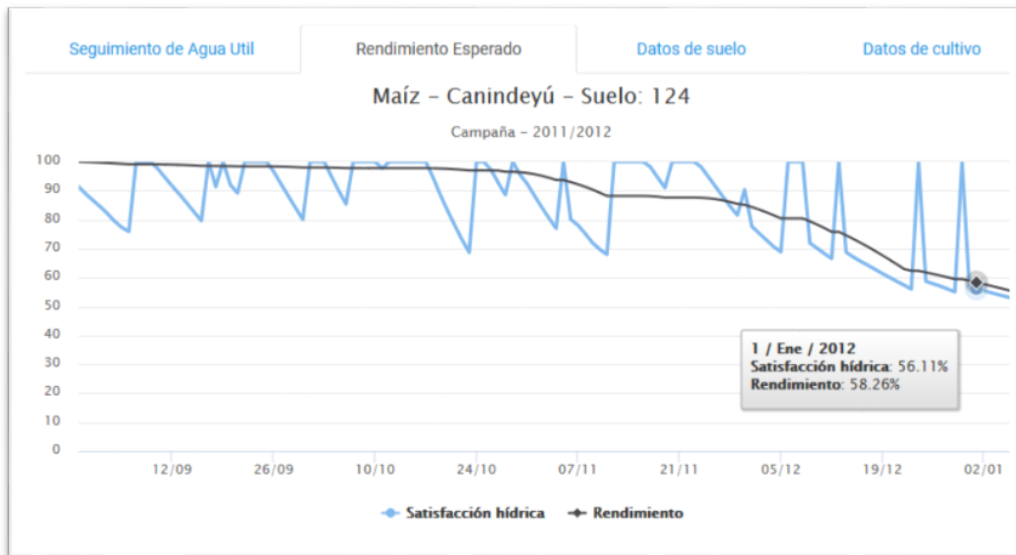


Figura 16. Ejemplo de evolución de la satisfacción hídrica (WRSI) y porcentaje de rendimiento potencial asociado (calculado en función de YR).

La interfaz de usuarios pública permite, como se ha mostrado, la visualización del contenido de agua útil en el suelo por unidad de suelo, para un departamento y cultivo dado. En la interfaz de usuarios especiales se incluye la posibilidad de visualizar y descargar el contenido de agua útil para todos los departamentos y unidades de suelo en los que el cultivo seleccionado se halla activo. Además, se incluye la posibilidad de generar resultados en nodos de una malla regular de 0,1° x 0,1° que cubre toda la Región Oriental.

A modo de ejemplo, la Figura 17 permite ver los mapas de estado de las reservas de agua útil en el suelo para toda la Región Oriental, considerando el cultivo maíz, para el día 1/10/2008: la salida de la izquierda corresponde al mapa realizado por unidad de suelo y la de la derecha a la malla regular de 0,1° x 0,1°.

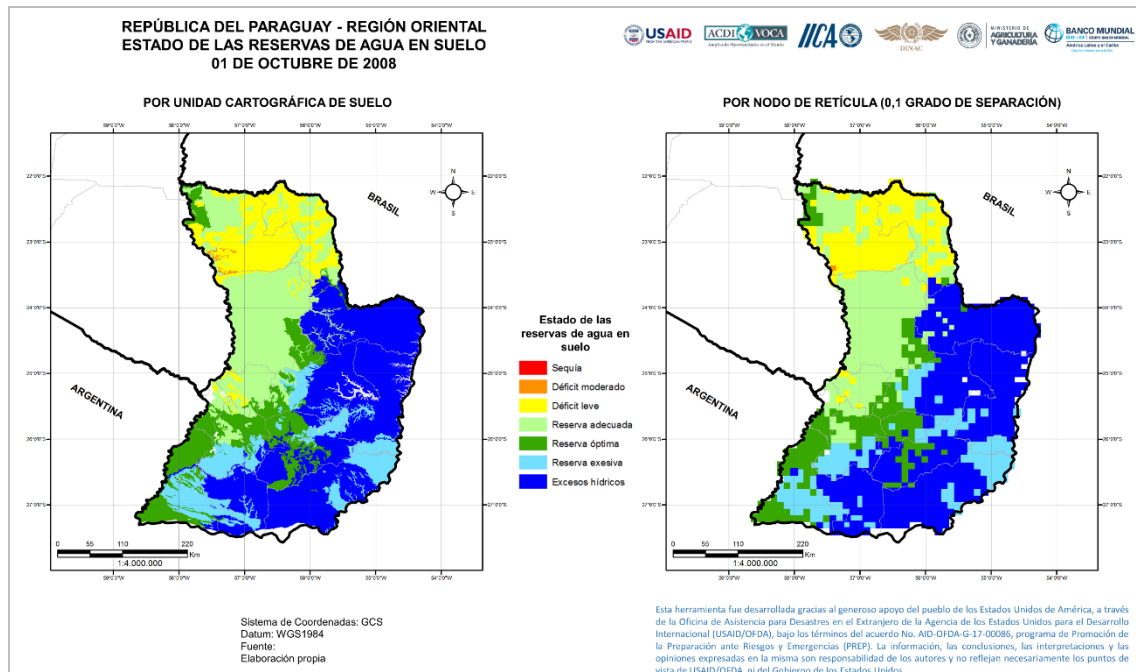


Figura 17. Mapa de estado de las reservas de agua útil en el suelo para toda la Región Oriental, considerando el cultivo maíz, para el día 1/10/2008. Mapa realizado por unidad de suelo (izquierda) y por nodo de la malla regular de 0,1° x 0,1° (derecha).

La Figura 18 muestra parcialmente la salida numérica correspondiente al mismo ejemplo y en la cual es posible descargar y graficar mediante programas estándar de proyección geográfica. El campo "index" contiene la longitud y latitud del nodo.

index	fecha	cultivo	tipo	dpto	sue_id	y	almr	exc	pp	etp	etc	etr	esc	per	alm%	au%	round	yr
64368242	1/10/2008	MZ1	fam	CN	2	752.6316	117.27	0	15.92	3.95	3.84	3.84	0.4	0	0.58	0.02	1	0.73
64379565	1/10/2008	MZ1	fam	CN	3	752.6316	143.65	0	13.15	3.95	3.84	3.84	0.4	0	0.62	0.01	1	0.696
64390888	1/10/2008	MZ1	fam	CN	5	752.6316	103.14	0	6.7	4.21	4.08	4.08	0.45	0	0.54	0	1	0.776
64402211	1/10/2008	MZ1	fam	CN	7	752.6316	66.91	0	6.09	4.21	4.08	4.08	0.4	0	0.34	0.03	1	0.756
64413534	1/10/2008	MZ1	fam	CN	12	752.6316	45.09	0	5.3	4.21	4.08	4.08	0.4	0	0.43	0	1	0.892
64424857	1/10/2008	MZ1	fam	CN	13	752.6316	102.55	0	6.63	4.21	4.08	4.08	0.45	0	0.53	0	1	0.778
64436180	1/10/2008	MZ1	fam	CN	14	752.6316	143.69	0	9.97	3.95	3.84	3.84	0.5	0	0.61	0	1	0.663
64447503	1/10/2008	MZ1	fam	CN	15	752.6316	65.95	0	6.02	4.21	4.08	4.08	0.4	0	0.33	0.03	1	0.764
64458826	1/10/2008	MZ1	fam	CN	17	752.6316	206.99	0	9.69	3.95	3.84	3.84	0.5	0	0.69	0.01	1	0.664
64470149	1/10/2008	MZ1	fam	CN	18	752.6316	87.16	0	12.4	3.95	3.84	3.84	0.4	0	0.46	0	1	0.736

Figura 18. Ejemplo parcial de salida numérica por nodos de retícula de 0,1° x 0,1° que cubre toda la Región Oriental, descargable desde la interfaz para usuarios especiales.

La interfaz generada permite visualizar los resultados del BHAg para los 6 cultivos priorizados más otros adicionales, en los departamentos donde se consideró que los mismos se producen, pudiendo seleccionar tipo de agricultura (tecnificada o familiar) y una campaña en particular, entre 1987 y la actualidad. Los mapas y gráficos se han diseñado pensando en un usuario no especializado y se consideran de sencilla interpretación. Para comprender los supuestos, alcances y limitaciones se agregó una serie de aclaraciones en la a la que se accede desde comandos en la parte inferior de la vista principal y también en el gráfico de seguimiento.

La interfaz se alimenta directamente del algoritmo de BHAg alojado y actualizado automáticamente en la DMH, lo que facilita su mantenimiento y operatividad. Usuarios especiales tienen acceso a una interfaz de modificación y ampliación de las BDD y red de estaciones meteorológicas a incluir, a la cual se podrán agregar todas las automáticas que estén integradas a la BDD de la DMH en el futuro. Además, la interfaz de usuarios especiales permite la visualización y descarga del mapa de AU% para todos los departamentos a la vez y la descarga de valores en nodos de retícula.

El proceso de determinación de salidas y formatos de la Interfaz Gráfica de Usuario se consensuó especialmente con la UGR (MAG), por lo cual se espera que resulte una herramienta adecuada a sus expectativas y a las del MAG en general.

3. Mapas de Riesgo basados en índices

3.1 Extremos hídricos

Se evaluaron riesgos de déficit hídrico y de excesos hídricos para los 6 cultivos priorizados (maíz, soja, sésamo, algodón, poroto, mandioca) utilizando los valores de porcentaje de agua útil (AU%) y de presencia de excesos hídricos (EXC) calculados diariamente por el BHAg. Los mapas probabilísticos fueron generados mediante un previo cálculo de probabilidad de ocurrencia de extremos hídricos para los periodos críticos de cada cultivo considerado (Cuadros 12 y 13).

Cuadro 12. Periodos críticos definidos para déficit hídrico por cultivo.

CULTIVO	PERIODO CRÍTICO - DÉFICIT HÍDRICO		VULNERABILIDAD
	INICIO	FIN	
MAÍZ	10 días antes de floración plena	20 días después de floración plena	Alta
MANDIOCA	Plantación	30 días desde plantación	Moderada
MANDIOCA	Engrosamiento		Moderada
SÉSAMO	Inicio etapa reproductiva	20 días desde inicio etapa reproductiva	Moderada
POROTO	Primera vaina	Primer grano	Moderada
SOJA	10 días antes de primer grano	20 días después de primer grano	Muy alta
ALGODÓN	10 días antes de primer capullo	20 días después de primer capullo	Muy alta

Cuadro 13. Periodos críticos definidos para excesos hídricos por cultivo.

CULTIVO	PERIODO CRÍTICO - EXCESOS HÍDRICOS		VULNERABILIDAD
	INICIO	FIN	
MAÍZ	Emergencia	Inicio floración	Moderada
MANDIOCA	Tuberización	Acumulación	Leve
SÉSAMO	Inicio secado	20 días desde inicio secado	Alta
POROTO	Siembra	Emergencia	Alta
SOJA	Siembra	Emergencia	Alta
ALGODÓN	Siembra	Emergencia	Alta
ALGODÓN	Inicio cosecha	Fin cosecha	Alta

Para la definición de la ocurrencia o no de los eventos extremos de déficit hídrico, se utilizó el concepto de agua fácilmente extraíble (AFE), según la definición de FAO en el documento Estudio FAO: Riego y Drenaje 56 (1998). Para cada cultivo se propone una fracción de agotamiento (P) que representa el total de agua útil disponible en el suelo que puede ser agotada de la zona radicular antes de presentarse estrés hídrico. Si el agotamiento es mayor, el cultivo comienza a estresarse. Por lo tanto, (1-P) fue considerado el umbral de agotamiento o estrés.

En relación a ese umbral de contenido de agua útil se definieron dos umbrales para eventos de estrés por falta de agua:

$$\begin{aligned} \text{Umbral de déficit hídrico:} & \quad \text{UDH} = (1-P) / 2 \\ \text{Umbral de sequía:} & \quad \text{USE} = (1 - P) / 5 \end{aligned}$$

De los resultados del BHAg se calculan promedios de AU% en ventanas móviles de N días dentro de cada periodo crítico. Si el promedio es inferior al umbral, se considera un caso de déficit o de sequía, según la intensidad. La cantidad N de días considerados para definir un evento de estrés hídrico varía para los distintos cultivos y se pueden consultar sus valores en la base de datos agronómica.

En el ANEXO 4 del presente documento: Determinación de índices de déficit hídrico y sequía, se pueden ver en detalle las ecuaciones que determinan los umbrales, el cálculo de los índices y la probabilidad de eventos de estrés hídrico.

Para la determinación de casos de excesos hídricos se han utilizado los resultados del BHAg, en particular la ocurrencia de excedentes o excesos hídricos. Se considerará que la campaña ha sido afectada por excesos hídricos si los mismos permanecen durante N días consecutivos dentro del periodo crítico PC_EH. Este cálculo se hará para cada unidad de suelo. Para cada cultivo se ha establecido uno o dos periodos más vulnerables a excesos hídricos. La longitud del intervalo (N días) puede ser diferente para los distintos cultivos, aunque en principio se tomó un valor fijo N=10 días.

Si dentro del PC_EH se identifican N días consecutivos con excesos hídricos, entonces se computará esa campaña como afectada. La probabilidad de excesos se calculará como el cociente entre las campañas afectadas y las campañas totales.

La figura 19 muestra un ejemplo de resultado de probabilidad de déficit hídrico en maíz, para agricultura familiar. La escala muestra directamente la probabilidad de ocurrencia del evento. Se adjunta a la derecha del mapa la descripción de zonas fenológicas y periodos críticos considerados para la información queda integrada.

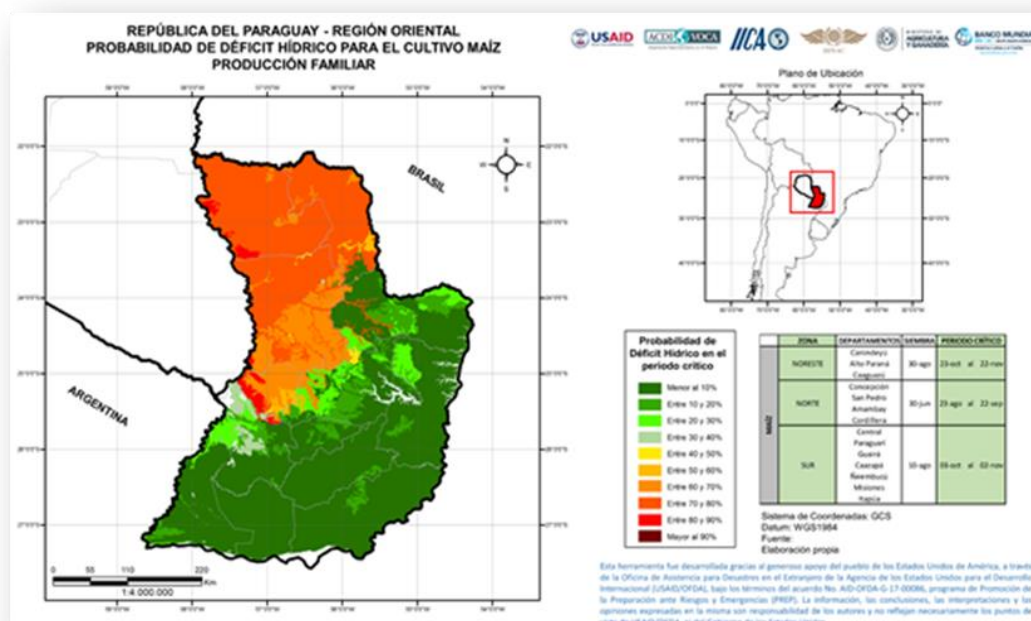


Figura 19. Mapa de probabilidad de déficit hídrico del maíz (agricultura familiar).

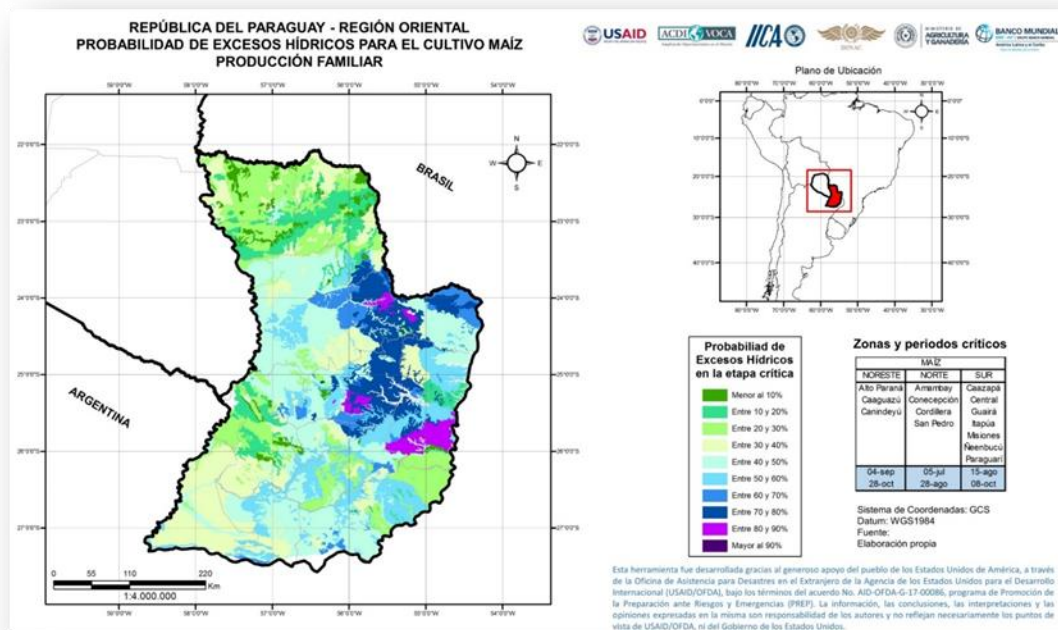


Figura 20. Mapa de probabilidad de excesos hídricos del maíz (agricultura familiar).

La Figura 20 muestra un ejemplo de resultado de probabilidad de excesos hídricos en maíz, para agricultura familiar. La escala muestra directamente la probabilidad de ocurrencia del evento.

Para el caso de los mapas de riesgo, se incorporó la vulnerabilidad de los cultivos seleccionados, de acuerdo a las etapas fenológicas en las cuales se encontrarían estos cultivos en el periodo crítico. Como se mencionó en el ítem 1.1, la vulnerabilidad de cada cultivo fue definida cualitativamente (nula, leve, moderada, alta o muy alta) según el fenómeno evaluado, a partir de análisis bibliográfico y recomendaciones de expertos calificados.

Para cada cultivo y periodo crítico, se multiplico la probabilidad de déficit hídrico (PDH), de sequía (PSE) o de excesos hídricos (PEH) por la vulnerabilidad expresada en forma numérica (VULN_NUM) para obtener el riesgo de déficit (RDH), de sequía (RSE) o de excesos (REH).

Cuadro 14. Valoración numérica en base al nivel de vulnerabilidad.

Vulnerabilidad	Código	Valor Numérico
Muy Alta	MA	1
Alta	A	0.75
Moderada	M	0.5
Leve	L	0.25
Nula	N	0

Para facilitar la visualización de los resultados en los mapas de riesgo, se determinó una escala de categorías donde el riesgo será mayor si la probabilidad de ocurrencia del fenómeno es más alta o el cultivo es más vulnerable. La Figura 21 muestra los colores asignados a las distintas combinaciones de probabilidad o frecuencia de ocurrencia (eje vertical) y vulnerabilidad (eje horizontal) que determinan las categorías de riesgo.

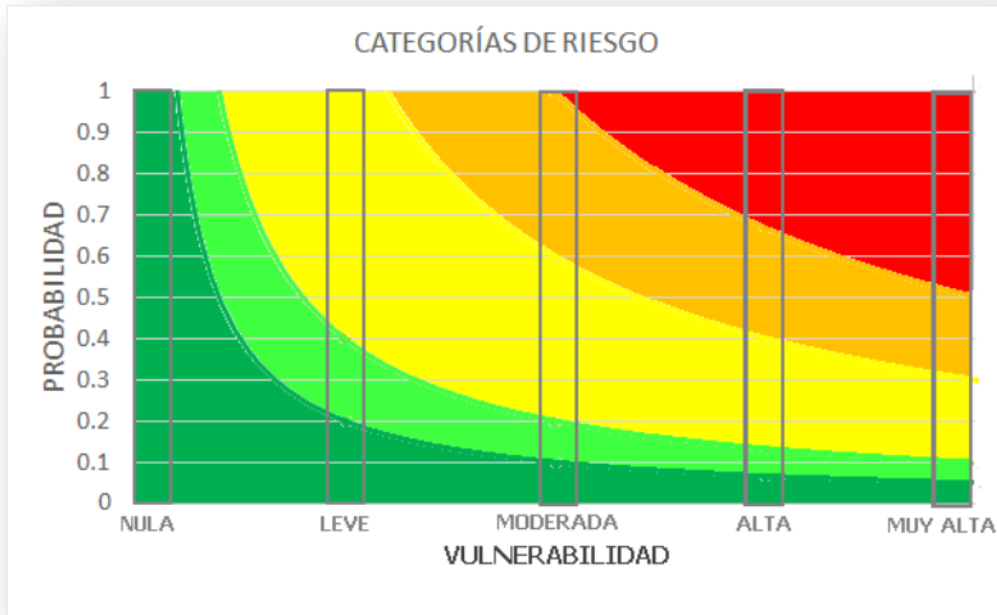


Figura 21. Combinaciones de probabilidad o frecuencia de ocurrencia (eje vertical) y vulnerabilidad (eje horizontal) que determinan las categorías de riesgo.

La Figura 22 muestra un ejemplo de mapa de riesgo de déficit hídrico para el maíz (agricultura familiar). En la escala se pueden ver las categorías de riesgo asignadas según frecuencia de ocurrencia y vulnerabilidad. Para el caso del maíz, la vulnerabilidad a déficit es muy alta. No obstante, la probabilidad de déficit en el sur y este de la RO es muy baja, por lo que el riesgo resulta muy bajo.

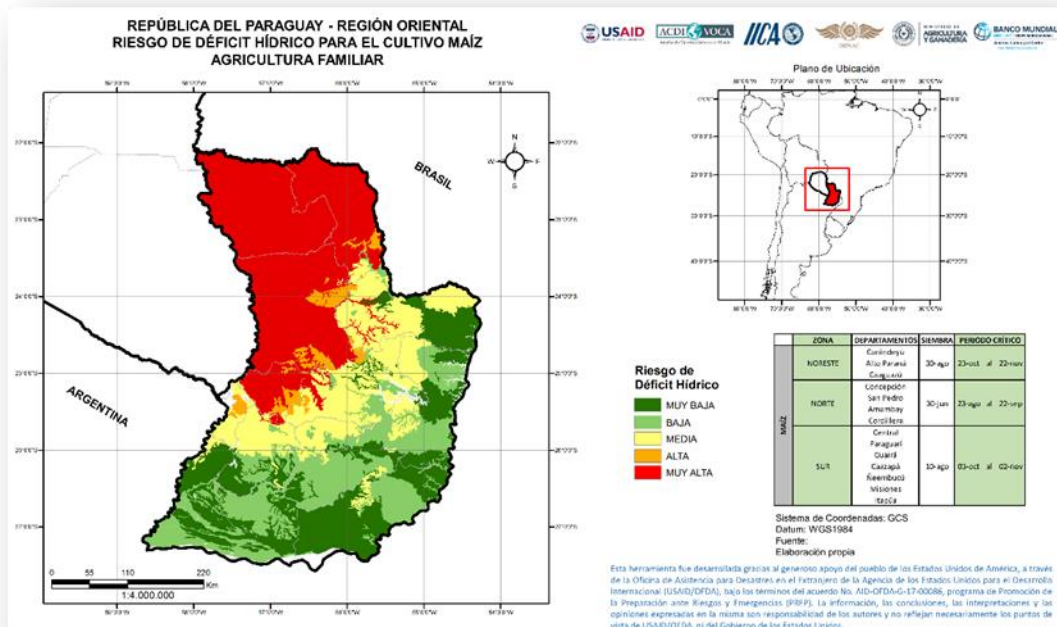


Figura 22. Mapa de riesgo de déficit hídrico para el maíz (agricultura familiar).

A continuación, en la Figura 23 se puede observar el mapa de riesgo de excesos hídricos generado para el cultivo de maíz (Agricultura Familiar - AF).

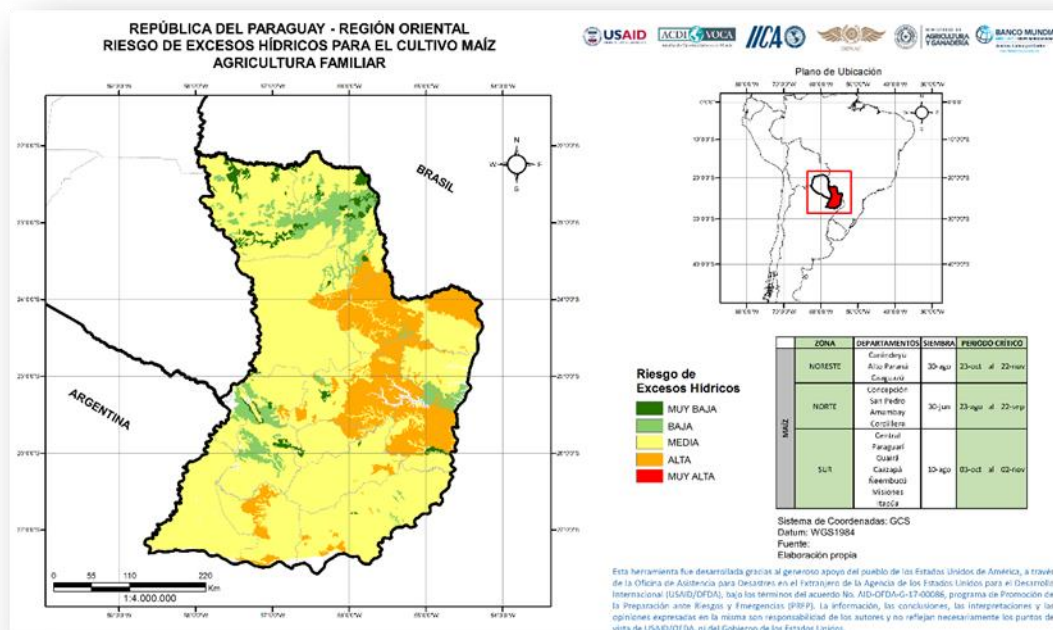


Figura 23. Mapa de riesgo de excesos hídricos para el maíz (agricultura familiar).

La metodología aplicada permitió utilizar los resultados de contenido de agua en el suelo y permanencia de excesos calculados por el BAHg para la estimación de la probabilidad de déficit hídrico, sequía (déficit hídrico extremo) y excesos hídricos en las etapas más vulnerables de cada cultivo, referidas al calendario asignado a cada zona homogénea, según etapa fenológica. Estos resultados permiten identificar en cada unidad de suelo la frecuencia en que cada cultivo se ven expuestos a estos fenómenos, según el calendario agrícola considerado.

A su vez, esta probabilidad de ocurrencia se combinó con la vulnerabilidad del cultivo al fenómeno considerado, dando como resultado niveles de riesgo que se pueden asociar directamente a pérdidas probables. Sin dudas, este sería el próximo paso a realizar, es decir, la vinculación del riesgo con el resultado productivo, ya que no pudo ser abordado en los tiempos previstos para esta asistencia técnica.

3.2 Extremos térmicos

Para el periodo crítico de cada cultivo se calculó la probabilidad de helada como “campañas con helada / campañas totales”. Luego el riesgo asociado se calculó multiplicando esta probabilidad por la vulnerabilidad del cultivo (Cuadro 15).

Se desarrolló una BDD con el porcentaje de área afectada por helada agronómica por cada departamento de la Región Oriental, para los meses de mayo a setiembre de los años 2002 a 2017.

Cuadro 15. Periodos críticos definidos para helada por cultivo.

CULTIVO	PERIODO CRÍTICO - HELADAS		VULNERABILIDAD
	INICIO	FIN	
MAÍZ	Floración plena	Inicio de llenado de granos	Leve
MANDIOCA	Plantación	Enraizamiento	Leve
POROTO	Emergencia	30 días después de emergencia	Alta
SOJA	Emergencia	20 días después de emergencia	Alta
ALGODÓN	Siembra	Emergencia	Muy alta

Obs.: Sésamo: vulnerabilidad nula.

En la Figura 24 se observa un resumen de los resultados hallados en los que se conservaron sólo las columnas en que las heladas fueron generalizadas, es decir, donde al menos 8 de los 15 departamentos mostraron más del 50% del área afectada por heladas (en verde). La última columna corresponde al mayor porcentaje de afectación mensual en el periodo 2002-2017. Asunción siendo la capital del país muestra menor afectación en área, seguramente debido a la isla de calor urbana. Los departamentos centrales (Caaguazú, Guairá y Caazapá) muestran afectaciones máximas de más del 90% del área.

DEPARTAMENTOS REGIÓN ORIENTAL	jul-03	ago-06	sep-06	may-07	jul-07	jun-08	jul-09	jun-11	jul-13	jun-16	MAX 2002-2017
AMAMBAY	5.29	7.06	16.38	38.43	20.59	49.10	2.36	26.93	64.57	39.04	64.57
ALTO PARANA	67.22	74.92	70.02	83.84	85.26	89.48	58.33	81.39	82.32	84.94	89.48
ASUNCION	0.00	0.00	0.00	0.00	5.24	11.22	1.50	5.24	0.00	5.24	19.45
CENTRAL	46.31	39.71	29.03	2.27	12.65	52.67	42.95	24.98	45.34	55.21	55.21
CORDILLERA	60.86	32.19	46.56	16.00	60.96	61.76	51.31	73.72	55.42	47.78	73.72
MISIONES	65.26	76.22	76.58	52.62	65.97	83.88	63.46	52.57	54.75	86.28	86.28
NEEMBUCU	58.92	44.32	52.36	5.26	15.64	81.57	64.70	14.66	6.07	39.60	81.57
PARAGUARI	74.18	61.66	70.75	51.25	50.37	75.18	80.82	68.21	53.98	88.31	88.31
CANINDEYU	41.85	53.24	57.66	72.01	68.29	86.33	17.82	51.31	79.09	64.08	86.33
CAAGUAZU	74.03	64.80	54.31	82.56	88.06	87.87	84.08	90.65	82.18	81.38	90.65
GUAIRA	68.39	63.60	36.10	88.41	88.15	82.34	97.43	83.81	75.93	83.67	97.43
CAAZAPA	69.14	86.89	63.14	84.25	88.46	94.06	90.28	88.62	87.06	91.95	94.06
ITAPUA	72.11	79.07	62.67	84.32	84.92	82.27	86.87	81.63	84.83	86.40	88.13
SAN PEDRO	26.92	10.19	14.67	35.07	77.95	46.27	47.31	85.45	49.15	23.12	85.45
CONCEPCION	1.16	0.82	1.50	10.03	32.16	19.27	3.31	35.16	21.83	6.98	35.16

Figura 24. Resumen de heladas Región Oriental.

Se dividió el total de meses del periodo analizado en tres subperiodos, 2002-2006 (5 años, 25 meses), 2007-2011 (5 años, 25 meses) y 2012-2017 (6 años, 30 meses). En cada subperiodo y por departamento, se contabilizó el porcentaje de meses en los cuales la afectación por heladas fue de más del 50%. En los departamentos del este (Canindeyú y Alto Paraná), del centro (Caaguazú, Guairá, Caazapá) y del sur (Ñeembucú, Misiones y Itapúa) el porcentaje de meses con más de 50% de área afectada por heladas en el periodo más resulta mucho menor que en los anteriores (Cuadro 16). Al final del cuadro se contabilizó el porcentaje de meses con heladas generalizadas, es decir, en que 8 departamentos o más mostraran un área de afectación de más del 50%. En ese caso se ve en el último periodo una disminución con respecto a los dos periodos anteriores.

Cuadro 16. Porcentaje de meses con afectación por heladas mayor al 50%.

DEPARTAMENTOS REGIÓN ORIENTAL	CANTIDAD DE MESES CON ÁREA AFECTADA POR HELADA > 50%		
	2002-2006 (5 años)	2007-2011 (5 años)	2012-2017 (6 años)
AMAMBAY	0%	0%	3%
ALTO PARANA	20%	28%	10%
ASUNCION	0%	0%	0%
CENTRAL	0%	4%	3%
CORDILLERA	4%	16%	7%
MISIONES	32%	28%	17%
NEEMBUCU	8%	12%	3%
PARAGUARI	12%	24%	13%
CANINDEYU	16%	16%	7%
CAAGUAZU	20%	28%	10%
GUAIRA	20%	28%	13%
CAAZAPA	24%	28%	13%
ITAPUA	32%	28%	13%
SAN PEDRO	0%	8%	0%
CONCEPCION	0%	0%	0%
Heladas generalizadas	12%	20%	7%

La relación entre la ocurrencia de heladas y las pérdidas productivas en **mandioca** y **maíz** serán difíciles de evaluar utilizando datos tan agregados como los de las series de rendimientos del MAG, ya que la vulnerabilidad de estos cultivos a heladas es leve. Para **sésamo**, la vulnerabilidad a helada se considera directamente nula.

En el caso de la **soja**, la vulnerabilidad es alta, pero incluso en los departamentos del sur del país (Misiones e Itapúa) el periodo vulnerable comienza el 20 de setiembre, muy al final del periodo de heladas. Sólo en setiembre de 2006 se registraron heladas generalizadas. En la campaña 2006-2007 no se registraron apartamientos negativos en los rendimientos porcentuales, con excepción de Alto Paraná (-10%). En ese departamento el área afectada por heladas en setiembre fue del 70% (Ver Cuadro 16).

También para **poroto** la vulnerabilidad a heladas es alta y el periodo de probable afectación es agosto-setiembre. En estos meses del año 2006 se registraron heladas que afectaron en más del 70% del área a los departamentos de Alto Paraná, Paraguarí, Caazapá, Misiones e Itapúa. Sin embargo, en los rendimientos del MAG de la campaña de poroto 2006-2007 no se observan resultados negativos.

Para el **algodón** la vulnerabilidad se considera muy alta y el periodo más crítico comienza el 15 de setiembre en los departamentos del norte (Concepción, San Pedro y Caaguazú) mientras que en el resto se ubica entre octubre y noviembre (fuera del periodo probable de heladas). En setiembre de 2006 en Caaguazú se estimó un 54% de área afectada por heladas, mientras que el rendimiento estimado por el MAG para la campaña 2006-2007 fue positivo en todos los departamentos de la Región Oriental.

Finalmente, se obtuvieron mapas de probabilidad y riesgo de heladas para los cultivos y zonas en las que los periodos críticos abarcan total o parcialmente los meses en que es posible que se registren heladas en Paraguay (mayo a setiembre).

Los mapas generados corresponden a los siguientes cultivos priorizados y zonas:

- Maíz, zona norte (Canindeyú, San Pedro, Concepción y Amambay)
- Maíz zafriña, zona noreste (Caaguazú, Canindeyú y Alto Paraná)
- Mandioca, toda la Región Oriental
- Poroto, zonas tempranas (Canindeyú, Cordillera, Caaguazú, Itapúa) e intermedia (Concepción, San Pedro, Guairá, Caazapá, Misiones, Alto Paraná, Canindeyú)
- Soja, zonas sureste (Itapúa, Alto Paraná, Canindeyú, San Pedro y Caazapá) y centro-norte (Amambay y Caaguazú)
- Algodón, zona norte (Concepción, San Pedro y Caaguazú)

El sésamo no se identificó como un cultivo vulnerable a bajas temperaturas, por lo cual no se identificaron periodos críticos ni se evaluó probabilidad o riesgo de heladas.

Como ejemplo, la Figura 24 muestra los resultados para mandioca en la zona norte (Concepción y San Pedro). De acuerdo a la escala, el verde oscuro representa un riesgo muy bajo, verde claro riesgo bajo, amarillo riesgo moderado, naranja riesgo alto y rojo riesgo muy alto. En el mapa puede ser observado que el riesgo de heladas tiende a concentrarse en el sudeste de la zona.

Cabe mencionar que las diferencias en el nivel de riesgo dependen de la probabilidad de helada para el periodo crítico (15 de junio al 27 de septiembre) de la zona, ya que la vulnerabilidad es constante para cada cultivo. En este caso la vulnerabilidad de la mandioca es considerada leve, y es por ello que el riesgo no ha alcanzado valores más alarmantes.

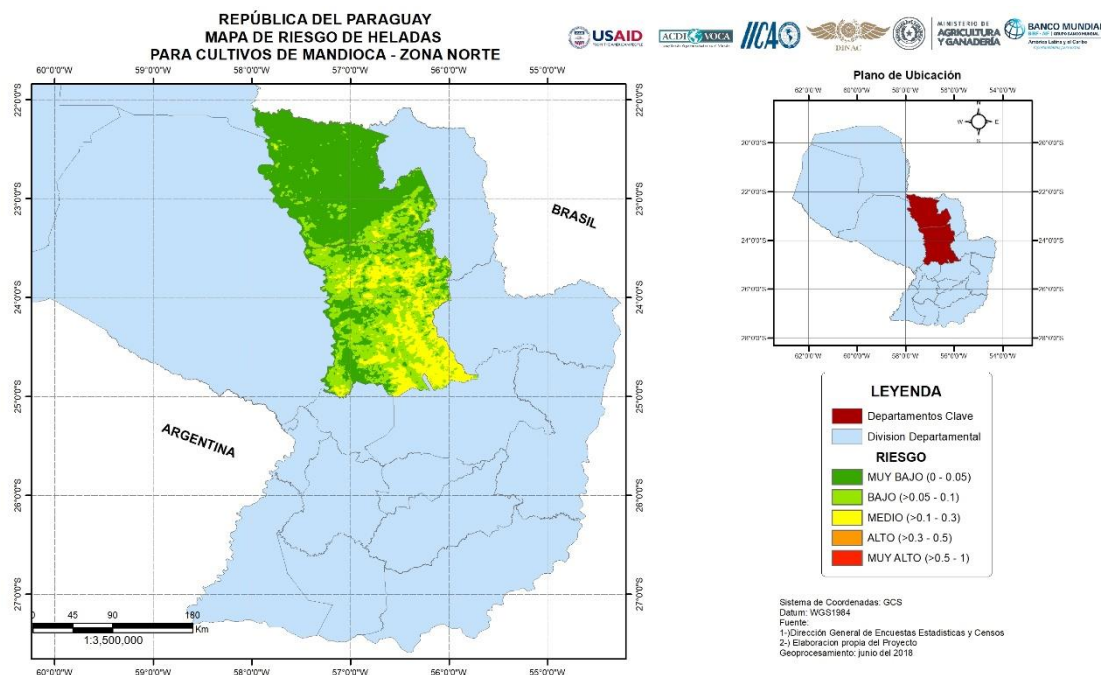


Figura 25. Mapa de riesgo de helada agronómica en el periodo crítico de la mandioca (15-JUN al 27-SET) en la zona norte. Vulnerabilidad: leve.

Si bien no se halla dentro de los cultivos priorizados, se obtuvieron mapas de riesgo para trigo, debido a su muy alta vulnerabilidad a heladas a partir de su etapa fenológica espigazón. En la Figura 25 se puede ver que en la zona sur (Itapúa, Misiones y Caazapá) el trigo presenta riesgo moderado a muy alto, dependiendo del área geográfica. En el sur del aparece una zona verde (riesgo muy bajo) que corresponde a un sitio normalmente inundado.

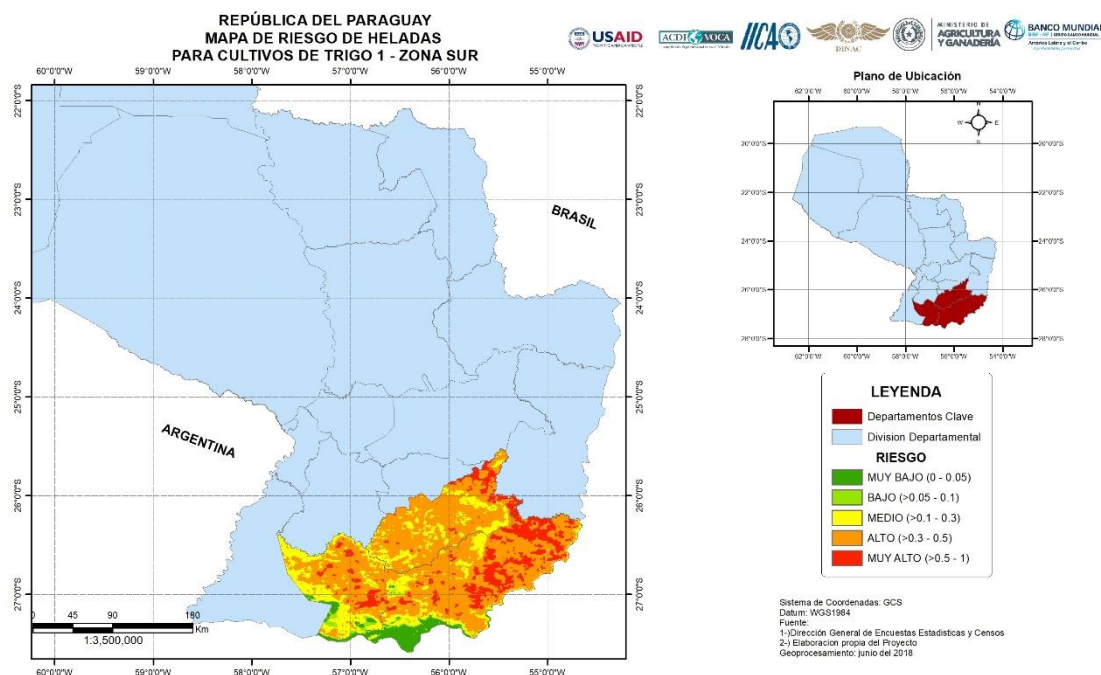


Figura 26. Mapa de riesgo de helada agronómica en el periodo crítico del trigo (25-JUL al 4-SET) en la zona norte. Vulnerabilidad: muy alta.

Como conclusión del análisis y la elaboración de la base de datos, se puede mencionar que las correlaciones halladas entre los valores de temperatura mínima medidos en estaciones meteorológicas y las estimadas en los productos MODIS Aqua-Night y Terra-Night resultaron muy significativas, con coeficiente de correlación superior a 0,9. Permitiendo así confiar en los resultados hallados en función de los productos satelitales ajustados con valores medidos en superficie.

Las limitaciones encontradas del análisis se relacionan con la presencia de nubosidad en algunas escenas, la cual determina la ausencia de dato satelital y la imposibilidad de analizar el caso. De todas formas, en la mayor parte de los eventos las temperaturas mínimas inferiores a 3°C medidas en estaciones meteorológicas coinciden con ausencia de nubosidad.

La distribución de niveles de riesgo hallados para los diferentes cultivos y zonas ha sido consistente con el régimen térmico local, teniendo en cuenta la cercanía a cuerpos de agua y diferencias de altitud.

4. Capacitación

Este apartado transversal ha sido desarrollado especialmente mediante las siguientes acciones puntuales:

Taller “El balance hídrico como herramienta para el monitoreo del agua disponible para los cultivos y la evaluación de riesgos”

El taller tuvo lugar en febrero del 2018. Participaron especialistas técnicos directamente vinculados a la gestión y administración del BHAg (UGR-MAG y DMH-DINAC). En la oportunidad se aprovechó para invitar involucrados directos y colaboradores que han apoyado a la puesta en marcha de las primeras iniciativas de un BHAg en Paraguay, como de FCA-UNA, FP-UNA, FECOPROD, DEAg-MAG y DGP-MAG. Informes y documentos de verificación sobre el trabajo de supervisión y coordinación técnica general de las actividades pueden ser observados en el Anexo del presente informe. Tuvo una duración de 8 horas reloj y contó con la participación intensiva de un total de 20 personas.



En el taller, los participantes se familiarizaron con herramientas de evaluación de riesgo de sequía y excesos hídricos derivados de modelos de balance hídrico funcionando operativamente en países del cono sur. Además, sirvió para que los consultores involucrados en la generación del modelo de balance hídrico agrícola (bases de datos, algoritmo, productos) tomen conocimiento sobre las diferentes metodologías de cálculo y formatos de salida de productos de sistemas funcionando operativamente en diferentes países de la Región.

Presentaciones de los avances y productos preliminares

Se realizaron un total de 4 presentaciones de los avances y productos preliminares de los mapas de riesgo agroclimático y el BHAg, incluyendo análisis de los mismos en las diferentes reuniones del Grupo de Trabajo para la Gestión Integral de Riesgos Agropecuarios (liderado por UGR-MAG que aglutina a otras instituciones del sistema MAG y otros involucrados directamente como DMH, SEN, SEAM, Ministerio de Hacienda y otros). Cabe mencionar que las reuniones iniciaron en el mes de marzo y se realizan de manera periódica cada 15 días.



Taller: “Necesidades y Herramientas para Monitoreo de Sequias en el Sudoeste de la Provincia de Buenos Aires”

Se facilitó la participación de técnicos de la UGR-MAG y FCA-UNA en el Taller de “Necesidades y Herramientas para Monitoreo de Sequias en el Sudoeste de la Provincia de Buenos Aires” desarrollado del 12 al 14 de junio del corriente en la ciudad de Buenos Aires, Argentina, enmarcada en el componente Reducción de la Vulnerabilidad de las Instituciones y la Comunidad de Proyecto Aumentando la Resiliencia Climática y Mejorando el Manejo Sostenible, del Sistema de Información y Alerta Temprana en Cambio Climático y Desertificación (SIAT).

Este apoyo fue realizado con miras a fortalecer capacidades técnicas nacionales en las experiencias del grupo técnico interinstitucional argentino que propone reemplazar la “gestión de crisis” por una “gestión de riesgos”, identificando vulnerabilidades y definiendo acciones y responsabilidades con anterioridad a los desastres naturales.



En el curso fueron expuestas plataformas desarrolladas a nivel nacional, regional y mundial; así también metodologías implementadas para la determinación de Índices de Sequia con el fin de identificar impactos sobre las producciones agrícolas. Con lo observado durante el Taller, la comitiva paraguaya expuso al Grupo de Trabajo para la Gestión Integral de Riesgos Agropecuarios la posibilidad de llevar a cabo iniciativas similares a las aprendidas en la capacitación.

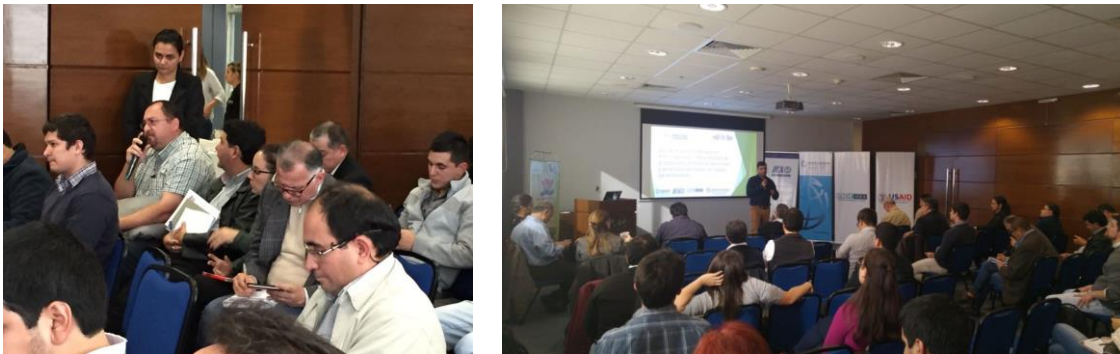
Capacitación y presentación de los resultados finales de la asistencia técnica del Banco Mundial – IICA.

El evento consistió básicamente en una presentación ejecutiva dirigida a autoridades y directores de instituciones, gremios, aseguradoras y empresas afines y se denominó: “Presentación Ejecutiva de la Herramienta Mapas de Riesgos Agroclimáticos de la Región Oriental”, la cual tuvo una duración de una hora. Seguidamente inició la capacitación denominada: “Mapas de Riesgos Agroclimáticos y Balance Hídrico Agrícola”, la cual tuvo una duración de seis horas reloj.



En la oportunidad estuvieron presentes un total de 74 personas, entre autoridades y técnicos del MAG, Ministerio de Hacienda, DMH-DINAC, VMG, VMA, SIGEST, DGP, UGR, DEAg, DEA, SENACSA, SENAIVE, ARP, FECOPROD, Aseguradora Tajy, Universidad Católica, CAH, Cámara florícola del Paraguay, ACIDI/VOCA, Facultad Politécnica - UNA, Facultad de Ciencias Agrarias - UNA, OMM, Facultad de Ingeniería - UNA, DCEA, CAFAP, OFDA, FAO, SAS, SEAM, ITAIPU, Hostettler Orgánica e IPTA.

La capacitación estuvo dirigida a profesionales técnicos vinculados al uso de bases de datos hidrológicos, agronómicos, edáficos y climáticos para la toma de decisiones en los procesos de desarrollo del sector agrícola y territorial rural. Y tuvo el objetivo de dar a conocer los resultados de los Mapas de Riesgo Agroclimáticos generados y la Interfaz operativa del Balance Hídrico Agrícola.



Los directivos de las instituciones solicitaron al IICA replicar la capacitación hacia los técnicos de sus instituciones; así como crear alianzas para acrecentar la herramienta y vincularla a sus Planes Operativos Anuales y metodología para la toma de decisiones.

Conclusiones Generales

Las herramientas desarrolladas darán un importante argumento técnico para la toma de decisiones en lo que respecta a decisiones clave en el monitoreo del desempeño de la agricultura, la cual tiene repercusiones directas en la economía del país.

Mitigar el riesgo (frecuencia y severidad) de los eventos extremos que afectan negativamente al sector agrícola y aumentar la resiliencia del país ante los mismos, a través de mecanismos de respuesta a los riesgos mejorados, incluyendo el uso de instrumentos de financiamiento de riesgo; se desarrollará con mayor certidumbre mediante el uso de los productos desarrollados en este trabajo.

Si bien, la reducción de la vulnerabilidad del sector agrícola ante los eventos extremos y las diferentes crisis sistémicas, precisa la definición de una estrategia integrada de gestión del riesgo agrícola con un enfoque particular en los agricultores más vulnerables que tienden a ser los más afectados por los choques. Productos como el Balance Hídrico Agrícola, el análisis de las pérdidas de rendimientos asociados a los eventos extremos y los mapas de riesgos agroclimático, representan un primer paso hacia la operatividad y el funcionamiento de un sistema de gestión integral de riesgos agropecuarios; puesto que permiten:

- 1. Dar mayor certidumbre al sector agropecuario, proveyendo información confiable y a tiempo para el manejo de riesgos agrarios y la toma de decisiones por los productores y por las autoridades del sector,*
- 2. Contribuir sustancialmente para una mejor precisión de los subsidios al sector, al estimar, por ejemplo, el potencial de pérdidas de cultivos ante ciertos eventos climáticos, y pudiendo determinar compensaciones,*
- 3. Complementar a otras herramientas e instrumentos de gestión de riegos y de inclusión financiera como: seguros agrícolas, crédito agrícola, garantías solidarias, entre otras,*
- 4. Mejorar la planificación territorial y los servicios técnicos,*
- 5. Incorporar a las políticas, estrategias y proyectos de innovación agrícola, forestal y social.*
- 6. Vincular a iniciativas de Sistemas de Alertas Tempranas*

Aun así, un aprovechamiento eficiente de los productos desarrollados en el presente trabajo, solamente será posible mediante la articulación interinstitucional. Puesto que el desarrollo y la administración de estos tipos de herramientas complejas para afrontar desafíos nacionales y globales; solamente será posible con la acción conjunta.

Entre los desafíos que se vienen a partir del desarrollo de los productos logrados, se destacan:

- 1. Mejorar el equipamiento para la captura, difusión y usos de información. Puntualmente, ampliar la cobertura en cantidad y espacio territorial de estaciones agro-meteorológicas y pluviómetros para disponer de datos agro meteorológicos de mayor representatividad y precisión territorial.*
- 2. Apoyar al desarrollo de la institucionalidad y capacidades del personal del MAG (tanto dependencias como entidades autárquicas), DINAC, SEAM, SEN y otros vinculados.*

3. Desarrollo de servicios en función del potencial productivo de los territorios y sus amenazas y vulnerabilidades, asistencia técnica, por ejemplo.

4. Unificación de las herramientas desarrolladas con el Registro Nacional de Beneficiarios (RENABE) y con el Registro Actualizado de la Agricultura Familiar (RAFA) del MAG. Y el Censo Agropecuario 2018 podría ser una buena oportunidad por aprovechar.

5. Plataforma especializada en información para el manejo de riesgos del sector agrario, mejoramiento de comercio e inclusión e inserción comercial del pequeño agricultor y la agricultura familiar.

6. Realizar el cálculo del BHAg, contemplando diferentes variaciones como por ejemplo la fecha de siembra (antes o después de la fecha tradicional).

7. Generación de escenarios, a partir de los pronósticos estacionales (trimensuales) desarrollados por la Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH-DINAC).

8. Realizar el cálculo del BHAg considerando escenarios de cambio climático y escenarios de trayectorias de concentración representativas (RCP's).

9. Vinculación de los resultados del BHAg y los mapas de riesgos agroclimáticos con un análisis econométrico para cada uno de los posibles escenarios.

10. Potenciar los servicios de dependencias especializadas del MAG, en este caso particular de la Unidad de Gestión del Riesgo-UGR.

Las herramientas desarrolladas que pasarán a conformar parte vital del Sistema de información agroclimática, representan una fuente de información confiable sobre importantes riesgos que padece la agricultura paraguaya. Serán fundamentales para los procesos inteligentes de toma de decisiones por parte de los diversos interesados (productores, gobierno, aseguradoras, etc) y servirán de insumo para la creación de sistemas sólidos de información de riesgos, como requisito previo para cualquier estrategia integrada de gestión de riesgos agrícolas.

De ahora en más, la articulación interinstitucional entre el gobierno asociado con el sector privado y la cooperación internacional, continuarán trabajando para seguir enriqueciendo los productos del Sistema de información Agroclimática generada y puesta en marcha desde junio del 2018.

Referencias Bibliográficas

Almada, I. 2011. "Sonora. Historia breve". El Colegio de México Fondo de Cultura Económica, México.

Banco Mundial. 2014. Análisis de riesgo del sector agropecuario en Paraguay - Identificación, priorización, estrategia y plan de acción. Washington, DC: World Bank

FAO. 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO irrigation and drainage paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.

Forte, J.; Scarpati, O.; Spescha L.; Capriolo, A. 2007. Drought risk in the pampean region using soil water storage analysis. Environmental change and rational water use. ISBN 978-987-9260-46-3. P.146-168. 458 páginas. Orientación Gráfica Editora SRL. Buenos Aires.

Gumbel, E. 1958. Statistics of extremes. Columbia University Press, Nueva York (EE.UU.).

ISRIC. 2005. Soil and Terrain Database for Latin America and Caribbean (SOTERLAC). Wageningen, The Netherlands.

ISRIC. 2014. Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean (version 2.0) - scale 1:5 million (SOTERLAC). Wageningen, The Netherlands.

López, O.; González, E.; Llamas, P.; Molinas, A.; Franco, E.; García, S.; Ríos, E. 1995. Estudio de reconocimiento de suelos, capacidad de uso de la tierra y propuesta de ordenamiento territorial preliminar de la Región Oriental del Paraguay (PRUT). Asunción, PY: MAG/SRNMA/BM/PRUT. v.1, 197 p.

MAG. 2013. Marco Estratégico Agrario 2009-2018. DIRECTRICES BASICAS. Actualizado para el periodo 2014-2018. Asunción, Paraguay.

Noilan J.; Lacarrere, P. 1995. GCM grid-scale evaporation from mesoscale modelling. J. Climate, 8, 206-223.

Sumner, M. 2000. Handbook of Soil Science. New York, N.Y: CRC Press. Topp, G.C., J.L. Davis, and A.P. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. Water Resour. Res. 16 (3): 574-582.

USDA. 1993. Soil Survey Manual (SCS-USDA)

TRAGSA. 1998. Restauración hidrológica forestal de cuencas y control de la erosión. Madrid: Dirección F. López Cadenas, Tragsatec, Ministerio del Medio Ambiente, Mundi-Prensa, pp. 89.

Thomas, G.; Henderson-Sellers, A. 1991. An evaluation of proposed representations of subgrid hydrologic processes in climate models. Journal of Climate, Vol. 4, 898-910.

Warrilow, D.; Sangster, A.; Silingo, A. 1986. Modelling of land-surface processes and their influence on European climate. DCTN 38, Bracknell, Berkshire, 92 pp.

ANEXO 1: Conceptos básicos

A modo de clarificar el punto de vista desde el que se ha encarado la elaboración y sistematización de la información de riesgo agroclimático en este trabajo, se describen brevemente algunos conceptos básicos asumidos:

Riesgo. Según el Glosario de Términos del IPCC, aplicada al caso particular del riesgo agroclimático; el riesgo es la probabilidad de que ocurra un daño o pérdida de carácter económico, social o ambiental sobre un elemento dado (personas, elementos materiales o ambientales) en un determinado sitio y período de tiempo definido. El mismo se determina mediante la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas. Es decir, los factores que lo componen son la amenaza y la vulnerabilidad.

Amenaza. Es el fenómeno, actividad humana o condición peligrosa que puede ocasionar daños y se determina en función de la intensidad que pueda alcanzar y la frecuencia con que se produce. Los peligros naturales más comunes que afectan a la producción agropecuaria son los asociados a eventos climáticos como sequía, inundaciones, olas de calor, granizos, heladas, entre otros. Éstos se caracterizan de acuerdo a su frecuencia, duración e intensidad.

Vulnerabilidad. Se define como el grado de susceptibilidad de sufrir daños por la ocurrencia de un fenómeno adverso. Es la medida en que un sistema es capaz de afrontar los efectos negativos de cada amenaza climática particular, incluyendo la variabilidad climática y los fenómenos extremos, dada por las características y las circunstancias del sistema que lo hacen más o menos susceptible a los efectos dañinos de esa amenaza.

Así, la vulnerabilidad es una característica intrínseca de una población, ocurran o no los eventos, por lo que la estimación de la misma es por lo general indirecta: aumenta con el nivel de exposición de un sistema y su sensibilidad, y disminuye con su capacidad de adaptación o resiliencia.

Mapas de Riesgos Agroclimáticos. 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). A este enfoque integrador de distintos componentes del riesgo, se lo llama en este trabajo: análisis multicriterio.

Básicamente, los mapas de riesgo 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).

ANEXO 2: Uso de datos de estaciones meteorológicas en el algoritmo de balance hídrico por unidad de suelo

Metodología para la obtención de estaciones cercanas

Con el listado de estaciones próximas a la ubicación de la estación analizada, ordenadas por distancia (las más cercanas primero), se considera un rango máximo de alcance de 200 Km. Se verifica que existan los datos requeridos (de la variable analizada) para utilizarlos. La programación contempla que para el caso de que no existiera dato en la estación analizada, se recurre a la siguiente en proximidad de distancia al punto actual y se verifica la existencia del dato en la misma. Este proceso se repite hasta encontrar el dato o completar la lista de estaciones cercanas. Y en caso de que ninguna estación cercana tenga el dato solicitado, se considera como dato nulo.

Metodología para el cálculo de temperatura máxima (Tx)

Máxima: Se verifica si existen datos de la estación analizada, de ser así se saca el máximo valor. En caso de que no haya datos, se recurre a la estación más cercana y se rellena el faltante con el dato de la misma. Si no se cuenta con ninguna estación cercana con datos, se completa este valor con el promedio mensual histórico.

Metodología para el cálculo de temperatura mínima (Tm)

Se verifica si existen datos de la estación, de ser así se saca el mínimo valor. En caso de que no haya datos, se recurre a la estación más cercana y se rellena el faltante con el dato de la misma. Si no se cuenta con ninguna estación cercana con datos, se completa este valor con el promedio mensual histórico.

Metodología para el cálculo de temperatura de rocío (Td)

Se intenta completar esta variable solamente si no se cuenta con el dato de Humedad Relativa. Se verifica si existen datos de la estación, de ser así se saca el valor promedio. En caso de que no haya datos de la estación automática contigua, se recurre a la estación más cercana y se rellena el faltante con el dato de la misma. Si no se cuenta con ninguna estación cercana con datos se deja el dato en nulo.

Metodología para el cálculo de humedad relativa (HR)

Se intenta completar esta variable solamente si no se cuenta con el dato de Punto de Rocío. Se verifica si existen datos de la estación automática contigua, de ser así se saca el valor promedio del conjunto. En caso de que no haya datos, se recurre a la estación más cercana y se rellena el faltante con el dato de la misma. Si no se cuenta con ninguna estación cercana con datos se deja el dato en nulo.

Metodología para el cálculo de precipitación (PP)

Se verifica si existen datos de la estación, de ser así se saca el valor. Esta tarea se realiza para todas las estaciones que no tengan dato de precipitación en la fecha de estudio. Las que no se pudieron completar, seguirán con valor nulo.

Luego del paso anterior, si se tienen aún valores nulos, se corre una interpolación para rellenar los datos de las estaciones con precipitación nula en la fecha de estudio (la interpolación rellena más de una estación a la vez con datos calculados en base a las estaciones que sí tienen valores para la fecha).

Metodología para el cálculo de la velocidad media del viento (VV)

Se verifica si existen datos de la estación, de ser así se saca el valor. En caso de que no haya datos se completa este valor con el promedio mensual histórico.

Metodología para completar datos faltantes

EMC: Estación meteorológica convencional (sólo DMH por ahora)

EMA contigua: Estación meteorológica automática en el mismo jardín meteorológico de la EMC

EMC cercana: EMC más cercana, considerando las ubicadas en un radio de hasta 200km

Promedio mensual: Determinado con datos históricos disponibles 1986-2016

Registrada en EMC	Registrada en EMA contigua	Registrada en EMC cercana	Interpolación	Promedio mensual	Valor constante	Queda sin dato estimado	Comentarios
Tx	Tx_EMA_00Z	Tx_EMC		Tx_media			
Tm	Tm_EMA_12Z	Tm_EMC		Tm_media			
Td	Td_EMA_00Z	Td_EMC				X	Sólo se estima si no hay HR
HR	HR_EMA_00Z	Td_EMC				X	Sólo se estima si no hay Td
HEL						X	
NUB						X	Sólo se usa si no hay HEL
VV	HR_EMA_00Z			VV_media	0.5 km/h		
PP	PP_EMA_12Z		Kriging Ordinario				

Metodología de cálculo de la evapotranspiración potencial

Método: PENMAN-FAO

VARIABLES NECESARIAS: Tx, Tm, HR ó Td, HEL ó NUB, VV

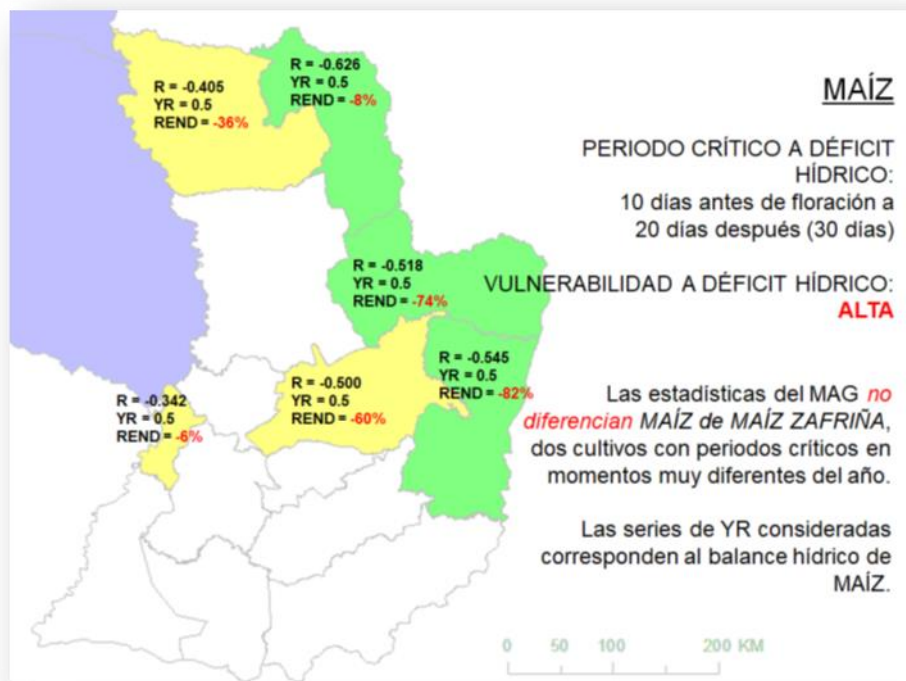
En los días en que queden sin estimar Td/HR ó HEL/NUB, se utiliza el promedio mensual de ETo (mm/día), calculada considerando todos los años disponibles en la serie histórica.

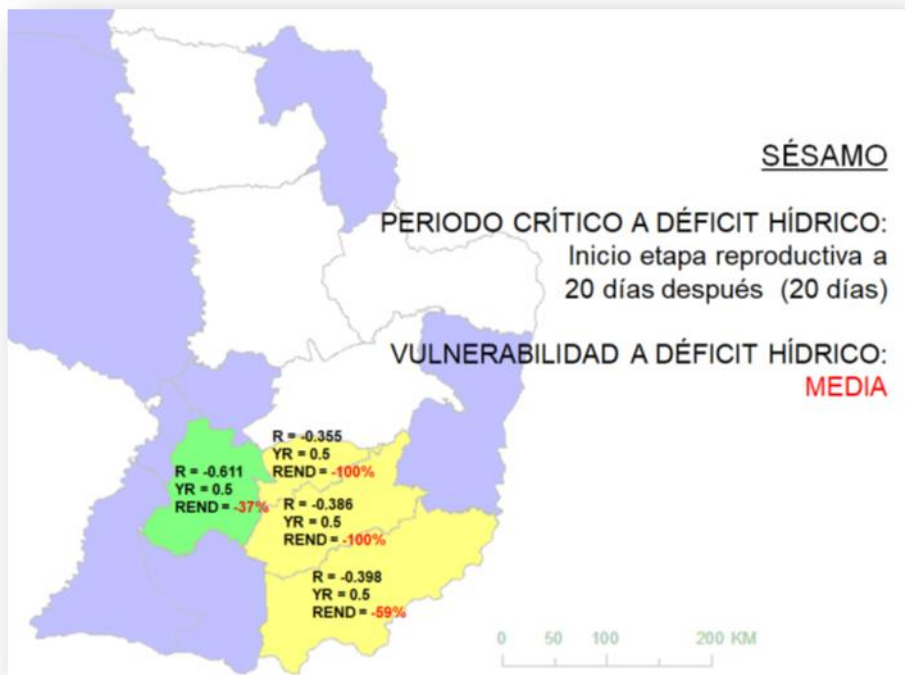
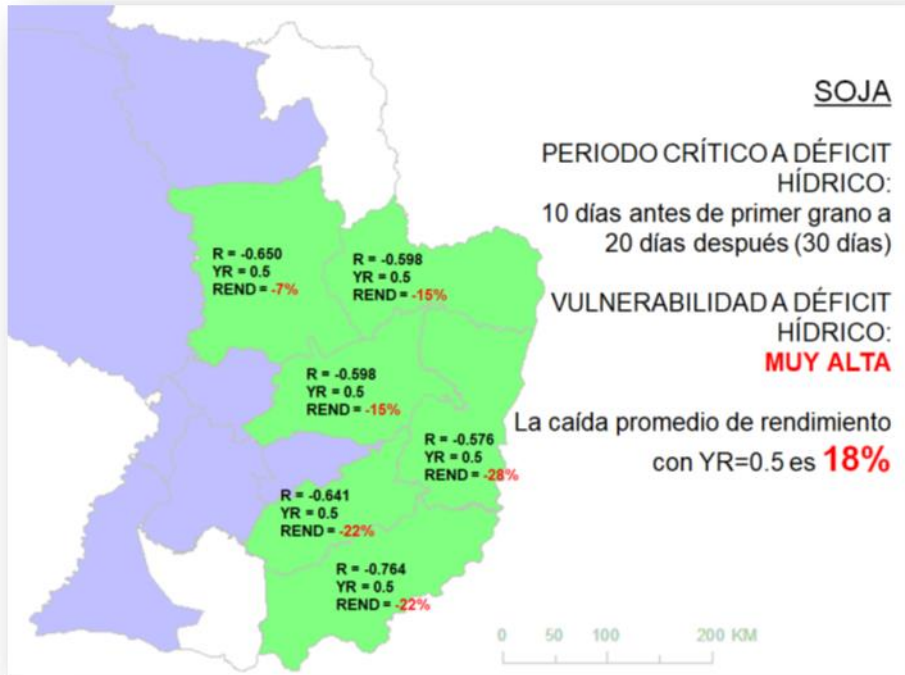
ANEXO 3: Evaluación del índice YR como estimador de caídas de rendimientos

A partir del balance hídrico se calculó el índice YR para cada cultivo y campaña. Estos valores se compararon con los apartamientos porcentuales de los rendimientos departamentales.

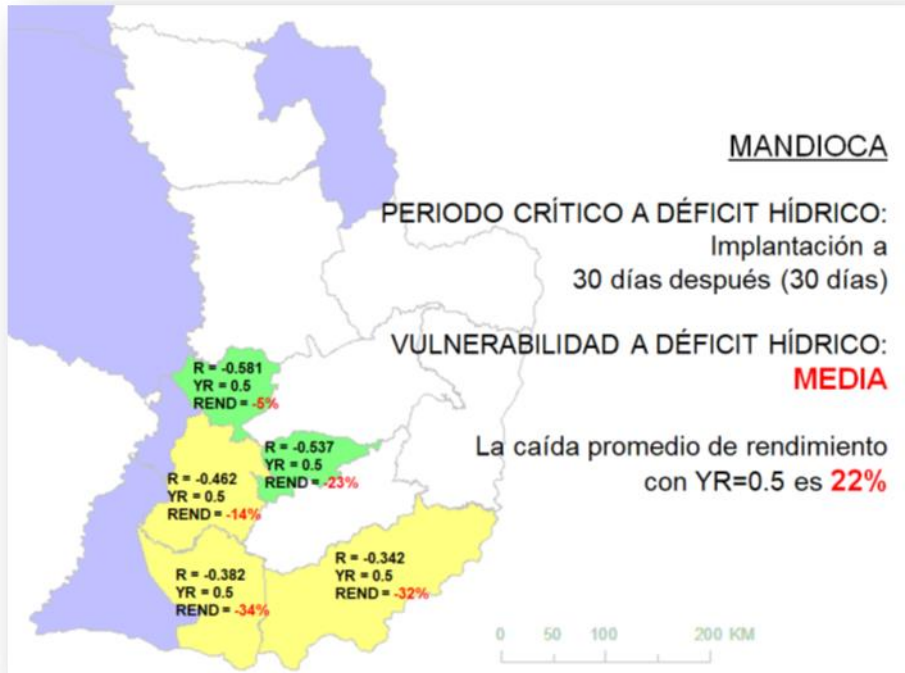
En los mapas se colorean los departamentos según el coeficiente de correlación (R) hallado:

- $R < -0.5$
 - $-0.5 < R \leq -0.3$
 - No se evaluó el departamento
- En blanco, cuando la correlación es muy baja









ANEXO 4: Determinación de índices de déficit hídrico y sequía

Agua fácilmente aprovechable (AFA)

A pesar de que en teoría existe agua disponible hasta alcanzar el punto de marchitez permanente, la cantidad de agua extraída por el cultivo se reducirá significativamente antes de alcanzar el punto de marchitez permanente. Cuando el suelo contiene suficiente humedad, el mismo es capaz de suministrar el agua con suficiente velocidad para satisfacer la demanda atmosférica al cultivo, por lo que la extracción del agua será igual a la ETc. A medida que disminuya la cantidad de humedad en el suelo, el agua será retenida más fuertemente a la matriz del suelo y será más difícil de extraer.

Cuando el contenido de humedad del suelo esté por debajo de cierto valor umbral, el agua del suelo no podrá ser transportada hacia las raíces con la velocidad suficiente para satisfacer la demanda transpiratoria y el cultivo comenzará a sufrir de estrés. La fracción de ADT que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin experimentar estrés hídrico es denominada agua fácilmente aprovechable en el suelo:

$$AFA = P * ADT$$

donde AFA agua fácilmente aprovechable (extraíble) de la zona radicular del suelo [mm], p fracción promedio del total de agua disponible en el suelo (ADT) que puede ser agotada de la zona radicular antes de presentarse estrés hídrico (reducción de la ETc) [0 - 1] y ADT agua disponible total o agua útil máxima (CC-PMP).

El factor P varía normalmente entre 0,30 para plantas de raíces poco profundas, a tasas altas de ETc (> 8 mm/d), hasta 0,70 para plantas de raíces profundas y tasas bajas de ETc (< 3 mm/d). Un valor de 0,50 para p es utilizado comúnmente para una gran variedad de cultivos.

El valor de P está en función del poder evaporante de la atmósfera. Los valores de p presentados en el siguiente Cuadro serán mayores a tasas bajas de ETc que a tasas altas de ETc. Para condiciones atmosféricas cálidas y secas, donde el valor de ETc es alto, p será 10-25% menor que los valores presentados en el Cuadro 22, y el suelo se encontrará relativamente húmedo aun cuando comiencen a ocurrir situaciones de estrés. Cuando la evapotranspiración del cultivo es baja, el valor de p será hasta 20% mayor que los valores tabulados. Generalmente se utiliza un valor constante de p para cada período específico de desarrollo, en lugar de variar su valor para cada día. Una aproximación numérica para ajustar el valor de p de acuerdo a la tasa de ETc es:

$$P' = P + 0,04 (5 - ETc)$$

Donde: el valor ajustado de P' es limitado a $0,1 < p < 0,8$ y el valor de ETc es en mm/día

Rangos de profundidad máxima efectiva de las raíces (Zr) y fracción de agotamiento de la humedad en el suelo (p) para condiciones sin estrés hídrico, para cultivos comunes:

Cultivo	P Fracción de agotamiento (para ETc = 5 mm/día)
Mandioca	0.35
Poroto	0.45
Soja	0.50
Maní	0.50
Maíz	0.55
Trigo	0.55
Sésamo	0.60
Algodón	0.65
Caña de azúcar	0.65
Batata	0.65
Canola	0.60

Cálculo de umbrales y probabilidad para cada cultivo y unidad de suelo

Se calcula el agua fácilmente extraíble del día (dentro del periodo crítico) como porcentaje del agua útil máxima.

$$AFA\% = AFA/ADT = P + 0,04 (5 - ETc)$$

Donde: ETc es el valor diario que aparece en las salidas de BH

Se calcula el umbral de déficit hídrico UDH y umbral de sequía extrema USE.

$$UDH = (1 - AFA\%) / 2$$

Es la mitad del valor a partir del cual la extracción de agua comienza a asociarse con estrés.

$$USE = (1 - AFA\%) / 5$$

Es la quinta parte del valor a partir del cual la extracción de agua comienza a asociarse con estrés.

Luego se determina el promedio de agua útil disponible en los intervalos móviles dentro del periodo crítico (N días consecutivos). En la BDD agronómica se hallan las fechas de inicio y fin del periodo crítico para déficit hídrico por cultivo y departamento: DH_INI y DH_FIN. Así también, los días del intervalo móvil dentro del periodo crítico: INT_DIAS

Los intervalos a considerar dentro del periodo crítico son:

DH_INI hasta DH_INI + INT_DIAS - 1

DH_INI + 1 hasta DH_INI + INT_DIAS

DH_INI + 2 hasta DH_INI + INT_DIAS + 1

...

DH_FIN - INT_DIAS +1 hasta DH_FIN

Dentro de cada intervalo se deberá calcular el promedio de AU% (los valores diarios de AU% están en las salidas de BH): PROM_AU%.

Finalmente se calcula la probabilidad de déficit hídrico PDH y de sequía extrema PSE para cada cultivo y unidad de suelo de la siguiente forma:

a) Déficit hídrico

Si al menos en un intervalo $PROM_AU\% < PROM_UDH$ \Rightarrow Campaña con déficit: N=1

De lo contrario, N=0

Se suman los N y se calcula la probabilidad de déficit hídrico: $PDH = \sum N / 30$ años

b) Sequía extrema

Si al menos en un intervalo $PROM_AU\% < PROM_USE$ \Rightarrow Campaña con sequía: N=1

De lo contrario, N=0

Se suman los N y se calcula la probabilidad de déficit hídrico: $PSE = \sum N / 30$ años

Cálculo del riesgo de déficit hídrico RDH y de sequía extrema RSE para cada cultivo y unidad de suelo

$$RDH = VUL_NUM * PDH$$

$$RSE = VUL_NUM * PSE$$

El valor de VUL_NUM está también en la BDD agronómica, por cultivo.

VULNERABILIDAD	CÓDIGO	VALOR NUMÉRICO
MUY ALTA	MA	1
ALTA	A	0.75
MODERADA	M	0.5
LEVE	L	0.25
NULA	N	0