

INTRODUCCIÓN

Los productos de soja se encuentran entre los pocos alimentos a base de vegetales con proteínas completas con nueve aminoácidos esenciales. Por esta razón, la soja se ha convertido en una fuente importante de proteína vegetal para consumo humano y animal, con el 98% de su cultivo destinado a la alimentación animal (Goldsmith et al., 2004) y el porcentaje restante a consumo humano directo o en productos procesados.

La demanda global de soja está actualmente ligada al consumo de carne y está en constante crecimiento. La producción de soja aumentó significativamente, de 0,26 millones a casi 56 millones de hectáreas en América del Sur de 1961 a 2014, impulsado por el incremento poblacional y el aumento de la demanda de carne. El cultivo mundial de la soja está concentrado principalmente en Estados Unidos, Brasil y Argentina, con India en un distante cuarto lugar. Los tres primeros países juntos representan el 80% de la producción total y dominan las exportaciones mundiales. Se proyecta que Brasil sea la región más importante para la producción de proteína de soja, impulsada por la alta producción de granos de soja (Cerrudo, et al., 2023).

La calidad de las harinas depende básicamente de su concentración proteica. La harina de soja posee un perfil equilibrado de aminoácidos, bajo costo de producción y suministro estable. Entre las proteínas vegetales, la proteína de soja se destaca por su alta calidad y beneficios para la salud comprobados. Su calidad de proteína es comparable a la proteína de la carne, la leche o huevo y más alta que la de otras fuentes de proteína vegetal. Sin embargo, es una opción proteica más económica que las proteínas lácteas o cárnicas y con una cadena de suministro robusta y confiable, en comparación con otras proteínas vegetales.

Como fuente vegetal, la proteína de soja es una opción más sustentable en comparación con las proteínas de origen animal. Sus ventajas de sustentabilidad se han cuantificado mediante análisis del ciclo de vida, lo que demuestra una menor huella de carbono, uso de la tierra y huella energética que las proteínas cárnicas o lácteas analizadas. China es el principal impulsor de la demanda de alimentos a base de proteína de soja y está comenzando a estipular ciertos objetivos de proteínas, lo que penaliza a los comerciantes por un menor contenido de proteínas. A su vez, las empresas de alimentos

balanceados están interesadas en perfeccionar la calidad de las harinas, como puede ser la mejora de los aminoácidos y la reducción de los factores anti nutricionales.

La principal propuesta de valor de la soja en el sector de la alimentación se centra en la rentabilidad de las empresas de ingredientes alimentarios mediante la mejora de la eficiencia y la producción. Esto es relevante para concentrados de proteína de soja, donde cuanto mayor es el contenido de proteína cruda, mayor es la eficacia en el uso de agua y energía, y la reducción de la gestión de residuos. Esto apoya a las empresas de alimentos con compromisos de sustentabilidad a más largo plazo y reducción de los costos de producción.

Desde la perspectiva de la industria, a medida que los rendimientos de la soja han aumentado en los últimos 10 años, el contenido de proteína cruda ha disminuido en un 2%, debido a una combinación de genética y medio ambiente. El mejoramiento genético ha incrementado los rendimientos, pero encontraron dificultades para acompañar esa ganancia de rendimiento con un aumento o mantenimiento de la concentración de proteína en grano. El rendimiento de los granos y la concentración de aceite están correlacionados positivamente, y ambos se correlacionan negativamente con contenido de proteína (Burton, 1987; Wilson, 2004).

La composición de los granos de soja y el rendimiento están determinados por el genotipo, ambiente y prácticas de manejo. Assefa et al. (2019), estudiaron la contribución de estos factores y encontraron que el ambiente (E), definido como localidad+año, fue el factor dominante que representó más del 70% de la variación para tanto la composición como el rendimiento en grano. Estudios en la zona núcleo de Argentina muestran contenidos de proteína mayores en soja de segunda (37.6) en comparación con soja de primera (36.6) (Bosaz et al., 2019). Análisis con árboles de regresión explicaron el 38% y 48% de la variación en la concentración de proteína para soja de primera y soja de segunda, respectivamente. Las variables de manejo representaron un 73% de estas variaciones, siendo la elección de cultivar la variable más relevante (71.5 y 68.9% para soja de primera y de segunda, respectivamente) seguida por fecha de siembra (2.5%) y grupo de madurez (1.8%). Las variables ambientales representaron el restante 29% de lo explicado por los árboles de regresión. Aun así, queda por entender un 62 y 52% de variabilidad que los modelos

de machine learning usados en este trabajo no lograron concluir y entender si hay otros momentos del ciclo del cultivo importantes en la determinación de proteína. En este trabajo la temperatura y la disponibilidad de agua durante el llenado de granos (y sus interacciones) se han identificado como factores ambientales clave que explican la variación en proteína y aceite en grano.

Por su parte, Rotundo et al. (2016) estudiaron la relación temporal y espacial entre aceite y proteína. Encontraron una moderada dependencia espacial para proteína y proteína + aceite, pero no encontraron correlación espacial para aceite. A su vez, las condiciones climáticas de cada temporada modularon las respuestas para las distintas regiones, indicando que para predecir la composición del grano a nivel regional se requiere más información climática y de manejo.

La composición final de la semilla depende en última instancia de la dinámica de acumulación de esos componentes durante el llenado de granos (es decir, el momento, duración y tasa). Varios autores estudiaron la dinámica de acumulación de proteína y aceite en granos de soja (Rubel et al., 1972; Yazdi-Samadi et al., 1977; Dornbos y McDonald, 1986; Bolon et al., 2010; Poeta et al., 2014). La acumulación de proteínas en grano comienza antes que la de aceite; como resultado, las semillas jóvenes exhiben una proporción de proteína-aceite comparativamente más alta que la semilla madura. Mientras que la concentración de aceite aumenta linealmente durante el llenado de grano, la concentración de proteína aumenta temprano durante el llenado, pero luego sigue un patrón ligeramente cóncavo (hacia abajo y luego hacia arriba) durante el resto del desarrollo de la semilla. Yamagata et al. (1987) documentaron que la fracción de proteína de la semilla depende principalmente de los fotosintatos generados en la primera mitad del llenado de granos, mientras que la fracción de aceite depende del fotosintato generado durante la última mitad. La removilización de nitrógeno (N) de hojas, pecíolos y tallos representa aproximadamente 60% del N utilizado para la síntesis de proteínas; el resto proviene de la absorción de N del suelo y la fijación durante el llenado de granos (Ortiz et al., 2019; Cafaro La Menza et al., 2020). En estos trabajos se sugiere que estos patrones de deposición diferencial deben relacionarse con el momento de la temperatura y el estrés hídrico. La ubicación de las semillas en la planta también afecta los componentes de las semillas: las vainas en la parte superior de la planta tienden a tener semillas con mayor concentración de proteínas y menor concentración de aceite que las semillas en las vainas en la parte inferior de la planta.

La fijación simbiótica de nitrógeno consume de 6 a 12 gramos carbono por gramo de N fijado, que representa

aproximadamente el 20-30% de la fotosíntesis total de la planta; sin embargo, este fuerte destino de carbono no necesariamente reduce el rendimiento, porque puede modular la actividad de la fuente (fotosíntesis) (Kaschuk et al., 2009, 2010, 2012). Además de la demanda de carbono para la fijación de N y el rendimiento, la fotosíntesis tiene que suministrar los asimilados necesarios para la síntesis de lípidos y proteínas en los granos (Kaschuk et al., 2010; Penning de Vries et al., 1974).

Piper y Boote (1999) en EE. UU. y Carrera et al. (2009) en Argentina evaluaron el impacto de la temperatura sobre las concentraciones de proteínas y aceite de soja en distintas etapas reproductivas. En ambos países, un modelo cuadrático proporcionó el mejor ajuste para el aumento de la concentración de aceite (del 14% al 22%) en respuesta al aumento de temperatura. En contraste, la variación en la concentración de proteína fue mucho más modesta (del 41% al 43%). Aunque significativa, la temperatura representó una pequeña fracción (<5%) de la variación en la concentración de proteína. La concentración de proteínas aumentó sustancialmente en estudios de cámara donde se evaluaron temperaturas más altas (> 28°C) (Wolf et al., 1982; Dornbos Jr. y Mullen, 1992; Gibson y Mullen, 1996). Estas relaciones complejas evidencian la necesidad de estudiar los factores climáticos que controlan la composición de los granos de soja bajo ambientes climáticamente más contrastantes y en otras fases del ciclo productivo.

Se han informado resultados contradictorios sobre la respuesta de las concentraciones de aceite y proteína a la disponibilidad de agua durante el llenado de granos. Varios autores han informado concentraciones más bajas de proteína y aceite con un creciente déficit de agua en el suelo tanto en estudios de campo como de cámara (p. ej., Foroud et al., 1993; Specht et al., 2001; Carrera et al., 2009; Wijewardana et al., 2019), mientras que otros han informado resultados opuestos, es decir, mayores concentraciones de proteínas y menores concentraciones de aceite con una mayor limitación de agua (por ejemplo, Dornbos Jr. y Mullen, 1992; Rotundo y Westgate, 2009, 2010; Mertz-Henning et al., 2018).

También se han informado efectos interactivos del estrés hídrico y la temperatura sobre la concentración de proteínas. Por ejemplo, Carrera et al. (2009) encontraron que el impacto de la temperatura (temperatura media desde R5 a R7) sobre la concentración de proteínas no era detectable en ausencia de estrés hídrico (diferencia entre precipitaciones y ETP entre R1-R7), pero se hacía perceptible al aumentar la limitación de agua. Cuando pp-ETP R1-R7 fue inferior a 70mm, el aceite aumentó linealmente al aumentar TmR5-R7 y con el aumento del déficit hídrico. Mientras tanto, proteína aumentó

linealmente con TmR5-R7 pero disminuyó linealmente con déficit de agua. También encontraron un efecto de la radiación acumulada durante el llenado de granos y la composición del grano, pero el efecto fue menor que el de temperatura. Por otro lado, Rotundo y Westgate (2009) mostraron que existe una reducción del contenido (mg por semilla) de proteína y aceite en situaciones de stress hídrico. En estos escenarios, la proteína resulta menos afectada que el aceite y otros residuos, obteniendo en consecuencia una concentración de proteína final mayor (% de peso seco). Este trabajo muestra que en condiciones de altas temperaturas se incrementó la concentración de proteína, de igual manera que se observó para estrés hídrico. Aun así, en ninguno de los dos casos el incremento en la concentración de proteína se debe a mayor síntesis. Surge aquí la necesidad de relacionar las variables ambientales con la condición fisiológica del cultivo durante el llenado de granos para avanzar en el diseño de sistemas de cultivo que permitan alcanzar la composición de grano deseada.

Hipótesis

- 1- La concentración de proteína de granos de soja está condicionada más por factores hídricos sufridos durante el llenado de granos que por estreses térmicos.
- 2- La concentración final de proteína en granos de soja está determinada durante el periodo comprendido entre la formación de vainas y el llenado de granos (R3 a R6).

Objetivos

Se propone identificar las variables climáticas que afectan la concentración de proteína en granos de soja. En particular se espera:

1. Identificar variables climáticas asociadas a la ocurrencia de estrés hídrico o térmico durante las distintas etapas fenológicas que permitan explicar variaciones en la concentración de proteína en grano de soja.
2. Determinar si la variación encontrada en genotipo para concentración de proteína en granos de soja se debe al grupo de madurez o es una diferencia estructural.

MATERIALES Y MÉTODOS

Base de datos

Se recopilaron datos de proteína de la red de testeo del equipo de desarrollo de soja de Bayer Crop Science provenientes de 112 ensayos (33.714 parcelas) de las campañas 2020-21, 2021-22 y 2022-23 de las principales zonas productoras de Brasil.

También se recopilaron datos de manejo agronómico, geo posición y rendimiento de parcelas, junto con datos de madurez (días desde siembra a R8) observada a campo para ser usados en las calibraciones de los modelos.

Los ensayos fueron sembrados en 61 Municipios de 12 estados (**Tabla 1**) de las principales zonas de producción de soja de Brasil. Abarcando las cinco macro regiones ambientales de la regionalización de ensayos de Embrapa (Embrapa, 2012), la cual se basa en características agroecológicas y climáticas distintivas. Se utilizaron genotipos con grupos de madurez desde 4.9 a 8.8. La concentración de proteína de granos fue determinada por espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) y reportado en base al peso seco. La conducción de los ensayos estuvo a cargo de responsables de la red, siguiendo protocolos establecidos por la entidad. El manejo de organismos perjudiciales se realizó según el asesoramiento profesional de ingenieros agrónomos de la red de cada región productiva. Los ensayos fueron sembrados bajo siembra directa y en secano.

Base de datos climáticos:

Los datos climáticos utilizados para este trabajo fueron provistos por el equipo de Bayer Crop Science.

A partir de la geo posición y la fecha de siembra de los ensayos se extrajeron datos climáticos diarios desde 30 días antes de siembra hasta cosecha (temperatura mínima (TMIN), temperatura máxima (TMAX), radiación incidente (Rsi), Amplitud térmica (TAMP), precipitación (PPT), evapotranspiración real (ETr), fotoperiodo (N)). También se calcularon la cantidad de días con temperaturas superiores a 35°C, asumiendo que valores por encima de este umbral representan estreses térmicos al cultivo siguiendo la definición de Wahid et al (2007) que indican que existe estrés térmico si la elevación de la temperatura es mayor a 10–15°C sobre la temperatura ambiental.

Para el cálculo del balance hídrico diario del suelo se consideró la evapotranspiración del cultivo (ETc). $ETc = ETP * Kc$, donde ETP es la evapotranspiración potencial (o de referencia) estimada por el método Penman-Monteith (FAO-56, 1998), y Kc es el coeficiente del cultivo, que varía con el crecimiento del cultivo. Con los datos de textura se determinó la capacidad máxima de agua almacenada en el suelo que está disponible para la planta, denominada Capacidad de Agua Disponible (CAD). El cálculo del balance hídrico comienza en la fecha de emergencia de la planta y el CAD variará diariamente, proporcionalmente al crecimiento de las raíces. Con la pérdida de agua a la atmósfera por evapotranspiración, el almacenamiento de agua en el suelo disminuye, reduciendo la disponibilidad de agua para la planta, que eventualmente no podrá evapotranspirar a su máximo potencial.

Tabla 1. Estado, cantidad de muestras, madurez relativa y cantidad de genotipos por estado y rango de fechas de siembra del set de datos.

País	Estado	n muestras	Madurez Relativa	n genotipos	Rango Fecha Siembra	
Brasil	Bahía	2115	7.8 - 8.8	1188	11-Nov	25-Nov
Brasil	Distrito Federal	215	6.9 - 8.6	181	05-Nov	18-Nov
Brasil	Goiás	1526	6.8 - 8.6	313	13-Oct	18-Nov
Brasil	Maranhão	709	7.3 - 8.8	688	1-Nov	15-Nov
Brasil	Mato Grosso	2945	6.5 - 8.7	702	17-Oct	18-Nov
Brasil	Mato Grosso do Sul	4072	5.4 - 8.6	1125	13-Oct	12-Nov
Brasil	Minas Gerais	3842	6.5 - 8.2	2128	14-Oct	17-Nov
Brasil	Paraná	8418	4.9 - 7.3	3540	24-Sep	18-Nov
Brasil	Piauí	267	7.8 - 8.8	250	16-Nov	27-Nov
Brasil	Rio Grande do Sul	7961	5.0 - 6.9	3691	03-Nov	07-dic
Brasil	São Paulo	646	5.2 - 6.9	311	19-Oct	28-Oct
Brasil	Tocantins	998	7.6 - 8.8	771	20-Oct	19-Nov

Se calculó la diferencia entre la evapotranspiración del cultivo (ETc) y la evapotranspiración real (ETr) para determinar la Deficiencia de Agua en cada período determinado. Por otro lado, se considera como "excedente de agua" siempre que la cantidad de lluvia es mayor que el volumen necesario para elevar el almacenamiento a CAD y cumplir con la ETc. Este exceso de volumen dará como resultado la pérdida de agua a través de la escorrentía superficial y el drenaje profundo. El balance hídrico de los cultivos sigue los mismos

principios que los balances hídricos climatológicos y secuenciales desarrollados por Thornthwaite y Mather (1955).

Siguiendo esta metodología se obtuvo la deficiencia de agua en el suelo (DEF) y el excedente de agua en el suelo (EXC), como indica la **Figura 1**. Con ellas, se calculó una nueva variable (BH) que representa el exceso con valores positivos y el déficit con valores negativos en una misma escala.

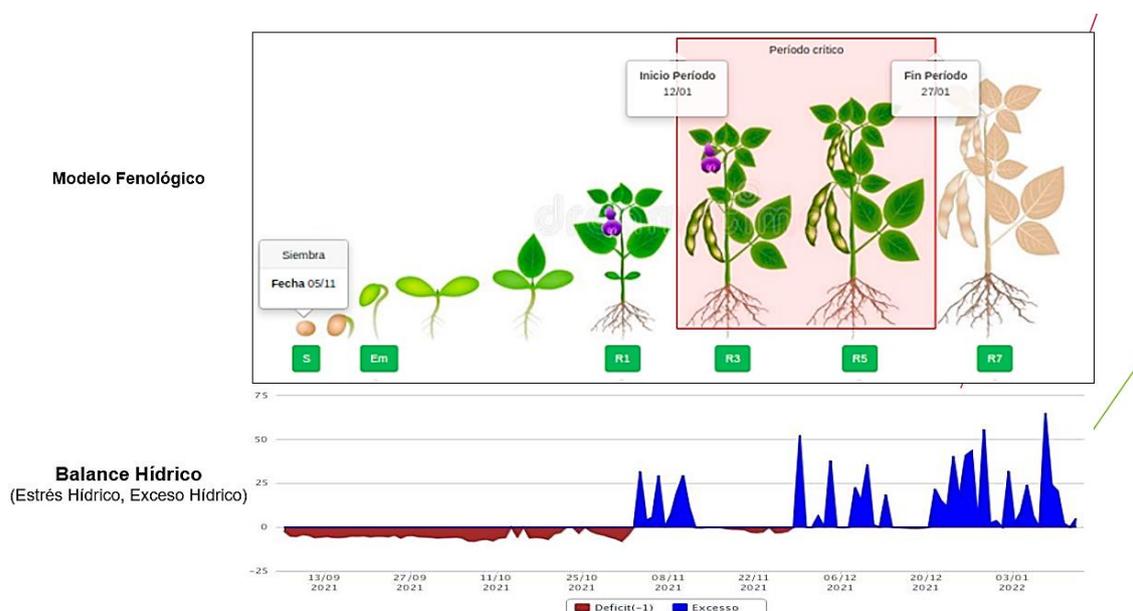


Figura 1. Diagrama de modelo de fenología y balance hídrico para la determinación del contenido de agua en suelo disponible para el cultivo, deficiencia y exceso de agua para distintos segmentos fenológicos.

Estimación de Datos Fenológicos

Se utilizaron los datos climáticos y agronómicos de cada ensayo como variables de ingreso dentro del modelo de simulación de SOYGRO del software Decision Support

System for Agrotechnology Transfer (DDSAT) (Wilkerson et al., 1983). Este software permite simular el crecimiento, desarrollo y rendimiento de cultivos en base

a dinámicas suelo-planta-atmósfera para obtener las fechas de ocurrencia de los distintos estadios fenológicos

(VE, R1, R3, R5, R6, R7 y R8) según la escala de Fehr y Caviness (1971). Para mejorar la precisión del modelo de fenología, se realizó una calibración con los datos medidos a campo de días a R8 (**Tabla 2**).

Tabla 2. Rango explorado de las distintas variables climáticas en los distintos estadios fenológicos de los ensayos.

Variable	Código	pd_R1	R1_R2	R2_R3	R3_R5	R5_R7
Déficit Hídrico	DEF	0 - 276.0	0 - 164.0	0 - 42.3	0 - 80.8	0 - 243.0
Evapotranspiración	ETr	0 - 331.1	0 - 143.2	0 - 34.1	0 - 64.3	0 - 354.7
Exceso Hídrico	EXC	0 - 167.1	0 - 273.8	0 - 120.1	0 - 194.7	0 - 543.7
Agua Disponible	fAWC	0.01 - 1	0 - 1	0 - 1	0 - 1	0 - 1
Fotoperiodo	N	12.4 - 13.9	12.5 - 14.1	12.5 - 14.1	12.5 - 14.1	12.2 - 13.9
Precipitaciones	PPT	79.3 - 396.1	0.9 - 363.9	0 - 177.1	0 - 221.3	8.9 - 755.5
Radiación Incidente	Rsi	14.8 - 25.0	12.4 - 26.2	10.8 - 27.4	11.9 - 27.3	14.6 - 25.0
Temperatura Máxima	TMAX	24.0 - 33.8	23.5 - 35.9	20.3 - 38.0	21.5 - 37.0	22.9 - 34.6
Días con T° Mayor a 35°C	TMAX_35	0 - 15	0 - 14	0 - 4	0 - 9	0 - 22
Temperatura Mínima	TMIN	14.6 - 23.6	14.1 - 24.3	13.0 - 25.0	13.6 - 24.8	14.7 - 23.6

Análisis de datos

Para explorar las variables ambientales asociadas a la concentración de proteína en las semillas de soja se realizaron análisis de árbol de regresión, siguiendo la metodología propuesta por Breiman et al. (1984). Este enfoque de árbol de regresión emplea una técnica de partición binaria, dividiendo de manera repetida los datos en grupos más homogéneos mediante combinaciones de variables explicativas, tales como temperatura máxima promedio en un segmento fenológico puntual.

Los análisis con árboles de regresión (Breiman et al., 1984) son útiles para predecir una variable respuesta en función de distintas covariables. Se utiliza la técnica de división binaria recursiva para separar en grupos por variaciones en la variable respuesta (por ejemplo, porcentaje de proteína) utilizando combinaciones de las variables explicativas (por ejemplo, déficit hídrico o temperatura mínima en un periodo) y cada división debe maximizar sus diferencias. El modelo de árbol de regresión calcula la importancia relativa de las variables utilizando dos enfoques principales. Por un lado, la ganancia, que se calcula en cada nodo del árbol como la reducción total en la métrica de impureza (por ejemplo, la medida de la varianza), y resulta de dividir los datos en función de una característica específica. Por otro lado, la frecuencia de uso indica la asiduidad con la que se utiliza una característica para realizar divisiones en los árboles del bosque. Se registra cuántas veces una característica es seleccionada para dividir los nodos en los diferentes árboles del bosque, y luego se normaliza para obtener la

importancia relativa. Estos dos enfoques proporcionan una medida de la importancia relativa de cada característica en el proceso de toma de decisiones del árbol de regresión. Las características con una mayor ganancia de impureza o una mayor frecuencia de uso se consideran más importantes en la predicción del objetivo.

Si bien el objetivo principal de este estudio se centra en variables ambientales, se decidió incorporar el genotipo

como una variable explicativa más dados los resultados reportados anteriormente sobre el efecto que este tiene en la determinación de proteína (Bosaz et al., 2019). A su vez, no incorporamos otras variables de manejo, como fecha de siembra o latitud, porque buscamos que el ambiente esté explicado por las variables climáticas creadas.

Para disminuir el posible sobreajuste del modelo se creó un conjunto de entrenamiento, con una proporción del 80% de los datos y un conjunto de prueba, con el 20% restante. Esta proporción se estableció para garantizar un equilibrio entre el tamaño del conjunto de entrenamiento y la capacidad de evaluación del modelo en el conjunto de prueba.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La concentración de proteína de los granos presentó variación entre las regiones exploradas de Brasil (**Tabla 3**). El valor promedio de concentración de proteína para el total de los datos fue de 38,75%, con un rango entre 32 al 47%.

El árbol de regresión mostró 21 nodos terminales, con concentración de proteína de semilla, que oscila entre 33,6 y 46,2% (**Figura 2**).

El modelo de árbol de regresión explicó el 49% de la variación total en la concentración de proteína de la semilla (RMSE: 1.13%).

Tabla 3. Rango y promedio de concentración de proteína de ensayos comparativos de rendimiento en las principales regiones productoras de Brasil en las campañas 2020-21, 2021-22 y 2022-23.

Estado	Región	Rango Proteína (%)	Proteína Promedio (%)
Paraná	1	32.19 - 47.31	38.48
Rio Grande do Sul	1	33.63 - 43.67	37.73
Mato Grosso do Sul	2	35.41 - 44.35	38.93
São Paulo	2	35.45 - 43.35	38.70
Distrito Federal	3	35.73 - 42.28	39.43
Goiás	3	34.64 - 44.04	38.89
Minas Gerais	3	34.81 - 44.10	39.60
Mato Grosso	4	35.02 - 44.45	40.07
Bahia	5	34.32 - 43.36	38.79
Maranhão	5	35.05 - 44.09	39.43
Piauí	5	36.77 - 42.87	39.83
Tocantins	5	35.92 - 45.07	39.98
	total	32.19 - 47.31	38.75

Es importante destacar que estos resultados proporcionan una visión inicial de las variables que pueden influir en la calidad de la semilla, y que pueden requerir una mayor exploración y análisis para comprender completamente sus implicaciones y la importancia relativa de las variables ambientales en cada momento fenológico obtenidas con el modelo de árbol de regresión se puede ver en la **Figura 2**. Cada estadio fenológico representa una etapa distinta en el ciclo de crecimiento de la planta, desde la emergencia (pd) hasta el final de llenado de granos (r7) (madurez fisiológica).

relaciones. Las variables relacionadas con la temperatura (TMAX, TMAX35_n y TMIN) explicaron el 37% de la variación total revelada, mientras que las variables hídricas (BH) explicaron el 12% (**Figura 3**). De todas las variables climáticas analizadas, la TMIN en el periodo de emergencia a R1 (pd_r1) fue la primera variable de división del árbol para explicar las variaciones en

El genotipo fue la variable que mostró más importancia relativa con un 35,4% (**Figura 3**). Este resultado coincide con reportes anteriores lo que sugiere que la variabilidad genética juega un papel importante en la determinación de proteína de los granos.

En lo que respecta a las variables ambientales, se identifica que la temperatura es el factor que contribuye con la mayor variabilidad, seguido de cerca por las variables relacionadas con el balance hídrico. Esto sugiere que las condiciones térmicas y la disponibilidad de agua pueden tener un impacto significativo en la calidad de la semilla.

concentración de proteína (23% importancia relativa), seguida por N en el mismo segmento fenológico (7%).

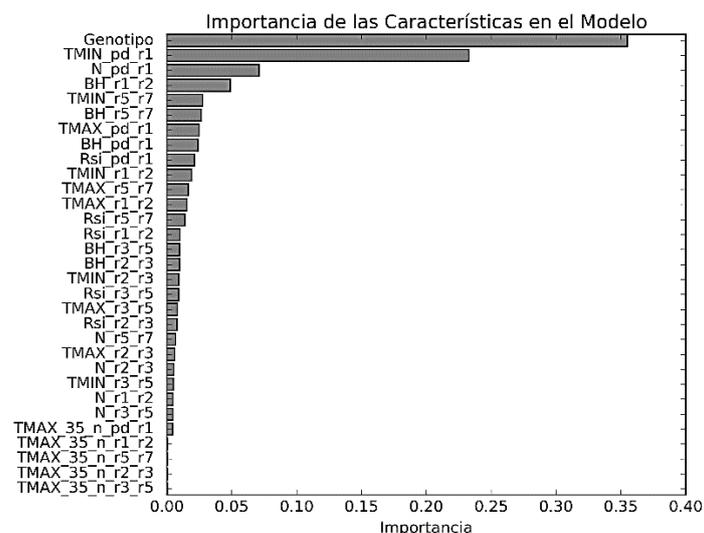


Figura 2. Importancia Relativa del Genotipo y las Variables Climáticas en Diferentes Estadios Fenológicos de la Soja.

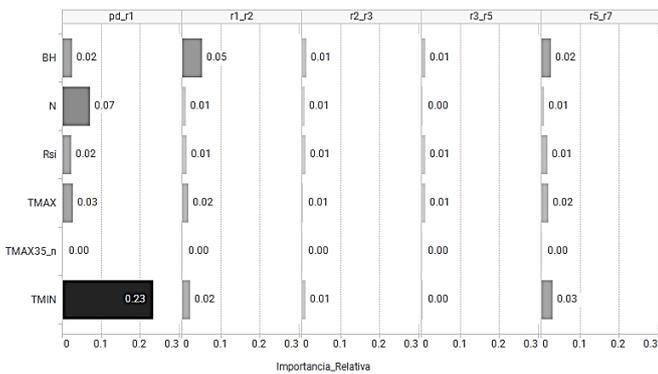


Figura 3. Importancia Relativa de las Variables Climáticas en Diferentes Estadios Fenológicos de la Soja.

En cuanto a los estadios fenológicos, curiosamente las variables climáticas analizadas durante la etapa vegetativa (pd_r1) presentaron mayor importancia relativa que las variables medidas en las etapas reproductivas (37% y 27%, respectivamente). A pesar de esto, se hicieron pruebas ingresando distintas combinaciones de variables vegetativas y reproductivas al modelo y se lograron ajustes de modelo semejantes con mayor influencia del estadio reproductivo ($R^2=0.49$, $RMSE= 1.14$). Esto sugiere, por un lado, que las variables climáticas medidas en condiciones de campo podrían estar fuertemente relacionadas entre los distintos momentos fenológicos. Y por otro, que la gran cantidad de interacciones posibles entre las variables ambientales hace que se optimice las respuestas aun sacando alguna de ellas.

CONCLUSIONES

Este estudio permitió identificar variables ambientales influyentes en la determinación de la concentración de proteína de los granos de soja, y reafirmar que la elección de cultivar es una opción de manejo muy importante para determinar la concentración de proteínas de las semillas. El valor de proteína promedio para las distintas regiones de Brasil en las campañas 2020 hasta 2022 fue de 38.75%, con un rango de 32.19% a 47.31%.

Los resultados obtenidos en este estudio sobre las etapas fenológicas que más influyen en la determinación de proteína no coincidieron con la literatura existente. Si bien se encontró una fuerte relación entre variables climáticas y la concentración de proteína, hace falta profundizar más en las interacciones entre ellas.

En la etapa final de este proyecto, se buscará capturar una imagen más completa de las interacciones entre las variables ambientales y la concentración de proteína, esperando obtener implicancias significativas para la mejora de la calidad de las harinas de soja y la producción agrícola en general.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Assefa, Y., Purcell, L.C., Salmeron, M., Naeve, S., Casteel, S.N., Kovács, P., Archontoulis, S., Licht, M., Below, F., Kandel, H., Lindsey, L.E., Gaska, J., Conley, S., Shapiro, C., Orłowski, J.M., Golden, B.R., Kaur, G., Singh, M., Thelen, K., Laurenz, R., Davidson, D., Ciampitti, I.A., 2019. Assessing variation in US soybean seed composition (protein and oil). *Front. Plant Sci.* 10, 298.
- Bolon, Y.-T., Joseph, B., Cannon, S.B., Graham, M.A., Diers, B.W., Farmer, A.D., May, G.D., Muehlbauer, G.J., Specht, J.E., Jin Tu, Z., Weeks, N., Xu, W.W., Shoemaker, R.C., Vance, C.P. 2010. Complementary genetic and genomic approaches help characterize the linkage group I seed protein QTL in soybean. *BMC Plant Biol.* 10, 41.
- Boroomandan P, Khoramivafa M, Haghi Y, Ebrahimi A. 2009. The effects of nitrogen starter fertilizer and plant density on yield, yield components and oil and protein content of soybean (*Glycine max* L. Merr). *Pakistan Journal of Biological Sciences: PJBS.* Feb, 12(4):378-382. DOI: 10.3923/pjbs.2009.378.382. PMID: 19579973.
- Bosaz, L.B., Gerde, J.A., Borrás, L., Cipriotti, P.A., Ascher, L., Campos, M., Gallo, S., Rotundo, J.L. 2019. Management and environmental factors explain soybean seed protein variability in central Argentina. *Field Crop Res.* 240, 34–43.
- Breiman, L., Friedman, J., Stone, C.J., Olshen, R.A. 1984. *Classification and Regression Trees.* CRC press. CAC. Camara Arbitral
- Burton, J.W. 1987. Quantitative genetics: results relevant to soybean breeding. In: Wilcox, J.R. (Ed.), *Soybeans: Improvement, Production, and Uses*, second ed. Agron. Monogr, vol. 16. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, pp. 211–247.
- Cafaro La Menza, N., Monzon, J.P., Lindquist, J.L., Arkebauer, T.J., Knops, J.M., Unkovich, M., Specht, J.E., Grassini, P. 2020. Insufficient nitrogen supply from symbiotic fixation reduces seasonal crop growth and nitrogen mobilization to seed in highly productive soybean crops. *Plant Cell Environ.* 43, 1958–1972.
- Carrera, C., Martinez, M.J., Dardanelli, J., Balzarini, M., 2009. Water deficit effect on the relationship between temperature during the seed fill period and soybean seed oil and protein concentrations. *Crop Sci.* 49, 990–998.
- Cerrudo, A., Miller-Garvin J. and Naeve, S.L. 2023. Western Hemisphere quality and production capacity of soybean protein. *Front. Sustain. Food Syst.* 7:1223921. doi: 10.3389/fsufs.2023.1223921
- De Vries, F.P., Brunsting, A.H.M. and Van Laar, H.H. 1974. Products, requirements and efficiency of biosynthesis

- a quantitative approach. *Journal of theoretical Biology*, 45(2), pp.339-377.
- Dornbos Jr., D.L., Mullen, R.E. 1992. Soybean seed oil and oil contents and fatty acid composition adjustments by drought and temperature. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 69, 228–231.
- Dornbos, D.L., McDonald, M.B. 1986. Mass and composition of developing soybean seeds at five reproductive growth stages. *Crop Sci.* 26, 624–630.
- Embrapa. 2012. Regionalização dos testes de Valor de Cultivo e Uso e da indicação de cultivares de soja - Terceira aproximação. Recuperado de <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/917252/1/Doc330OL1.pdf>
- Ferreira, A. S.; Balbinot, A. A.; Werner, F.; Zucareli, C.; Franchini, J. C.; Debiasi, H. 2016. Plant density and mineral nitrogen fertilization influencing yield, yield components and concentration of oil and protein in soybean grains. *Bragantia* [online]. V. 75, n. 3 [Accessed 5 October 2021], pp. 362-370. Available from: <<https://doi.org/10.1590/1678-4499.479>>. Epub 23 June 2016. ISSN 1678-4499.
- Foroud, N., Mündel, H.H., Saindon, G., Entz, T. 1993. Effect of level and timing of moisture stress on soybean yield, protein, and oil responses. *Field Crop Res.* 31, 195–209.
- G. Kaschuk, P.A. Leffelaar, K.E. Giller, O. Alberton, M. Hungria, T.W. Kuyper. 2010. Responses of legumes to rhizobia and arbuscular mycorrhizal fungi: a meta-analysis of potential photosynthate limitation of symbioses. *Soil Biol. Biochem.*, pp. 125-127
- G. Kaschuk, T.W. Kuyper, P.A. Leffelaar, M. Hungria, K.E. Giller. 2009. Are the rates of photosynthesis stimulated by the carbon sink strength of rhizobial and arbuscular mycorrhizal symbioses? *Soil Biol. Biochem.*, pp. 1233-1244.
- Gibson, L.R., Mullen, R.E., 1996. Soybean seed composition under high day and night growth temperatures. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 73, 733–737.
- Glaciela Kaschuk, Xinyou Yin, Mariangela Hungria, Peter A. Leffelaar, Ken E. Giller, Thomas W. Kuyper, 2012. Photosynthetic adaptation of soybean due to varying effectiveness of N₂ fixation by two distinct Bradyrhizobium japonicum strains. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.10.002>.
- Goldsmith, P. D., Gunjal, K., and Ndarishikanye, B. (2004). Rural–urban migration and agricultural productivity: the case of Senegal. *Agric. Econ.* 31, 33–45. doi: 10.1111/j.1574-0862.2004.tb00220.x
- Hider, Nabil & Zhmurko, Vasily. 2020. Influence of different photoperiodic conditions on the protein and oil content in soybean seeds (*Glycine Max* (L.) Merr.). *ScienceRise: Biological Science.* 10-15. 10.15587/2519-8025.2020.201416.
- Javier de Luca, M., Nogueira, M.A. and Hungria, M. 2014. Feasibility of Lowering Soybean Planting Density without Compromising Nitrogen Fixation and Yield. *Agronomy Journal*, 106: 2118-2124. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0234>
- Javier de Luca, Marcos & Hungria, Mariangela. 2014. Plant densities and modulation of symbiotic nitrogen fixation in Soybean. *Scientia Agricola.* 71. 181-187. 10.1590/S0103-90162014000300002.
- Luo X, Yin M, He Y. Molecular Genetic Understanding of Photoperiodic Regulation of Flowering Time in Arabidopsis and Soybean. *Int J Mol Sci.* 2021 Dec 31;23(1):466. doi: 10.3390/ijms23010466. PMID: 35008892; PMCID: PMC8745532.
- Mertz-Henning, L.M., Ferreira, L.C., Henning, F.A.J., Mandarino, M.G., Santos, E.D., Oliveira, M.C.N.D., Nepomuceno, A.L., Farias, J.R.B., Neumaier, N. 2018. Effect of water deficit-induced at vegetative and reproductive stages on protein and oil content in soybean grains. *Agron. J.* 8, 2–11.
- Miller-Garvin, J., Naeve, S.L. 2019. United States Soybean Quality 2018 Annual Report. Available from <https://ussec.org/resources/ussec-annual-report/>.
- Okumura, R.S., D.D.C. Mariano, P.V.C. Zaccheo, A.N. de Albuquerque and C.G. Giebelmeier et al. 2013. Efficiency of utilization of nitrogen coated with urease inhibitor in maize. *Pak. J. Biol. Sci.*, 16: 871-876.
- Ortez, O.A., Tamagno, S., Salvagiotti, F., Prasad, P.V.V., Ciampitti, I.A. 2019. Soybean nitrogen sources and demand during the seed-filling period. *Agron. J.* 111, 1779–1787.
- Piper, Ernest & Boote, Kenneth. 1999. Temperature and cultivar effects on soybean seed oil and protein concentrations. *Journal of the American Oil Chemists' Society.* 76. 1233-1241. 10.1007/s11746-999-0099-y.
- Poeta, F.B., Rotundo, J.L., Borrás, L., Westgate, M.E. 2014. Seed water concentration and accumulation of protein and oil in soybean seeds. *Crop Sci.* 54, 2752–2759.
- Rotundo, J.L., Miller-Garvin, J.E., Naeve, S.L. 2016. Regional and temporal variation in soybean seed protein and oil across the United States. *Crop Sci.* 56, 797–808.
- Rotundo, J.L., Westgate, M.E. 2009. Meta-analysis of environmental effects on soybean seed composition. *Field Crop Res.* 110, 147–156.
- Rotundo, J.L., Westgate, M.E. 2010. Rate and duration of seed component accumulation in water-stressed soybean. *Crop Sci.* 50, 676–684.
- Rubel, A., Rinne, R.W., Canvin, D.T. 1972. Protein, oil, and fatty acid in developing soybean seeds. *Crop Sci.* 12, 739–741.

- Kelly, S. J.; Cano, M. G.; Fanello, D. D.; Tambussi, E. A.; Guiamet, J. J. 2021. Extended photoperiods after flowering increase the rate of dry matter production and nitrogen assimilation in mid maturing soybean cultivars, *Field Crops Research*, Volume 265, 108104, ISSN 0378-4290, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108104>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429021000502>)
- Severini A, Otegui M., Miralles D.J., Cicchino M., Zuil S. 2017. CronoSoja: Ajustando la fenología de soja a través de ambientes. III Workshop Internacional de Ecofisiología de Cultivos 28-29 Septiembre 2017. Mar del Plata.
- Specht, J.E., Chase, K., Macrander, M., Graef, G.L., Chung, J., Markwell, J.P., Germann, M., Orf, J.H., Lark, K.G. 2001. Soybean response to water. A QTL analysis of drought tolerance. *Crop Sci.* 41, 493–509.
- Thornthwaite C.W., Mather R.J. 1955. The water balance. *Publications in climatology, laboratory of climatology. Centerton, N.J.* 104 pp.
- Wahid, A., S. Gelani, M. Ashraf, Foolad, M. 2007. "Heat tolerance in plants: An overview". *Env Exp Bot.* 61:199-223.
- Wijewardana, C., Reddy, K.R., Bellaloui, N. 2019. Soybean seed physiology, quality, chemical composition under soil moisture stress. *Food Chem.* 278, 95–100.
- Wilson, R.F. 2004. Seed composition. In: Boerma, H., Specht, J.E. (Eds.), *Soybeans: Improvement, Production, and Uses*. CSSA, Madison, WI, pp. 621–668.
- Wolf, R.B., Cavins, J.F., Kleiman, R., Black, L.T. 1982. Effect of temperature on soybean seed constituents: oil, protein, moisture, fatty acids, amino acids, and sugars. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 59, 230–232.
- Yamagata, M., Kouchi, H., Yoneyama, T. 1987. Partitioning and utilization of photosynthate produced at different growth-stages after anthesis in soybean (*Glycine-Max-L Merr*): analysis by long-term C-13-labeling experiments. *J. Exp. Bot.* 38, 1247–1259.
- Yazdi-Samadi, B., Rinne, R.W., Seif, R.D. 1977. Components of developing soybean seeds: oil, protein, sugars, starch, organic acids, and amino acids. *Agron. J.* 69, 481–486.