
Efectos del cambio climático sobre el crecimiento del maíz en Chile

Jorge Petit-Laurent jpetitlaurent@alumnos.uai.cl

September 30, 2023

Abstract

Corn is one of the most prominent crops in Chile, and it has been characterized by a sustained increase in yield over the last few years. However, this high yield has a series of threats associated with climate change, including poor hybrid selection and problems with maturity times. The present study is based on regional climate change prediction models and maize development models, with the aim of creating useful indices and signals for planting recommendations to farmers.

Keywords— Corn land use, Climate risks, Corn productive change, Growing degree models, Climate change

Resumen

El maíz es uno de los cultivos de mayor presencia en Chile, este se ha caracterizado por un sostenido aumento en el rendimiento durante los últimos años. Sin embargo, este alto rendimiento tiene una serie de amenazas asociadas al cambio climático, entre ellas la mala elección de híbridos y problemas de tiempos de maduración. El presente estudio se sustenta en modelos de predicción de cambio climático regionales y modelos de desarrollo de maíz, con el objetivo de crear índices y señales útiles para las recomendaciones de siembra a agricultores.

Antecedentes

Chile ha presentado una constante mejoría en su seguridad alimentaria, siendo el mejor calificado de América latina y el Caribe, siendo catalogado durante la última década como un país con alta seguridad alimentaria, sin embargo, sin embargo esta alta calificación, producto de una buena regulación y salubridad en los alimentos, puede disfrazar una falencia en la accesibilidad de los alimentos en Chile. Si bien, Chile cuenta con una posición general 25, respecto a los 113

países partes del índice, en el apartado de accesibilidad a los alimentos, tiene la posición relativa de 42 sobre 113 países, siendo esta la peor evaluada de las 4 variables a estudio. (Food Security Index 2022 —1)

Para poder potenciar y proteger nuestra seguridad alimentaria, especialmente para mejorar en el ámbito de accesibilidad, es importante potenciar y resguardar la producción nacional de alimentos, que puedan garantizar precios estables y accesibles. Es en este contexto que se realiza el mayor estudio del impacto del cambio climático sobre las diversas áreas productivas en Chile, entre ellas la agricultura, siendo una de las áreas estudiadas el maíz.

existe una alta probabilidad de que los cultivos anuales (Especialmente el maíz y trigo) se vean afectados negativamente por los cambios de temperatura y cambios de precipitaciones, a tal punto de amenazar la seguridad alimentaria de diversos países (CAMBIO CLIMÁTICO Y PRODUCCIÓN DE CULTIVOS ANUALES ESENCIALES. UNA MIRADA DESDE LA SEGURIDAD ALIMENTARIA EN CHILE).

El maíz choclero es el segundo cultivo de más alta producción en Chile, solo después del trigo, además, es este el cultivo con un mayor rendimiento de materia seca por unidad de área en Chile [1]. Históricamente, se ha destacado la adaptabilidad del maíz gracias a su alto espectro de índices de preciosidad (FAO), sin embargo, el sostenido aumento de la temperatura provoca una situación en la que cada vez más lugares ven pérdidas de productividad dado la no existencia de maíces conste un índice FAO lo suficientemente alto [2]. Si bien esta situación puede verse atenuada por la eventual aparición de híbridos con mayor resistencia al calor y ciclos de maduración más largos, sigue siendo una realidad vigente la posibilidad de una disminución significativa del rendimiento del maíz en los próximos años, con estimaciones que rondan una disminución del 60% [3]

En la actualidad existe un conjunto de índices e indicadores agro-climáticos que tienen un significado estadístico o matemático, pero no tienen una relación directa con producción o riesgos en la agricultura [4]. Los agricultores en la zona mediterránea de Chile consideran que uno de los principales riesgos para la agricultura es el aumento de sequías, dejando en un segundo plano el cambio de la temperatura [5]. En este contexto, es indispensable el perfeccionamiento

de las recomendaciones de siembra a los agricultores, aportando datos que permitan fácilmente a estos dimensionar la influencia del cambio climático sobre la producción de maíz.

Dentro de las principales amenazas para el cultivo de maíz, podemos identificar dos principales riesgos, tiempos de desarrollo inapropiados para el híbrido y temperaturas cercanas al máximo letal del maíz, especialmente durante la floración

El uso de modelos que puedan identificar con precisión la velocidad de crecimiento del maíz es un factor decisivo para la recomendación de híbridos para siembra. La utilización de modelos de crecimiento que concedieren la ecofisiología de cada híbrido, tanto como el empleo de modelos climatológicos predictivos de cambio climático, son necesarios para anticipar los efectos de este sobre los índices agroclimáticos. Poder generar predicciones en la distribución espacial de las zonas óptimas de cultivo de cada híbrido nos permitirá anticipar riesgos y oportunidades para el panorama de la agricultura en Chile.

Marco teórico

Se entenderá por fecha de maduración el día en el que el 50% de las plantas se encuentren en un estado de maduración, Comprenderemos por temporada el periodo comprendido entre la fecha de siembra y maduración

Materiales y metodos

Study domain

Observational datasets

Climatology models

Se hizo uso del modelo climatológico CNRM-ALADIN, con data historica y del escenario SSP585, este producto de grilla irregular, el cual tiene una resolución espacial aproximada de 12KM y una resolución temporal horaria para la variable de temperatura superficial a dos metros de altura. Además, se hizo uso de una interpolación bilineal de CR2Met desde una grilla regular de 10KM a una irregular de aproximadamente 12KM, para la variable de temperatura máxima diaria y temperatura mínima diaria, ambas a 2 metros.

Bias Correction

Bias Correction

Sesgo frío cordillerano

Sesgo cálido en el mar

Resolución temporal de la data

Se evaluó realizar el estudio haciendo uso de data diaria, debido al menor costo computacional de la corrección de sesgo con respecto a la data horaria. Para esto fue necesario

medir el desempeño de la una estimación de la temperatura horaria realizada con funciones senoidales y t_{max} y t_{min} , donde obtuvimos los siguientes desempeños.

Elección de método de corrección Se realizó una corrección de sesgo para diversos puntos de la grilla para data diaria de temperatura máxima y mínima, haciendo uso de diversos métodos de quantile mapping, obteniendo los siguientes desempeños:

Table 1: Mean QM performance in historical period

	Historical	First	Last
Modeled	1.592	0.564	2.693
QM	1.103	0.443	1.767
DQM	1.466	0.498	2.502
QDM	1.489	0.504	2.546
UQM	1.485	0.505	2.534
SDM	1.584	0.566	2.679

Table 2: Standard deviation of QM performance in historical period

	Historical	First	Last
Modeled	0.161	0.016	0.053
QM	-0.020	0.003	-0.152
DQM	0.144	0.014	0.029
QDM	0.168	0.018	0.069
UQM	0.159	0.015	0.049
SDM	0.183	0.032	0.063

De estos, se concluyó que se realizaría para todo el grilla la corrección solo en UQM y SQM, puesto que tuvieron los mejores resultados de desempeño

Modelos de crecimiento

Dentro de los modelos de velocidad de desarrollo (GDU) más extendidos está el empleo de los modelos *lineal estándar*, *lineal*, *no lineal estándar*, *no lineal* y *ajustado*. Se realizó un análisis comparativo de las medidas de dispersión de estos tres modelos, con el objetivo de comparar su capacidad de predecir el desarrollo de cada variedad en estudio. Para esto se realizó el cálculo de GDD haciendo uso de cada uno de estos modelos y un set de datos históricos de fecha de siembra y maduración para cada híbrido.

Modelo no lineal ajustado

En primer lugar, se estudiaron los grados día de desarrollo (GDD) mediante un modelo de velocidad de crecimiento (GDU) no lineal, considerando umbrales térmicos (UT) propios de cada híbrido, obtenidos mediante un método de regresión.

Umbrales térmicos

Dado el comportamiento parabólico de la distribución de tiempo de maduración, se usó un modelo de regresión cuadrático, propuesto por Ruiz Corral, Flores, Ramirez y González [6], el cual está compuesto por los siguientes parámetros:

$$\frac{1}{M} = \beta_0 + \beta_1 T_m + \beta_2 T_m^2$$

Donde T_m es la temperatura media del periodo, M es el tiempo en días desde la siembra hasta la maduración del maíz, y β_0 , β_1 y β_2 son los parámetros de la regresión.

Con estos valores se calculó las siguientes temperaturas cardinales [6]

- Temperatura base:

$$T_b = \frac{-\beta_1 + (\beta_1^2 - 4 \cdot \beta_0 \beta_2)^{\frac{1}{2}}}{2 \cdot \beta_2}$$

- Temperatura Óptima

$$T_o = \frac{-\beta_1}{2 \cdot \beta_2}$$

- Temperatura Máxima vital:

$$T_x = \frac{\ln(2 \cdot C^{T_o} - C^{T_b})}{\ln(C)}$$

Donde \ln es el logaritmo natural y C es igual a 1.15 [6]

De lo que obtuvimos valores de umbrales térmicos expuestos en la tabla 3

Hibrido	T_b	T_o	T_u
P9911	8	30	32
P1758	10	32	35

Table 3: Umbrales térmicos obtenidos del método de regresión cuadrática

Velocidad de desarrollo

La velocidad de desarrollo determina la relación entre la temperatura superficial y el desarrollo por unidad de tiempo.

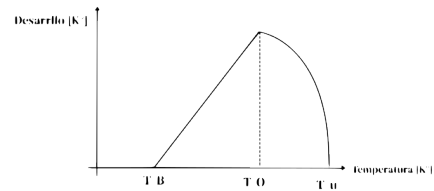


Figure 1: velocidad de desarrollo no lineal

Una vez calculadas las temperaturas cardinales, se hizo empleo del modelo de crecimiento propuesto en [7] compuesto por una recta de pendiente 1 en el tramo $[T_b, T_o]$ y un cuarto de elipse en el tramo $[T_o, T_u]$ el cual se puede observar en la figura 1.

(Temperaturas base y grados días desarrollo de 10 accesiones de maíz de México)

(Effect of Temperature on Rate of Leaf Appearance and Flowering Date in Maize)

Grados día de desarrollo

En cada uno de los modelos, se calcularon los GDD a partir de la integral de los GDU con respecto al tiempo

$$GDD = \int_{t_o}^{t_m} GDU(i) dt$$

Donde:

GDD : Grados día desarrollo

$GDU(i)$: Unidades de desarrollo

t_o : Fecha media de siembra

t_m : Fecha de media de maduración

Δt : Distancia temporal entre las observaciones

Medidas de desarrollo

(Se explica los motivos de la elección del modelo)

Entenderemos por GDD_i la cantidad de grados día de desarrollo necesarios para alcanzar la maduración con una confianza del i -ésimo %,

Índices a estudio

Para analizar el impacto real de los cambios en la climatología en la región en estudio, Definimos dos principales índices a tomar en cuenta, la fecha límite de siembra y la distancia absoluta al GDD_{50}

Fecha límite de siembra

El día límite de cosecha es esta definido por la fecha máxima en la que se puede recolectar el maíz sin que este sufra daños por heladas y/o lluvias intensas, a efectos de este estudio aremos uso de las fechas proporcionadas por las fichas técnicas de los maíces, es importante mencionar que cada híbrido tiene distintas fechas de maduración en distintas áreas del país, ya que existe tanto diversidad de climas como diversas tolerancias a los climas extremos. para la región de estudio consideraremos como fechas de siembra el 8 de abril y 20 de marzo para los híbridos p9911 y p1758, respectivamente. (ref: ficha técnica de pionner)

Fue definido el día límite de siembra como el último día de la pre-temporada en la que es posible sembrar tal que se pueda superar los GDD de maduración con una confianza del 90% antes de la llegada de la fecha límite de cosecha. Esta fecha puede ser obtenida encontrando la máxima solución a la siguiente ecuación:

$$-\int_{t_m}^S GDU(i) dt = GDD_{90}$$

donde: S : variable que representa la fecha de siembra

GDD_{90} : Desarrollo mínimo para superar la maduración con una

confianza del 90%

Índice de distancia absoluta al GDD_{50}

Si bien la fecha límite de siembra es el principal indicador para poder realizar una recomendación de siembra, Esta no permite ver de forma tan directa la evolución del desarrollo del maíz a lo largo de las temporadas, por esto se consideró necesaria la creación de un índice que mida la distancia absoluta del desarrollo objetivo y real, el cual se calculó de la siguiente manera:

$$I = \frac{\int |GDD - GDD_{50}| \cdot dA}{\int dA}$$

Resultados

Elección de híbridos

En Chile existe un amplio espectro de híbridos de grano. Para este caso en particular haremos el análisis de las dos variables más representativas de los maíces de ciclos de maduración cortos y largos, las cuales son el híbrido P9911 y P1758, respectivamente (agregar cita de pioneer aquí)

Híbrido P9911

En primer lugar, se realizó un análisis de la tendencia de la acumulación de GDD en la fecha típica de siembra y cosecha obtenida del registro de datos históricos, obteniendo la existencia de una tendencia despreciable ante el ruido 2

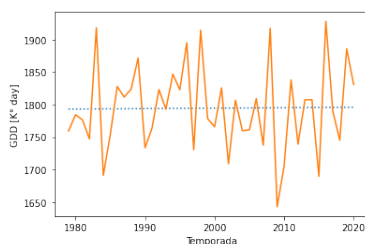


Figure 2: GDD promedio por temporada Híbrido P9911

Sin embargo, al ver la distribución espacial de esta tendencia, podemos observar una clara región de aumento. La cual se corresponde con las regiones de mayor altura, y otra región de decremento, la cual corresponde al área comprendida entre el litoral y la depresión intermedia, tal como se puede ver en la figura 3.

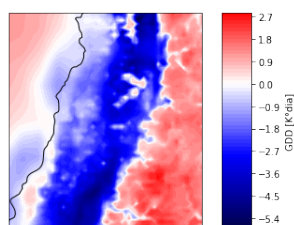


Figure 3: Tendencia del GDD real del híbrido P9911

Se observó que, para que exista una disminución en el índice de distancia absoluta al GDD óptimo, debe existir una tendencia negativa en las zonas de sobremaduración ($GDD_{50} < GDD$) y una positiva en las zonas de submaduración ($GDD < GDD_{50}$)

Pudimos observar que el comportamiento recién descrito se observa en gran parte del área de estudio, lo que se ve reflejado en la tendencia del índice, tal como se ve en la figura 5.

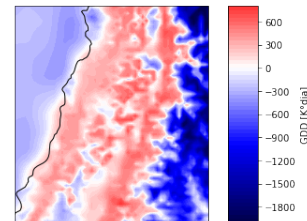


Figure 4: Diferencia entre GDD_{50} y GDD real en la temporada 2021 del híbrido P9911

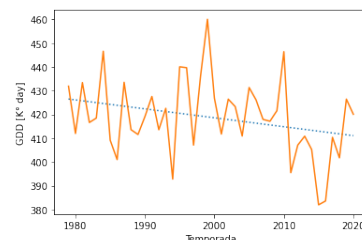


Figure 5: índice de distancia absoluta al GDD óptimo

Conclusión

En conclusión, podemos esperar una reducción en el tiempo óptimo de siembra en las áreas tradicionalmente óptimas para la siembra del maíz (especialmente en la depresión intermedia de la región de O'Higgins y las áreas más cálidas, al norte de Santiago), sin embargo, esta deterioro en los tiempos de siembra se verá contrarrestado con mejores temporadas de siembra especialmente en las zonas al sur de O'Higgins. Se pudo observar que los híbridos de menor tolerancia a las altas temperaturas presidieron una mayor disminución en las áreas de cultivo de mayores temperaturas.

Se espera que al realizar un análisis que descarte las áreas no aptas para cultivo por motivos geográficos (principalmente las cordillera de la costa), se vea un notorio aumento en la tendencia del índice de distancia al óptimo, lo que recordemos, significaría una eventual disminución en el rendimiento.

A lo largo del estudio, pudimos observar que existen diversas áreas de mejora en la forma de estimar el desarrollo de los cultivos de maíz, ya que actualmente no existen estudios que engloben las principales técnicas modernas de cálculo. El refinamiento de estos modelos es imperativo para poder seguir refinando la comprensión de las amenazas, pero también para poder identificar oportunidades, especialmente en el área sur de Chile, para la cual habitualmente no es considerada en las investigaciones, dada su baja producción de maíz de grano (pese a tener amplios cultivos de maíz forrajero).

En conclusión, se espera que la siembra del maíz para grano cambie la distribución geográfica en la que se siembra, dado la mejora en los climas fríos, y deterioro en los más cálidos. Es por esto que los siguientes pasos a seguir es la implementación de modelos predictivos climáticos, en los que se podría esperar un cambio completo del panorama de la agricultura a mediano y largo plazo. Se consideraría también incorporar más regiones de Chile, ya que afectos de este estudio, solo se analizaron los alrededores de O'Higgins, abarcando aproximadamente un 50% de la producción actual de maíz de grano, sin embargo, como mencionamos anteriormente, esta distribución tenderá a cambiar en los próximos años.

Consideraciones

Temperaturas supraóptimas y Temperatura máxima letal

(Respuesta fisiológica de genotipos de maíz (*Zea mays* L.) al estrés térmico por alta temperatura durante el periodo crítico del cultivo)

Factores a considerar en un contexto de cambio climático

Uso de modelos que no estén basados en la fecha de calendario

References

- [1] Oficina de Estudios and Políticas Agrarias. Panorama de la agricultura chilena. *Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) del Ministerio de Agricultura del Gobierno de Chile. Recuperado de*, 2019.
- [2] José Ariel Ruiz Corral, Guillermo Medina García, José Luis Ramírez Díaz, Hugo Ernesto Flores López, Gabriela Ramírez Ojeda, José Damián Manríquez Olmos, Patricia Zarazúa Villaseñor, Diego Raymundo González Eguiarte, Gabriel Díaz Padilla, and Celia de la Mora Orozco. Cambio climático y sus implicaciones en cinco zonas productoras de maíz en México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(SPE2):309–323, 2011.
- [3] José Luis Noriega-Navarrete, Raquel Salazar-Moreno, and Irineo Lorenzo López-Cruz. Revisión: modelos de crecimiento y rendimiento de maíz en escenarios de cambio climático. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(1):127–140, 2021.
- [4] Viviana Tudela, Pablo Sarricolea, Roberto Serrano-Notivoli, and Oliver Meseguer-Ruiz. A pilot study for climate risk assessment in agriculture: a climate-based index for cherry trees. *Natural Hazards*, 8 2022.
- [5] Lisandro Roco, Alejandra Engler, Boris E Bravo-Ureta, and Roberto Jara-Rojas. Farmers' perception of climate change in mediterranean Chile. *Regional environmental change*, 15(5):867–879, 2015.
- [6] José A Ruiz Corral, Hugo E Flores López, José L Ramírez Díaz, and Diego R González Eguiarte. Temperaturas cardinales y duración del ciclo de madurez del híbrido de maíz h-311 en condiciones de temporal. *Agrociencia*, 36(5):569–577, 2002.
- [7] Juan Arista-Cortes, Abel Quevedo Nolasco, Bertha Patricia Zamora Morales, Ricardo Bauer Mengelberg, Kai Sonder, and Oziel Lugo Espinosa. Temperaturas base y grados días desarrollo de 10 accesiones de maíz de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(5):1023–1033, 2018.