



# ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO DE CULTIVOS ESTRATÉGICOS EN BOLIVIA: UTILIZANDO DATOS DE TELEDETECCIÓN<sup>1</sup>

## Año 2024

### Resumen

El presente estudio desarrolla una metodología de estimación anticipada del rendimiento agrícola en Bolivia mediante la integración de datos estadísticos y otros no convencionales como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y variables agroclimáticas obtenidos por teledetección satelital, aplicando modelos de regresión. La aplicación de esta metodología se realiza para la campaña de verano 2023-2024 con información disponible del periodo 2018-2023 y para la campaña de invierno 2024 con información del periodo 2019-2023, con lo cual se pronostica los rendimientos de los principales cultivos como arroz, maíz, papa, soya y trigo. Los pronósticos coinciden con datos preliminares y permiten anticipar escenarios de abastecimiento interno, generación de excedentes para la exportación y comportamiento de los precios de estos productos. Esta metodología brinda información oportuna y confiable para la toma de decisiones en el ámbito de la seguridad alimentaria y política agropecuaria.

**Clasificación JEL:** C53; Q18;

**Palabras clave:** Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, Variables agroclimáticas, Pronóstico, Rendimientos agrícolas.

---

<sup>1</sup> El contenido del presente documento es de responsabilidad de los autores y no compromete la opinión de la Unidad de Análisis de Políticas Sociales y Económicas (UDAPE).

## **I. INTRODUCCIÓN**

El proceso de producción agrícola, representa largos periodos, extendiéndose meses e incluso años. Por lo tanto, el resultado de este proceso, es decir, el volumen de producción, se conoce únicamente al finalizar la cosecha en este tipo de actividad económica, lo que dificulta contar con información oportuna en este sector. Por otro lado, las estadísticas oficiales están disponibles con rezago de un año.

Contar con información oportuna o de manera anticipada sobre la producción agrícola, principalmente el rendimiento (la superficie sembrada se conoce al inicio de la campaña agrícola), es fundamental en la toma de decisiones, considerando que el desarrollo de la agricultura está vinculada a las condiciones climáticas, lo que puede resultar en escenarios diversos como que en un determinado año se presente una sobre producción (permitiría generar divisas a través de la exportación de los excedentes); y en otro, déficit de ciertos cultivos o productos (requeriría su importación), afectando la demanda interna y generando un incremento en los precios. Para anticipar estos escenarios es determinante establecer políticas y estrategias basadas en datos precisos y oportunos.

En este sentido, el estudio permitirá contar con una metodología de estimaciones confiables y oportunas del rendimiento de los principales cultivos (soya, sorgo, maíz, arroz, papa, caña de azúcar, etc.) en función del NDVI (información sobre la cantidad y calidad de la vegetación en un área determinada) y a las condiciones climáticas (temperatura, precipitación, radiación solar, humedad, evapotranspiración) que se presentan a lo largo del desarrollo de la planta. Esto brindará pronósticos anticipados de la producción obtenida por campaña, lo que permitirá definir políticas públicas que garanticen o coadyuven en la seguridad alimentaria, velando el abastecimiento en el mercado interno y la estabilidad de precios.

## **II. REVISIÓN DE LA LITERATURA**

El clima tiene un rol muy importante en la producción agrícola, que se manifiesta en el rendimiento de los cultivos<sup>2</sup>, por su influencia en el crecimiento y desarrollo vegetativo de las plantas. El clima es el principal factor de incertidumbre en el desempeño de la agricultura, puesto que cambios, principalmente extremos en las variables climáticas (temperatura, precipitación, humedad, luz solar, etc.) pueden dar lugar a sequías, inundaciones, entre otros; además de proporcionar condiciones para la aparición de plagas que afecten negativamente a la producción agrícola (FMI, 2017).

El propósito principal de las estimaciones del rendimiento es contar con estimaciones oportunas y precisas de este indicador (escala regional y nacional) que ofrecen información valiosa para los tomadores de decisiones respecto a medidas y/o políticas (comerciales, económicas, medioambientales, etc.) anticipadas que reduzcan el riesgo asociado con el sistema alimentario nacional y resguarden la seguridad alimentaria de

---

<sup>2</sup> El nivel de la producción agrícola además del rendimiento, responde de las decisiones de los productores sobre la superficie a ser cultivada, variable que depende de factores como los precios, crecimiento económico, apertura comercial, entre otros.

un país (Johnson et al., 2021). Esta información, también puede ayudar a los agricultores a planificar sus actividades agrícolas en cuanto a: siembra, cosecha, almacenamiento y distribución de su producción (Cunha & Silva, 2020).

Existen diferentes métodos para realizar pronósticos del rendimiento de los cultivos agrícolas, mismos que pueden dividirse en dos enfoques. El primero, modelos basados en procesos que imitan los mecanismos biofísicos que impulsan el crecimiento de los cultivos; para lo cual se requiere información sobre el manejo del cultivo (fecha de siembra, fenología<sup>3</sup>, variedad, entre otros), disponibilidad de nutrientes (propiedades del suelo y niveles de fertilización), agua (humedad y evapotranspiración) y energía recibida (radiación solar). El segundo, modelos estadísticos que pueden ser descriptivos, de regresión y de simulación; son modelos empíricos que se basan en información histórica de variables que inciden en los cultivos (FAO, 2016).

En el presente estudio se aplicará un modelo estadístico de regresión considerando factores agroclimáticos como variables explicatorias, esta estrategia fue aplicada en diferentes estudios. Raj, Ramesh y Rajkumar (2019) analizaron el impacto de las variaciones climáticas y estacionales en el cultivo de té en la India para el periodo 1981-2015, y encontraron que existe una variación espacial considerable en las incidencias de los factores climáticos en la variación del rendimiento, y que la variable temperatura es el factor más determinante. También Bazgee, Fadavi y Hossainy (2014) desarrollaron un modelo de regresión con variables agroclimáticas para estimar el rendimiento del algodón a secano en Irán, usando información histórica 1985-2011, identificaron a la temperatura y la precipitación como variables importantes. Por otra parte, en Estados Unidos Kukul e Irmak (2018) evaluaron el impacto del clima sobre el rendimiento de los cultivos de maíz, soya y sorgo, aplicando regresión lineal múltiple, para el periodo 1968 al 2013; hallaron que la precipitación es el factor más beneficioso para los tres cultivos; por otro lado, la temperatura es beneficioso para el maíz, pero no para el sorgo y la soya.

En las últimas décadas la información obtenida por teledetección<sup>4</sup>, se ha convertido un insumo indispensable para los estudios empíricos del rendimiento de los cultivos. En la actualidad con el avance de la tecnología y plataformas de procesamiento gratuitos es posible obtener información proveniente de sensores remotos de grandes áreas a bajo costo y con posibilidad de conseguirlo de forma periódica. Aprovechando estas ventajas, existen diferentes estudios sobre el monitoreo de los cultivos y pronóstico de rendimientos antes de la cosecha. Bocco et al. (2015) usando modelos de regresión lineal a partir de imágenes satelitales estimaron rendimientos para los cultivos de soya y maíz con dos a tres meses antes de la cosecha con elevados estadísticos de ajuste ( $R^2=98,1$  para la soya y  $R^2=92,0$  para el maíz). Zhu et al. (2021), usando índices basados en información de sensores remotos construyeron modelos para estimar el rendimiento del maíz para las provincias chinas de Liaoning y Jilin, con coeficientes de determinación superiores a 80,0 por ciento.

---

<sup>3</sup> Que considera, la relación del ciclo de vida del cultivo con factores climáticos.

<sup>4</sup> La teledetección es la ciencia y arte de obtener información sobre un objeto a través del análisis de datos adquiridos por un dispositivo que no está en contacto con el objeto de estudio.

En Bolivia, en general los rendimientos de los cultivos muestran niveles inferiores a los que se tiene en países de la región, sin embargo, existen rendimientos de cultivos con mejores desempeños como la soya, maíz, arroz, entre otros que se presentan principalmente en el departamento de Santa Cruz; sin embargo, el crecimiento del sector agrícola obedece principalmente al incremento de la superficie cultivada (Cortez, 2016). Las causas de los bajos rendimientos responden a diferentes factores, como el uso deficiente de insumos y recursos y la escasa preparación técnica de los agricultores. En un estudio, Clavijo (2022) evaluó el impacto del acceso a crédito y asistencia técnica en la productividad agraria en Bolivia con información de la Encuesta Agropecuaria 2015; y halló que el acceso al crédito y la asistencia técnica tiene un impacto positivo en la productividad. El Gobierno nacional en la última década incrementó las inversiones para el sector agropecuario, principalmente en el componente de infraestructura (como ser la construcción de presas y sistemas de riego, puentes y caminos para mejorar el acceso a los mercados, y construcción de silos y centros de acopio); también la inversión en investigación, innovación y asistencia técnica se incrementó, pero en menor medida (Alcaraz et al., 2020).

### III. DATOS

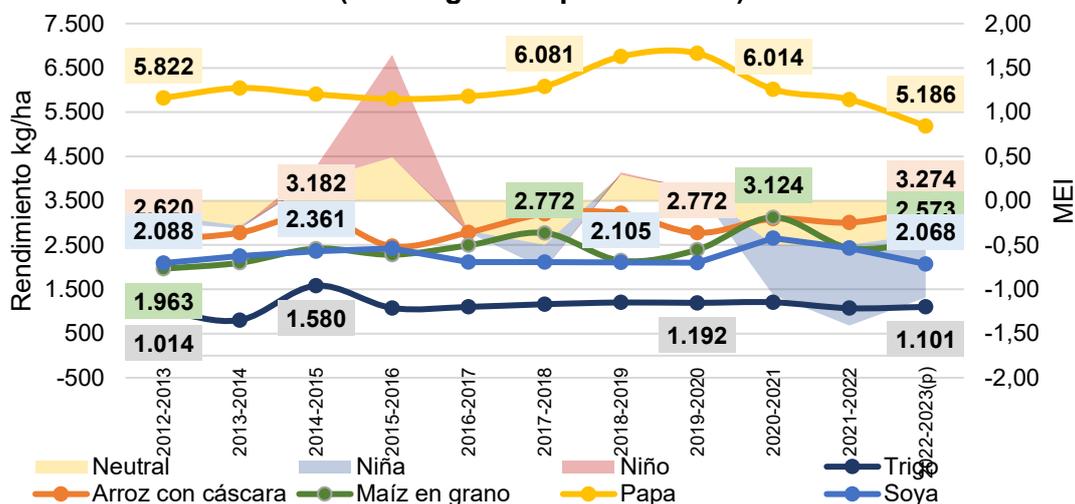
La información de rendimiento de los cultivos, corresponde a estadísticas generadas por el Instituto Nacional de Estadística (INE) y el Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras (MDRyT), mismas que tienen como marco referencial el Censo Agropecuario 2013 y la Encuesta Agropecuaria 2015. Estas estadísticas tienen una desagregación por campaña: verano (con siembras que inician en julio del año de estudio y cosechas que pueden culminar en junio del año próximo) e invierno (con siembras desde mayo y cosechas obtenidas hasta diciembre del mismo año de estudio), por departamento (INE, 2013).

A nivel nacional, se puede observar que los rendimientos de los cultivos de trigo, arroz con cáscara, maíz y soya en grano, presentan fluctuaciones afectadas por las condiciones climáticas, las cuales pueden resumirse por los cambios en el índice Multivariado de El Niño-Oscilación del Sur – MEI<sup>5</sup>. En el año 2015-2016, caen los rendimientos del arroz con cáscara, maíz en grano y trigo, por la presencia del fenómeno del niño, de igual forma se reducen en el 2021-2022 pero por la presencia del fenómeno de la Niña.

---

<sup>5</sup> El Índice Multivariado de El Niño-Oscilación del Sur es un indicador compuesto que considera 5 variables: presión al nivel del mar, temperatura de la superficie del mar, Componente zonal del viento, Componente meridional del viento y Radiación de onda larga saliente. Valores positivos del MEI, mayores o iguales a 0,5 por 5 meses consecutivos o más indican la ocurrencia de El Niño, y valores inferiores a -0,5 por 5 meses consecutivos o más indican la ocurrencia de La Niña. Si el valor es superior a 2 o inferior a -2 el evento se califica como “Muy Fuerte”.

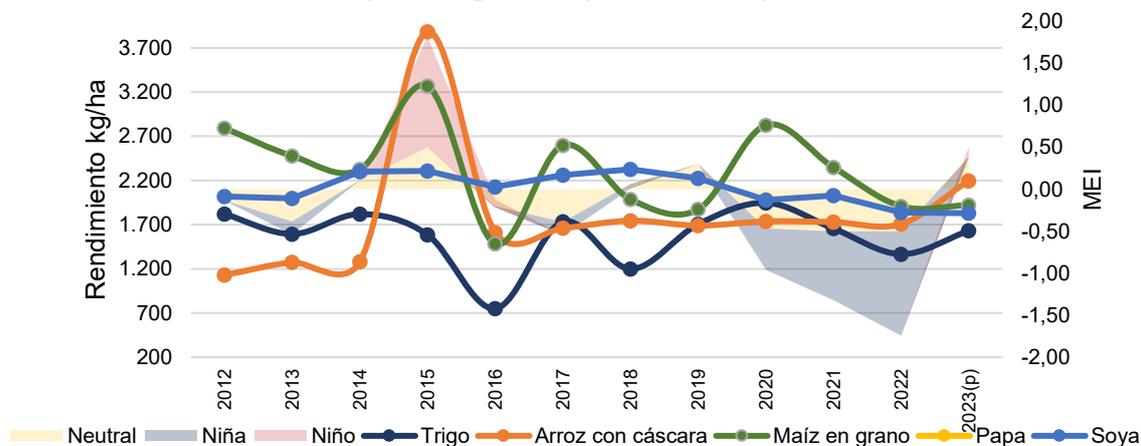
**Gráfico N° 1**  
**BOLIVIA: RENDIMIENTOS DE PRINCIPALES CULTIVOS AGRÍCOLAS DE**  
**CAMPAÑA DE VERANO, 2012-2023**  
**(En kilogramos por hectárea)**



**Fuente:** Instituto Nacional de Estadísticas (INE) – Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras (MDRyT)  
 (\*): Índice Multivariado de El Niño-Oscilación del Sur – MEI (<https://psl.noaa.gov/enso/mei/>), promedio de julio a junio del siguiente año.

En cuanto a la campaña de invierno, los rendimientos de los cultivos tienen fluctuaciones en torno al valor medio, afectados igualmente por factores climáticos. Sin embargo, la presencia del fenómeno de El Niño, tiene efectos diferenciados por cultivo; es positivo para el arroz con cáscara, maíz en grano y soya; y es negativo para el trigo. Por otra parte, la presencia de La Niña, afecta negativamente al maíz en grano, soya y trigo.

**Gráfico N° 2**  
**BOLIVIA: RENDIMIENTOS DE PRINCIPALES CULTIVOS AGRÍCOLAS DE**  
**CAMPAÑA DE INVIERNO, 2012-2023**  
**(En kilogramos por hectárea)**

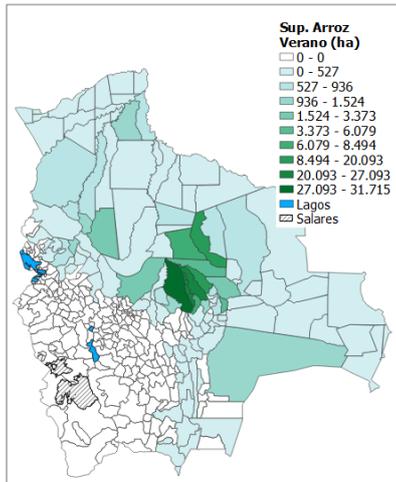


**Fuente:** Instituto Nacional de Estadísticas (INE) – Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras (MDRyT)  
 (\*): Índice Multivariado de El Niño-Oscilación del Sur – MEI (<https://psl.noaa.gov/enso/mei/>) promedio de mayo a diciembre.

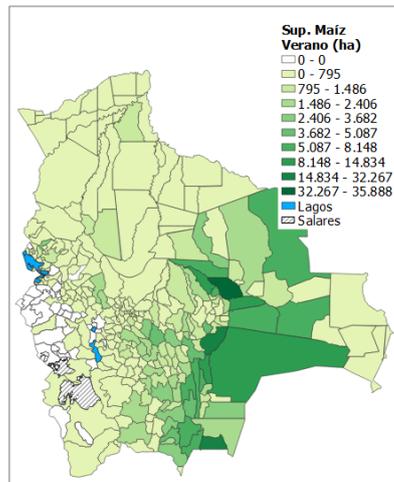
**Mapa 1**

# BOLIVIA: SUPERFICIE POR CULTIVO CAMPAÑA DE VERANO CENSO AGROPECUARIO 2013

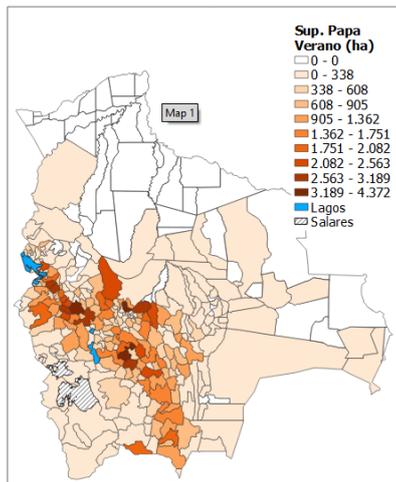
**Arroz**



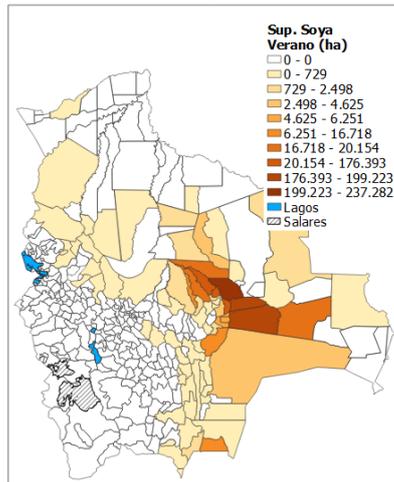
**Maíz**



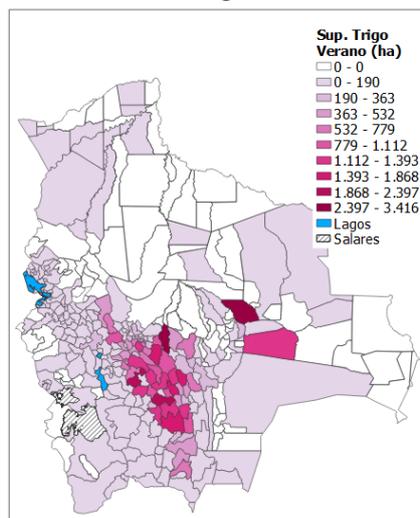
**Papa**



**Soya**

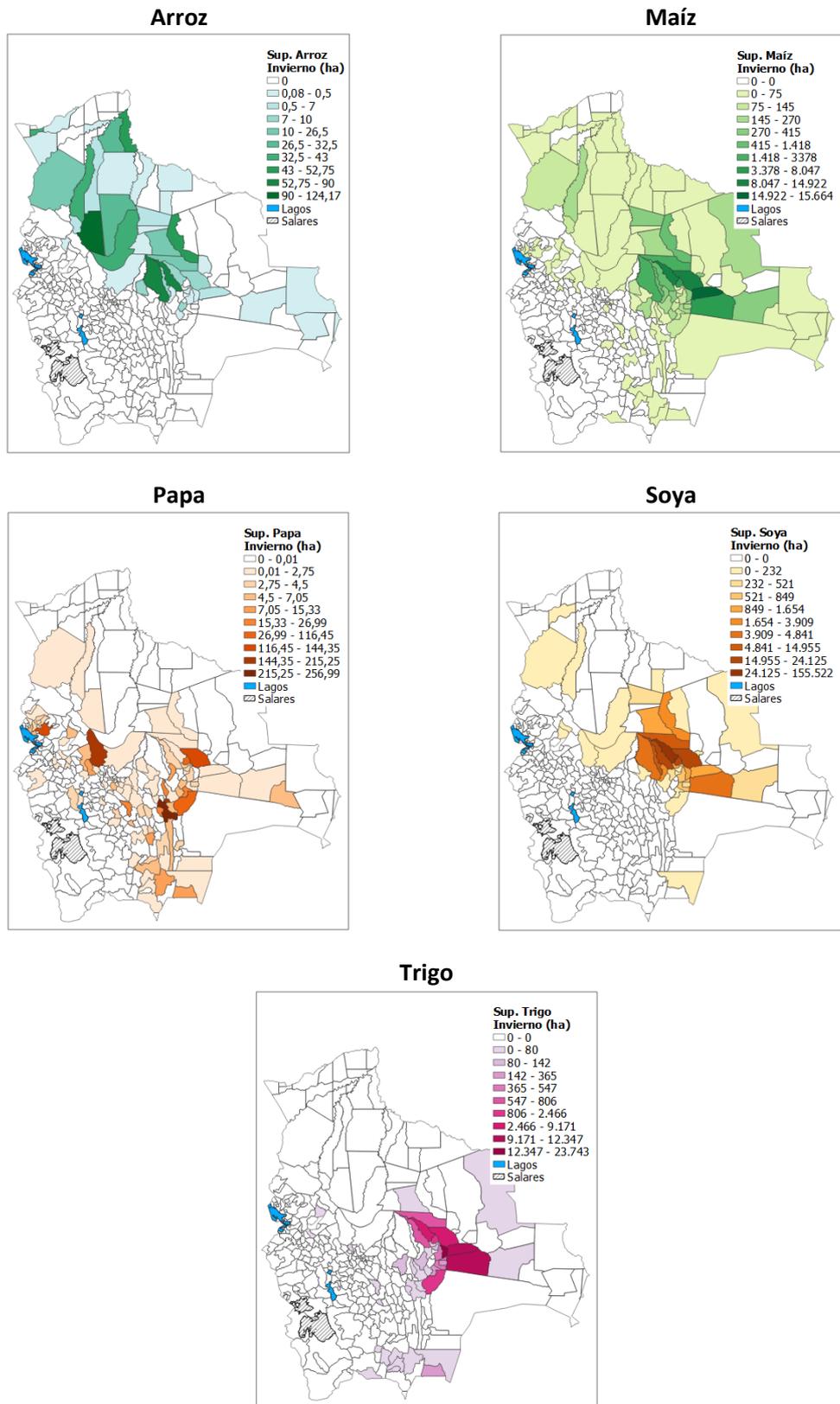


**Trigo**



Fuente: Censo Agropecuario 2013 – Instituto Nacional de Estadística.

## Mapa 2 BOLIVIA: SUPERFICIE POR CULTIVO CAMPAÑA DE INVIERNO CENSO AGROPECUARIO 2013



Fuente: Censo Agropecuario 2013 – Instituto Nacional de Estadística.

En cuanto a las variables agro meteorológicas a emplearse en el estudio se tienen: temperatura, precipitación, evapotranspiración, humedad y radiación solar. La información de cada una de estas variables, por meses con desagregación por municipio, fue obtenida de imágenes satelitales a través de la plataforma de Google Earth Engine.

La temperatura, es un parámetro importante que gobierna los procesos químicos y físicos de las reacciones biológicas de las plantas. La temperatura influye en la germinación de las semillas, la actividad de las raíces, la incidencia de enfermedades y el crecimiento de las plantas (Mohammed, 2021). Para la temperatura se procesaron imágenes ERA5, que contiene datos de temperatura a 2 metros sobre la superficie de la tierra medido en grados Kelvin. La información en formato raster contiene información combinada de modelos con datos observados de todo el mundo. Para el uso de esta información en el estudio, la misma fue convertido a grados Celsius.

La precipitación es una variable esencial para los cultivos puesto que es la principal fuente de agua. Las plantas en alrededor del 90% son agua, y este elemento es muy necesario para sus procesos de enfriamiento, fotosíntesis, y transporte de minerales y nutrientes desde el suelo. La precipitación fue conseguida de imágenes CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data) que cuenta con datos de más de 30 años, la misma combina información de imágenes satelitales de resolución de 0,05° con datos de estaciones in situ, como resultado se cuanta con series de tiempo de lluvia medidos en milímetros día (mm/d). Para la obtención de datos mensuales los mismos fueron agregados de acuerdo al número de días del mes.

Existe una relación directa entre la transpiración y la productividad de una planta, porque a través del proceso de succionar y extrae el agua del suelo, para luego expulsarlo a la atmosfera como vapor a través de las hojas y tallo, las plantas obtienen energía para su crecimiento o acumulación de biomasa. La evapotranspiración es una variable con valor agronómico agregado y recomendado para su incorporación en modelos de pronósticos de rendimientos (Gommes, 2001). La información de evapotranspiración (ET) corresponde al espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS), misma que contiene la variable de evapotranspiración aplicando la ecuación de Penman-Monteith, que incluye datos de reanálisis meteorológicos diarios con información de detección remota, además de propiedades de la vegetación y cobertura del suelo. La ET esta medida en kilogramos por metro cuadrado por 8 días ( $\text{kg/m}^2/8\text{día}$ ), para su conversión a valores mensuales se dividió entre 8 y se multiplicó por el número de días del mes de análisis.

La humedad del suelo es importante porque se constituye en fuente importante de agua para la agricultura. Un suelo húmedo es más fácil para que las raíces de las plantas extraigan nutrientes. La información de humedad del suelo proviene de imágenes SMAP (Soil Moisture Active Passive) que incluye información de la humedad del suelo (con promedio vertical de 0 a 100 cm) expresado en unidades volumétricas ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ).

La radiación solar es la principal fuente de energía utiliza por las plantas en el proceso de fotosíntesis, para convertir la materia inorgánica en materia orgánica. Los datos de radiación solar, corresponde a la suma de radiación solar neta superficial, esta medido

en julios por metro cuadrado ( $J/m^2$ ), esta información se obtuvo de imágenes ERA5. Esta variable se construye como la diferencia entre la radiación descendente (que llega a la superficie de la tierra) y la reflejada (la radiación que se refleja hacia al espacio por las nubes y partículas de la atmósfera).

De igual forma como variable de apoyo se consiguió información del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en inglés). Este indicador se considera como variable proxy del rendimiento agrícola; detecta el verdor, densidad y salud de la vegetación. Este indicador se calcula con información capturada por imágenes satelitales que cuentan con bandas rojo e infrarrojo cercano del espectro electromagnético<sup>6</sup>. El NDVI toma valores entre -1 a 1, valores negativos corresponden a cuerpos de agua, infraestructura hecha por el hombre, nubes o nieve; valores positivos cercanos a cero a suelos desnudos; valores positivos entre 0,2 a 0,4 a superficies con vegetación escasa o enferma; valores entre 0,4 a 0,6 a vegetación moderada o sana; y valores por sobre 0,6 indican una mayor densidad de vegetación y muy sana. La información fue obtenida de la colección de imágenes satelitales Sentinel 2 correspondientes a imágenes multiespectrales, con resolución temporal de 5 días, contienen información de 13 bandas (en las que se incluyen el rojo y el infrarrojo cercano). Se determinó el NDVI para 5 días y se obtuvo la mediana mensual, y en caso de datos perdidos (debido a la presencia de nubes), los mismos fueron imputados por regresión armónica.

El comportamiento de las variables agroclimáticas (temperatura, precipitación, evapotranspiración, humedad y radiación solar) en el periodo 2015 al 2023, tienen un comportamiento estacional regular; sin embargo, difieren en sus tendencias de largo plazo. Al comparar los datos del 2023 con el 2019 (este último no fue afectado por el fenómeno de El Niño o La Niña) se evidencia que la temperatura se ha incrementado en 3,7 por ciento, presentándose en la gestión 2023 niveles máximos históricos; por el contrario, las precipitaciones disminuyeron en 8,8 por ciento y su comportamiento estacional se está modificando de manera que los meses con baja precipitación son mayores y a su vez se presentan precipitaciones cada vez más extremas; la evapotranspiración producto de menores precipitaciones se redujo en 2,2 por ciento; en cambio la humedad aumento en 9,0 por ciento; finalmente la radiación solar, se incrementó en 4,1 por ciento; en cuanto al NDVI, tuvo una reducción acelerada de 35,9 por ciento. Si bien las variaciones de las variables climáticas en valores absolutos son inferiores a los del NDVI, esto daría indicios de la fragilidad de la cobertura vegetal ante cambios en el clima, en el caso específico del periodo de análisis 2019 y 2023, la presencia del fenómeno de la niña, aumento de temperatura, reducción de precipitación afectaron severamente a la salud de la vegetación.

Debido a la diversidad geográfica de Bolivia, el comportamiento de las variables a nivel espacial es diferenciado a lo largo del territorio. En diciembre de 2023 según municipios, las mayores temperaturas se presentaron en la región del chaco y suroeste del departamento de Santa Cruz; en cambio las mayores precipitaciones se localizaron en los departamentos de Beni y Pando, además del norte de La Paz; en cuanto a la

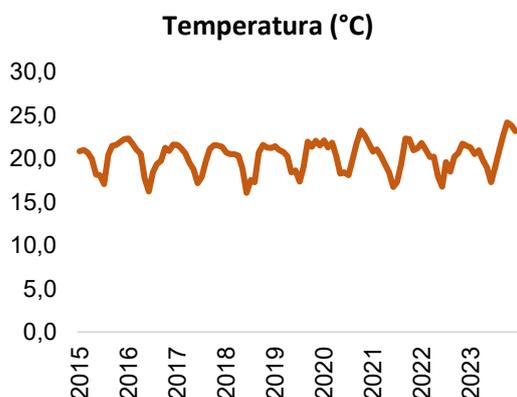
---

<sup>6</sup> se calcula mediante la siguiente expresión:  $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$ , donde NIR: Es la luz reflejada en el espectro del infrarrojo cercano y RED: Es la luz reflejada en el rango rojo del espectro.

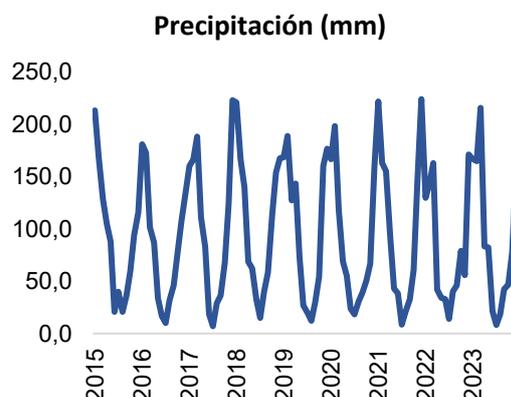
evapotranspiración, los valores más altos se localizan en Beni, norte de Santa Cruz y La Paz, y parte de Cochabamba; respecto a la humedad, los niveles elevados se sitúan a lo largo de la cordillera oriental y los valles subandinos que abarcan La Paz, Cochabamba, Chuquisaca y Tarija; por su parte los altos niveles de radiación solar se encuentran en el altiplano, principalmente en Potosí. Finalmente, los niveles de NDVI elevados se sitúan en la zona de los valles y con mayor valor en la región de los llanos.

Puesto que la información de rendimientos generada por el INE y el MDRyT están a nivel de departamento, y las variables agroclimáticas obtenidas tienen una desagregación municipal, estas últimas fueron agregadas a nivel de departamento, considerando como ponderador a la superficie cultivada por cultivo y municipio, registrados en el Censo Agropecuario 2013.

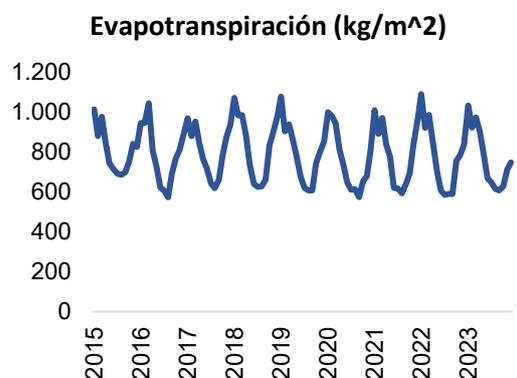
**Gráfico N° 3**  
**BOLIVIA: SERIES DE TIEMPO MENSUALES DE VARIABLES QUE INCIDEN EN EL RENDIMIENTO AGRÍCOLA**



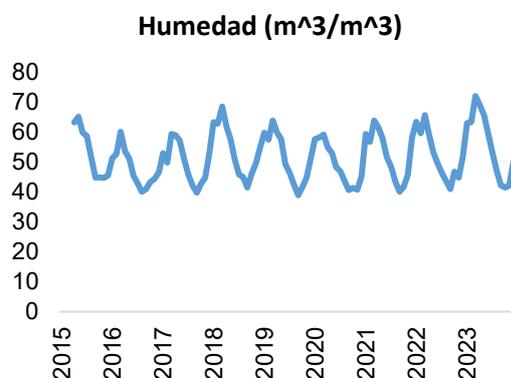
**Fuente:** European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.



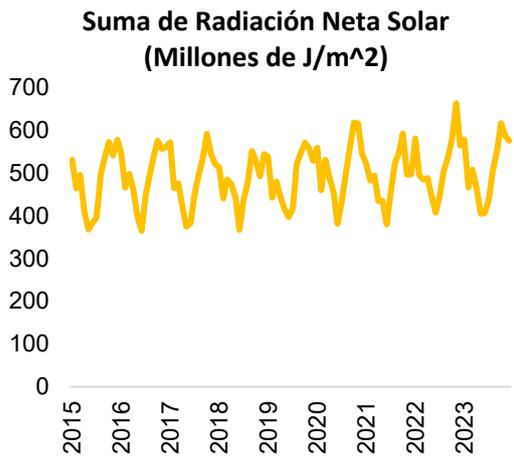
**Fuente:** Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data(CHIRPS).



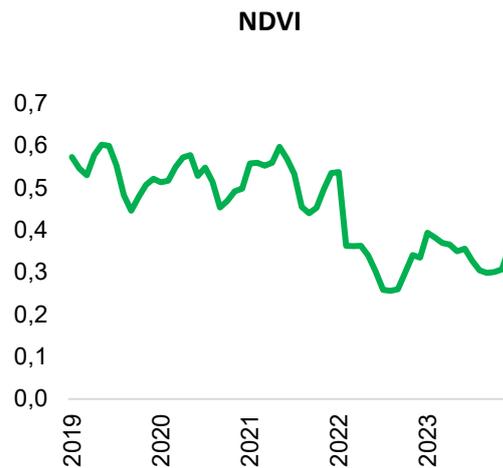
**Fuente:** Moderate Imaging Spectroradiometer (MODIS).



**Fuente:** Soil Moisture Active Passive (SMAP).

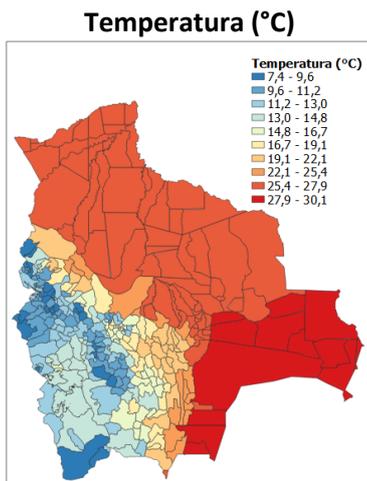


Fuente: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

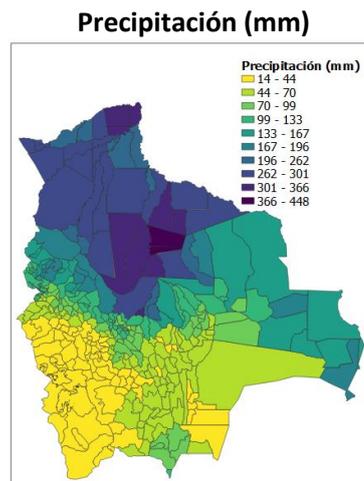


Fuente: Imágenes Sentinel 2.

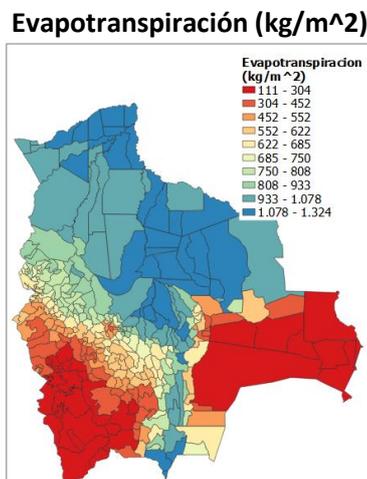
## Mapa 3 BOLIVIA: VARIABLES RELACIONADA CON EL RENDIMIENTO AGRÍCOLA POR MUNICIPIO, DICIEMBRE 2023



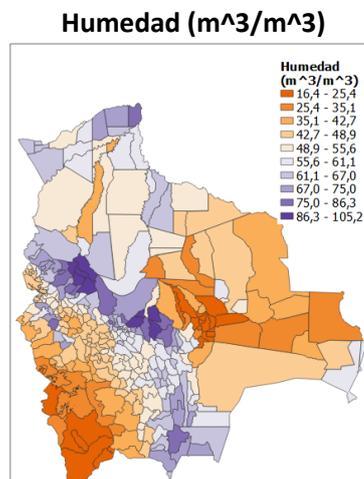
Fuente: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.



Fuente: Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data(CHIRPS).

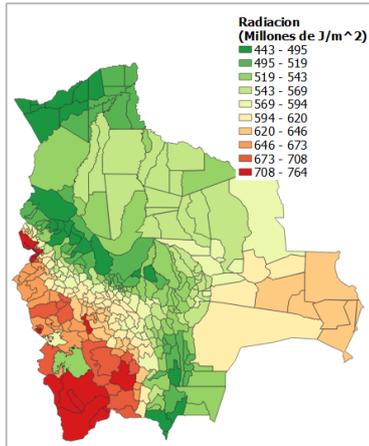


Fuente: Moderate Imaging Spectroradiometer (MODIS).



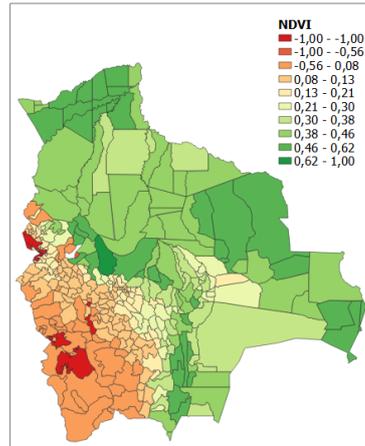
Fuente: Soil Moisture Active Passive (SMAP).

**Suma de Radiación Neta Solar  
(Millones de J/m<sup>2</sup>)**



Fuente: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

**NDVI**

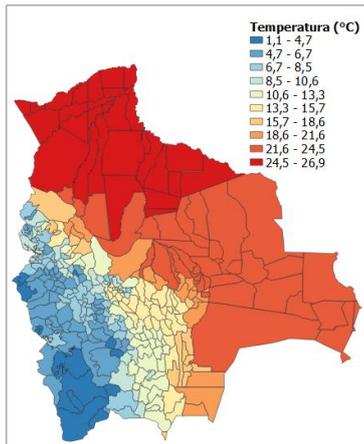


Fuente: Imágenes Sentinel 2.

**Mapa 4**

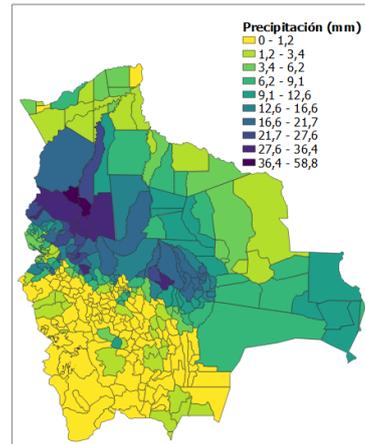
**BOLIVIA: VARIABLES RELACIONADAS CON EL RENDIMIENTO AGRÍCOLA POR MUNICIPIO, JULIO 2023**

**Temperatura (°C)**



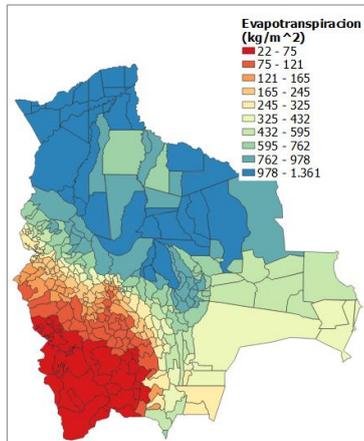
Fuente: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

**Precipitación (mm)**



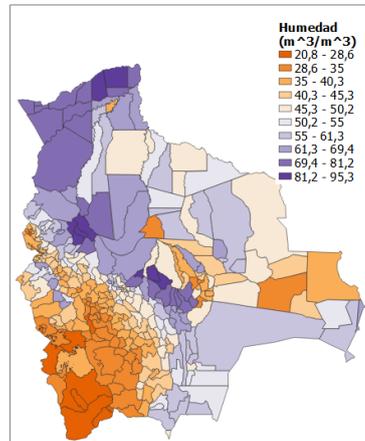
Fuente: Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data(CHIRPS).

**Evapotranspiración (kg/m<sup>2</sup>)**



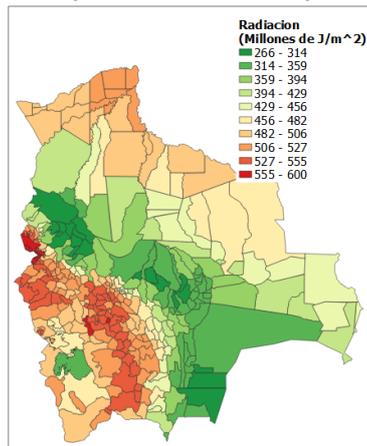
Fuente: Moderate Imaging Spectroradiometer (MODIS).

**Humedad (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)**



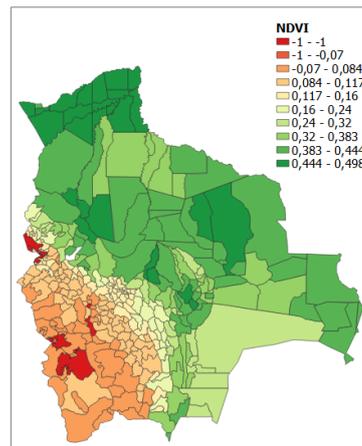
Fuente: Soil Moisture Active Passive (SMAP).

### Suma de Radiación Neta Solar (Millones de J/m<sup>2</sup>)



Fuente: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

### NDVI



Fuente: Imágenes Sentinel 2.

## IV. METODOLOGÍA

La producción agrícola depende de dos variables, la superficie sembrada y el rendimiento por unidad de superficie sembrada de un determinado cultivo. El comportamiento de cada una de estas variables responde a diferentes factores, por lo cual, el presente estudio sólo se centrará en establecer los factores que inciden en el desempeño del rendimiento y sus proyecciones.

En este sentido, la estrategia para obtener pronósticos de rendimientos de cultivos, se basa en modelos estadísticos. Considerando, las características particulares de la producción agrícola, que abarca desde la siembra hasta la cosecha, proceso que se extiende por varios meses (los cultivos de la campaña de verano sobrepasa un año calendario) y que durante este tiempo las variables agroclimáticas (temperatura, precipitación, evapotranspiración, humedad y radiación solar) que influyen de forma determinante en el crecimiento y desarrollo de las plantas, se presentan en diferentes magnitudes y distribuciones con un alto grado de incertidumbre. El rendimiento y por ende la producción a obtenerse dependen del comportamiento de estas variables, y solo pueden cuantificarse al final del proceso.

La información del rendimiento y las variables que inciden en el tienen distintos periodos de frecuencia. El rendimiento puede considerarse de baja frecuencia, ya que solo se obtiene una vez por periodo o campaña agrícola. En contraste, las variables agroclimáticas son de alta frecuencia, considerando que estas pueden observarse de forma recurrente (diaria, mensual, etc.). Por estas razones, el modelo de regresión más adecuado es el modelo de regresión con datos de frecuencia mixta, conocido como modelo de regresión MIDAS (Mixed Data Sampling). Esta técnica permite realizar estimaciones a partir de datos de diferentes frecuencias, donde la variable dependiente es de baja frecuencia y las variables explicativas o regresores son de alta frecuencia. El modelo se especifica como la esperanza de la variable dependiente condicionada a rezagos distribuidos de los regresores (Ghysels, Santa-Clara, and Valkanov, 2004).

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 B(L^{1/m}; \theta) x_t^{(m)} + \varepsilon_t^{(m)} \quad (1)$$

Donde  $y_t$  es observado una vez entre  $t - 1$  y  $t$ , la variable regresora o explicatoria  $x_t^{(m)}$  es observada  $m$  veces en el mismo periodo. Donde  $B(L^{1/m}; \theta) = \sum_{k=0}^K B(k; \theta)L^{k/m}$  y  $L^{1/m}$  es el operador de rezago tal que  $L^{k/m}x_t^m = x_{t-k/m}^m$ , y los coeficientes en  $B(k; \theta)$  correspondientes al operador de rezago  $L^{k/m}$  son parametrizados en función de un vector pequeño de parámetros  $\theta$ . Existen diferentes formas funcionales que imponen restricciones para  $B(L^{1/m}; \theta)$ , entre los principales propuestos por Ghysels, Kvederas y Zemlys (2016) se tienen Polinomio de rezago exponencial de Almon, Beta, Gompertz, Log-Cauchy y Nagakami; pero también la ecuación (1) puede ser estimada directamente por mínimos cuadrados ordinarios sin restricciones sobre los parámetros, a este último se lo conoce como modelo de regresión U-MIDAS, ver Foroni et al. (2011). Para la aplicación en el estudio, la especificación del modelo es la siguiente:

$$y_t = \alpha_0 + B(L)x_{t,s} + \gamma_i + \varepsilon_t \quad (2)$$

La variable  $y_t$  es el rendimiento de un cultivo medido en kilogramos por hectárea (kg/ha) dato que es obtenido al finalizar la campaña (que puede ser de verano o de invierno), y como regresores  $x_t$  se tienen datos promedios mensuales por trimestre de: temperatura (C°), precipitación (mm), evapotranspiración (kg/m<sup>2</sup>), humedad (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>), radiación solar (J/m<sup>2</sup>) y el NDVI. Donde  $B(L)x_{t,s}$  no tiene restricción a los parámetros y es igual a  $\sum_{k=0}^K \beta_k L^k x_{t,s}$ , y  $L^k x_{t,s} = x_{t,s-k}$ . En el modelo completo, considerando que el rendimiento es observado una vez al año y que se tiene información de variables explicatorias correspondientes a cuatro trimestres por gestión  $K = 3$ , el rendimiento es una combinación lineal de  $x_{t,s}$ ,  $x_{t,s-1}$ ,  $x_{t,s-2}$  y  $x_{t,s-3}$ , por tanto requiere la estimación de cuatro coeficientes por cada variable. Para los cultivos de verano se considera los trimestres 3 y 4 del año calendario en el que se hace la siembra y los trimestres 1 y 2 del siguiente año en el que se realiza la cosecha; en cambio, para los cultivos de invierno, se consideran los trimestres 1 al 4, ya que se siembra y cosecha en el mismo año calendario. El término  $\gamma_i$  es el efecto fijo del departamento  $i$ , que permite capturar las posibles características no-observables que generan diferencias entre departamentos; y por último  $\varepsilon_t$  es el termino de error en el periodo  $t$ .

Para evitar predictores (variables y/o rezagos) redundantes en el modelo de regresión (que reduzcan la suma de residuos al cuadrado, dando lugar a predicciones menos sesgadas a costa de una mayor varianza de las predicciones) y por el contrario obtener un modelo más parsimonioso y quedarse únicamente con las variables estadísticamente significativas (Gommes, 2001); se aplica el procedimiento de reducción de variables de Regresión hacia atrás paso a paso (*Stepwise backward regression*), el cual inicia con la estimación de la regresión con todas las variables y sucesivamente elimina variables basados en el valor-p de manera gradual hasta que no queden variables que eliminar, es decir, mantiene las variables estadísticamente significativas dado un valor-p, para este efecto se definió como umbral el valor-p de 0,3 (Chatterjee y Hadi, 2012).

## V. RESULTADOS

### Cultivos de verano

## *Descriptivos*

En el Cuadro N°1, se presentan algunos estadísticos descriptivos del rendimiento de los cultivos de verano y las variables a ser utilizadas como predictoras, en el cuadro se puede observar que el rendimiento promedio nacional de la papa es de 6.167kg/ha, seguido del arroz 3.110kg/ha, maíz 2.786 kg/ha, soya 2.246 kg/ha y por último el trigo con 1.129 kg/ha. En cuanto a las variables predictoras o regresores los valores altos de radiación y humedad se presentan en los cultivos de papa y trigo; en cuanto a la evapotranspiración en arroz y soya; precipitación con gran diferencia en el arroz; y temperatura y NDVI en arroz y soya; esto refleja que los cultivos tienen requerimientos particulares de condiciones climáticas para su desarrollo. Por otra parte, los predictores con mayor variabilidad o dispersión medidos por el coeficiente de variación para los cinco cultivos de análisis se presentan en precipitación y NDVI; los cultivos más amenazados por variaciones en precipitación son la soya (CV entre 0,23 y 0,40 correspondientes al primer y cuarto trimestre) y la papa (CV 0,36 y 0,37 del segundo y cuarto trimestre); en cuanto a variaciones del NDVI la mayor dispersión se presenta en la papa en el tercer y cuarto trimestre (CV de 0,38 y 0,33 respectivamente).

**Cuadro N°1  
ESTADISTICOS DESCRIPTIVOS CULTIVOS DE VERANO, 2019-2023**

Variables	Periodo	Unidad	Arroz			Maíz			Papa			Soya			Trigo		
			Media	Desv. Est.	Coef. Var.												
Rendimiento(1)	Campaña Verano	kg/ha	3.109,90	194,76	0,06	2.786,33	578,11	0,21	6.166,58	857,70	0,14	2.245,62	247,46	0,11	1.129,18	114,30	0,10
Radiación(2)	t1	J/m <sup>2</sup> (En millones)	456,66	28,58	0,06	504,17	25,29	0,05	539,12	17,32	0,03	485,92	23,49	0,05	526,15	18,52	0,04
	t2		384,25	17,76	0,05	404,71	17,99	0,04	485,88	12,04	0,02	387,40	16,07	0,04	468,06	14,32	0,03
	t3		451,39	9,78	0,02	480,53	10,21	0,02	537,62	11,87	0,02	452,32	10,47	0,02	525,62	11,91	0,02
	t4		513,02	47,01	0,09	558,70	43,79	0,08	621,07	39,42	0,06	531,92	44,61	0,08	601,48	40,65	0,07
Evapotranspiración(3)	t1	kg/m <sup>2</sup>	1.228,62	39,25	0,03	1.023,20	47,55	0,05	706,96	38,80	0,05	1.157,40	48,34	0,04	790,31	37,83	0,05
	t2		964,24	32,58	0,03	671,81	55,78	0,08	376,98	31,17	0,08	779,94	76,22	0,10	424,46	30,93	0,07
	t3		917,38	52,86	0,06	462,65	45,43	0,10	343,79	47,28	0,14	530,71	56,46	0,11	337,30	47,89	0,14
	t4		1.078,10	75,64	0,07	722,69	135,19	0,19	540,15	62,09	0,11	699,95	188,69	0,27	568,30	68,86	0,12
Humedad(4)	t1	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	54,45	5,13	0,09	56,90	4,72	0,08	61,58	5,26	0,09	43,09	6,24	0,14	60,04	4,49	0,07
	t2		48,77	5,74	0,12	52,29	6,24	0,12	55,61	2,59	0,05	39,87	7,14	0,18	53,80	2,90	0,05
	t3		37,44	4,26	0,11	42,12	3,40	0,08	44,63	2,27	0,05	33,57	5,22	0,16	42,29	2,29	0,05
	t4		37,96	3,25	0,09	43,48	3,49	0,08	45,41	4,17	0,09	33,44	2,41	0,07	43,86	4,22	0,10
Precipitación(5)	t1	mm	191,28	47,19	0,25	138,18	34,99	0,25	106,86	18,56	0,17	133,57	53,76	0,40	116,66	19,27	0,17
	t2		91,26	25,07	0,27	46,11	15,36	0,33	17,07	6,16	0,36	66,45	21,65	0,33	21,15	6,85	0,32
	t3		47,15	12,37	0,26	21,81	5,22	0,24	10,47	2,27	0,22	39,96	11,58	0,29	13,08	2,60	0,20
	t4		142,78	36,59	0,26	88,58	23,93	0,27	59,40	22,21	0,37	102,21	23,91	0,23	70,09	24,76	0,35
Temperatura(6)	t1	°C	25,22	0,47	0,02	21,46	0,53	0,02	11,10	0,39	0,04	25,95	0,51	0,02	14,13	0,39	0,03
	t2		22,60	0,35	0,02	18,21	0,48	0,03	9,33	0,43	0,05	23,01	0,41	0,02	12,42	0,45	0,04
	t3		23,67	0,78	0,03	19,06	0,79	0,04	9,50	0,57	0,06	24,31	0,85	0,03	12,87	0,62	0,05
	t4		26,26	1,17	0,04	22,31	1,01	0,05	12,03	0,66	0,06	27,13	1,38	0,05	15,13	0,86	0,06
NDVI(7)	t1	Valor entre -1 y 1	0,59	0,10	0,17	0,54	0,10	0,19	0,32	0,07	0,23	0,55	0,09	0,17	0,37	0,09	0,24
	t2		0,58	0,13	0,22	0,50	0,12	0,24	0,29	0,07	0,26	0,49	0,11	0,23	0,32	0,08	0,24
	t3		0,54	0,12	0,23	0,39	0,10	0,25	0,23	0,09	0,38	0,40	0,09	0,22	0,23	0,06	0,25
	t4		0,52	0,10	0,20	0,39	0,10	0,26	0,21	0,07	0,33	0,36	0,08	0,23	0,23	0,07	0,29

Fuente: (1) Instituto Nacional de Estadística, (2) European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, (3) Moderate Imaging Spectroradiometer (MODIS), (4) Soil Moisture Active Passive (SMAP), (5) Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data(CHIRPS), (6) European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, y (7) Imágenes Sentinel 2.

## *Regresión*

En el cuadro N°2 se presentan los resultados de regresiones para el rendimiento de la campaña de verano de los cultivos de arroz, maíz, papa, soya y trigo en función a las variables de radiación, evapotranspiración, humedad, precipitación, temperatura y NDVI; iniciando en los trimestres en los que se siembra o cultiva o cosecha (L\_t3 corresponde a julio, agosto y septiembre; L\_t4 a octubre, noviembre y diciembre) y trimestres en los que se cosecha (t1 a enero, febrero y marzo; t2 a abril, mayo y junio). Para las estimaciones se utilizó un panel de datos balanceado con 5 periodos (2019-2023) y número de departamentos entre 7 y 9 según la presencia del cultivo.

De acuerdo a los resultados obtenidos, en todos los cultivos los modelos son globalmente significativos, y presentan coeficientes de determinación ajustados elevados, desde 89% para el maíz hasta 99% para el arroz, esto indica que los modelos explican en alto grado la variabilidad de los rendimientos reales. A continuación, se hace el análisis de los coeficientes estadísticamente significativos al 5% y su influencia o importancia para el rendimiento considerando los valores de los coeficientes estimados y el grado de dispersión medido por la desviación estándar.

En el caso del cultivo de arroz, se tienen 17 predictores con coeficientes estadísticamente significativas, de las cuales 11 son positivos (a mayor valor de estas, mayor rendimiento), entre los que destacan la temperatura, evapotranspiración y NDVI del tercer trimestre rezagado en un periodo; por el contrario 5 variables tienen coeficientes negativos (a menor valor del predictor mayor rendimiento), siendo el más importante la temperatura del cuarto trimestre rezagado. Estos resultados, señalarían que un buen estado de salud de la vegetación y altas temperaturas en el tercer trimestre correspondiente generalmente al periodo de siembra, seguido de reducción del calor e incremento de la humedad en el cuarto trimestre, conducirán a mejores rendimientos del arroz.

Para el maíz, se tienen 10 predictores estadísticamente significativos, de los cuales 6 tienen relación positiva y 4 negativos. Considerando la variación en el tiempo medido por la desviación estándar y los coeficientes de regresión estimados, la variable que más afecta de forma positiva es la humedad en el tercer trimestre del año rezagado y del segundo trimestre; por el contrario, la variable que afecta negativamente al rendimiento es la evapotranspiración del cuarto trimestre del año anterior. Con ello se puede señalar que para obtener mejores rendimientos en el maíz se requiere más humedad en el momento de la cosecha y una menor evapotranspiración en el periodo de crecimiento.

En cuanto al cultivo de papa, se tienen 8 variables estadísticamente significativas, de las cuales 5 son positivas, y entre estas la que tiene mayor influencia en el rendimiento es la evapotranspiración del tercer y cuarto trimestre del año anterior; y 3 predictores tienen coeficientes negativos, de las cuales la más influyente es la humedad del cuarto trimestre año anterior. Esto indicaría que la papa requiere mayor energía obtenida por la evapotranspiración durante su crecimiento y al momento de la cosecha se requiere una menor humedad.

Para la soya se identificaron 15 predictores estadísticamente significativas, entre ellas 8 con coeficientes positivos, siendo la de mayor importancia la precipitación en el tercer trimestre del año anterior; y 7 con coeficientes negativos, siendo la de mayor influencia la temperatura del tercer trimestre del año anterior. Esto señalaría que el momento más determinante para el rendimiento en el cultivo de soya es la siembra y primera etapa de

su crecimiento, periodo en el cual requeriría una mayor precipitación y humedad, y a su vez menor temperatura.

Finalmente, en el trigo se encontraron 4 predictores positivos, que afecta en bajo grado, siendo la más importante la precipitación del cuarto trimestre año anterior y primer trimestre; por el contrario, solo se tiene un coeficiente negativo correspondiente a la precipitación del tercer trimestre año anterior. Con ello, se puede indicar que el rendimiento del trigo de verano es afectado principalmente por la precipitación requiriendo baja cantidad al momento de la siembra y mayor cantidad en su etapa de crecimiento.

**Cuadro N°2**  
**RESULTADOS DE REGRESIONES PARA EL RENDIMIENTO DE CULTIVOS DE VERANO**

Regresores	Variación Departamental: Rendimientos (kg/ha)				
	Arroz	Maíz	Papa	Soya	Trigo
Constante	-18.383,23 *** (3.562,85)	-9.435,09 (7.528,20)	-39.231,30 ** (12.475,26)	8.026,62 * (2.728,31)	-1190,3 (1.520,26)
radiacion_L_t3	0,00 (0,00)	0,00 * (0,00)	0,00 *** (0,00)	0,00 *** (0,00)	0,00 * (0,00)
radiacion_L_t4	0,00 *** (0,00)	-0,00 * (0,00)			
radiacion_t1			-0,00 * (0,00)	-0,00 ** (0,00)	
radiacion_t2	-0,00 * (0,00)			0,00 * (0,00)	
evap_L_t3	7,14 *** (1,20)		12,72 * (4,53)	2,07 * (0,84)	1,03 * (0,45)
evap_L_t4	0,61 (0,35)	-4,22 *** (1,07)	13,31 *** (3,04)		-0,39 (0,25)
evap_t1	-6,79 *** (0,93)	3,30 * (1,46)		0,62 (0,33)	
evap_t2	7,76 *** (1,46)	-3,77 (2,25)	21,18 *** (3,92)	-4,13 *** (0,80)	
hume_L_t3	-29,83 * (9,03)	70,42 ** (24,20)	101,41 (59,44)		
hume_L_t4	73,23 *** (11,73)		-175,81 * (63,21)	-13,9 (6,94)	
hume_t1	-52,15 *** (7,31)	-34,86 (19,84)	-32,06 (22,43)	-9,29 (6,73)	
hume_t2	37,40 *** (6,37)	81,89 ** (26,60)		29,73 *** (5,98)	-6,03 (4,22)
prec_L_t3	11,25 * (3,70)	29,66 * (10,99)	80,25 * (37,11)	24,31 *** (3,65)	-6,75 * (2,73)
prec_L_t4	-3,80 * (1,23)	-10,31 * (4,73)	9,47 (8,78)		1,97 * (0,76)
prec_t1	3,38 ** (0,72)			2,60 * (0,87)	3,42 *** (0,78)
prec_t2	-4,8 (2,19)	-15,27 * (6,20)		-11,99 *** (2,41)	3,53 (1,78)
temp_L_t3	1.039,90 *** (161,62)			-423,14 ** (104,81)	
temp_L_t4	-530,81 ** (119,88)			-110,90 * (46,30)	
temp_t1			894,55 (641,00)	476,78 ** (121,25)	-52,1 (44,00)
temp_t2	580,86 *** (104,77)		-942,78 * (360,20)	-554,08 *** (114,52)	
ndvi_L_t3	5.047,08 *** (684,77)		-1.453,94 (840,02)		
ndvi_L_t4		2.066,43 * (981,03)		-4.213,90 *** (648,40)	
ndvi_t1	1.164,41 ** (314,64)			1.724,95 ** (383,09)	

Regresores	Variación Departamental: Rendimientos (kg/ha)				
	Arroz	Maíz	Papa	Soya	Trigo
ndvi_t2		1.072,76 (711,99)			
La Paz	-14.565,64 *** (2.123,78)	988,89 * (454,31)	-1.252,87 (3.274,15)	668,22 (1.213,93)	-679,65 * (281,48)
Cochabamba	-14.655,80 *** (2.179,14)	352,39 (316,26)	-2.527,92 (2.108,60)	-269,5 (872,42)	112,77 (117,66)
Oruro		-1.163,89 (727,99)	3.462,17 (2.842,32)		-333,62 (265,97)
Potosí		-988,9 (739,47)	3.572,82 (2.416,32)		-265,03 (209,82)
Tarija	-1.142,20 * (490,66)	2.016,41 *** (401,88)	-2.792,70 * (1.082,36)	130,22 (189,74)	833,50 *** (103,16)
Santa Cruz	-13.272,41 *** (2.423,32)	4.379,71 *** (771,40)	-10.030,54 *** (2.259,31)	3.094,38 * (1.010,64)	1.078,68 * (420,67)
Beni	-17.465,11 *** (2.891,62)	3.512,07 * (1.375,13)	-30.563,43 *** (5.976,93)	3.347,14 * (1.379,75)	-1.212,78 * (549,33)
Pando	-24.318,34 *** (3.534,28)	2.244,01 (1.642,53)		429,63 (1.746,38)	-540,03 (591,12)
N° Observaciones	35	45	40	35	45
R <sup>2</sup> ajustado	0,99	0,89	0,95	0,99	0,95
Estadístico F	120,97	17,53	40,84	164,24	52,61
valor-p	0	0	0	0	0

**Nota:** El periodo de análisis es 2019-2023; errores estándar en paréntesis; significancias \*\*\* p < 0,001, \*\* p < 0,01, \* p < 0,05.

### Pronósticos

De acuerdo al modelo planteado para cultivos de verano, el pronóstico del rendimiento en un periodo adelante requiere información de las variables (temperatura, precipitación, humedad, evapotranspiración, radiación y NDVI) para dos trimestres adelante. Una de las principales ventajas de la información obtenida por teledetección es la oportunidad, la información se actualiza para varias variables en tiempo real o con demora de pocos días. En caso de no tener información de los regresores o tenerlo parcialmente, se puede recurrir a modelos univariados para proyectar los mismos<sup>7</sup> y luego usarlos como insumo para la estimación del rendimiento. Para el presente estudio, se cuenta con información hasta el 1er trimestre, por lo que se recurrió a modelos autorregresivos integrados de media móvil (ARIMA) para el 2do trimestre.

En el Cuadro N°3 se presentan los pronósticos para los cultivos de verano analizados, utilizando los regresores determinados para el periodo de pronóstico y aplicándolos a los modelos de regresión obtenidos. Se proyecta que en la campaña de verano 2023-2024 el rendimiento de la papa será de 6.815 kg/ha con un crecimiento del 31,4 por ciento alcanzado niveles cercanos a los del 2019, esto debido a la recuperación de las precipitaciones en las áreas con cultivos de papa, que en el cuarto trimestre crecieron en un 118% y aumentos de la evapotranspiración del 23 por ciento. De igual forma se espera que el trigo tenga un rendimiento de 1.186 kg/ha con un aumento del 7,7 por ciento, explicado también por el incremento de 85,5 por ciento de precipitación. Por el contrario, se proyecta que la soya tenga un rendimiento de 1.889 kg/ha, inferior en 8,7 por ciento respecto a la campaña anterior, debido a reducciones en precipitaciones en las áreas con soya de 36,3 por ciento en el tercer trimestre de la gestión 2023 y caída del 57,4 en el primer trimestre del 2024.

<sup>7</sup> Puesto que las variables agroclimáticas, presentan estacionalidad marcada, los pronósticos univariados pueden brindar pronósticos confiables para dichas variables.

Dado que los modelos de regresión presentan un alto grado de ajuste y los predictores que más influyen en los pronósticos cuentan con información observada al primer trimestre, se espera que estos resultados no presenten cambios significativos cuando se incorpore la información del segundo trimestre, o se sitúen en los márgenes de los límites de confianza.

**Cuadro N°3**  
**BOLIVIA: PRONÓSTICO DE RENDIMIENTOS DE PRINCIPALES CULTIVOS DE**  
**VERANO, 2019-2024**  
**(En kilogramos por hectárea)**

Cultivo	2018-2019	2019-2020	2020-2021	2021-2022	2022-2023(p)	2023-2024(e)			Cre. Est. (%)
						Est.	Lím. Inf.	Lím. Sup.	
Arroz con cáscara	3.217	2.772	3.091	3.006	3.274	3.348	2.660	4.036	2,2
Maíz en grano	2.146	2.390	3.124	2.429	2.573	2.579	1.727	3.432	0,2
Papa	6.754	6.830	6.014	5.785	5.186	6.815	4.873	8.757	31,4
Soya	2.105	2.100	2.654	2.427	2.068	1.889	1.168	2.609	-8,7
Trigo	1.201	1.192	1.205	1.071	1.101	1.186	983	1.389	7,7

**Fuente:** Elaboración propia.

**Nota:** los intervalos inferior y superior corresponden a un nivel de confianza del 95 por ciento.

### Cultivos de invierno

#### *Descriptivos*

En el siguiente cuadro, se presentan algunos estadísticos descriptivos del rendimiento de los principales cultivos de invierno y las variables predictoras; se ha considerado un análisis correspondiente a los trimestres 2, 3 y 4 para siembra y cosecha de cultivos de invierno, en el periodo 2019-2023. El rendimiento promedio de la papa es de 10.809 kg/ha superior al de la campaña de verano, maíz 2.121 kg/ha, soya 2.038 kg/ha, arroz 1.640 kg/ha y el trigo 1.598 kg/ha. En cuanto a los predictores, no se observan diferencias significativas en los niveles de radiación solar son similares en todos los cultivos; los niveles más altos de evapotranspiración se presentan en el arroz y la soya; humedad en arroz y papa; precipitación y NDVI principalmente en el arroz; y respecto a la temperatura la papa presenta el nivel más bajo. Respecto a las medidas de dispersión el maíz es el que presenten mayor variabilidad con un coeficiente de variación del 0,21, seguido de la papa con 0,14; por otra parte, los predictores con mayor variabilidad son la precipitación y NDVI, y esta variabilidad se presenta más en el trigo, la soya y el maíz.

**Cuadro N°4  
ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS CULTIVOS DE INVIERNO, 2019-2023**

Variables	Periodo	Unidad	Arroz			Maíz			Papa			Soya			Trigo		
			Media	Desv. Est.	Coef. Var.	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.	Coef. Var.	Media	Desv. Est.	Coef. Var.	Media	Desv. Est.		
Rendimiento	Campaña Verano	kg/ha	1.639,88	157,42	0,10	2.120,94	375,74	0,18	10.809,11	2.508,46	0,23	2.037,73	206,74	0,10	1.598,25	265,87	0,17
Radiación	t1	J/m <sup>2</sup> (En millones)	452,94	25,09	0,06	478,88	24,09	0,05	488,48	22,35	0,05	460,70	27,00	0,06	486,47	23,51	0,05
	t2		401,22	16,24	0,04	388,02	16,12	0,04	399,25	16,14	0,04	384,75	17,46	0,05	382,27	15,73	0,04
	t3		471,75	9,25	0,02	452,63	10,20	0,02	460,50	6,00	0,01	448,44	9,60	0,02	446,05	10,70	0,02
	t4		511,99	42,39	0,08	526,93	44,68	0,08	538,38	43,21	0,08	515,15	45,98	0,09	530,96	44,88	0,08
Evapotranspiración	t1	kg/m <sup>2</sup>	1.196,32	34,65	0,03	1.176,03	40,93	0,03	1.081,32	33,13	0,03	1.202,04	33,80	0,03	1.159,98	59,27	0,05
	t2		1.025,71	28,66	0,03	813,85	66,36	0,08	743,58	42,32	0,06	867,58	51,96	0,06	769,02	87,71	0,11
	t3		1.000,29	39,97	0,04	606,71	58,00	0,10	611,83	42,76	0,07	743,90	78,84	0,11	491,35	60,42	0,12
	t4		1.116,21	54,50	0,05	770,03	162,81	0,21	843,48	109,71	0,13	918,59	123,63	0,13	652,63	205,75	0,32
Humedad	t1	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	68,36	5,25	0,08	45,98	5,99	0,13	62,43	5,21	0,08	52,54	6,47	0,12	39,91	7,10	0,18
	t2		63,01	6,64	0,11	42,39	6,85	0,16	56,94	6,19	0,11	48,61	6,71	0,14	37,16	7,56	0,20
	t3		47,11	3,97	0,08	35,26	5,18	0,15	47,26	3,22	0,07	40,14	5,32	0,13	31,76	5,64	0,18
	t4		48,46	4,55	0,09	34,98	2,43	0,07	48,14	4,16	0,09	38,44	2,04	0,05	31,24	2,56	0,08
Precipitación	t1	mm	226,85	35,04	0,15	143,00	52,76	0,37	149,76	44,42	0,30	152,65	49,79	0,33	123,71	53,88	0,44
	t2		94,23	25,40	0,27	71,51	22,23	0,31	48,91	16,40	0,34	84,12	25,84	0,31	62,28	21,58	0,35
	t3		47,18	14,35	0,30	41,82	11,99	0,29	27,45	5,31	0,19	45,72	12,84	0,28	40,14	12,33	0,31
	t4		164,37	40,71	0,25	109,88	25,92	0,24	97,10	28,96	0,30	117,42	29,77	0,25	101,83	23,72	0,23
Temperatura	t1	°C	25,38	0,43	0,02	25,81	0,49	0,02	19,03	0,41	0,02	25,65	0,48	0,02	25,91	0,52	0,02
	t2		23,39	0,34	0,01	23,00	0,39	0,02	16,25	0,47	0,03	22,90	0,35	0,02	22,90	0,40	0,02
	t3		24,77	0,85	0,03	24,27	0,83	0,03	16,62	0,63	0,04	24,08	0,78	0,03	24,17	0,83	0,03
	t4		26,55	1,13	0,04	27,00	1,35	0,05	19,63	0,84	0,04	26,81	1,28	0,05	27,10	1,42	0,05
NDVI	t1	Valor entre -1 y 1	0,60	0,09	0,16	0,56	0,09	0,17	0,48	0,29	0,60	0,56	0,09	0,17	0,55	0,10	0,18
	t2		0,62	0,14	0,23	0,50	0,11	0,23	0,53	0,13	0,24	0,48	0,10	0,21	0,48	0,11	0,22
	t3		0,58	0,13	0,23	0,42	0,09	0,22	0,44	0,12	0,28	0,45	0,10	0,21	0,39	0,09	0,23
	t4		0,56	0,11	0,20	0,38	0,08	0,21	0,38	0,27	0,70	0,42	0,08	0,20	0,34	0,08	0,24

Fuente: (1) Instituto Nacional de Estadística, (2) European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, (3) Moderate Imaging Spectroradiometer (MODIS), (4) Soil Moisture Active Passive (SMAP), (5) Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data(CHIRPS), (6) European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, y (7) Imágenes Sentinel 2.

## Regresión

En el cuadro N°5, se tienen los resultados del análisis de regresión para los cinco cultivos de análisis, el periodo de análisis es del 2019 al 2023, sin embargo, existe diferencia en los trimestres de referencia, respecto a la campaña de verano para la campaña de invierno se contemplan el segundo, tercer y cuarto trimestre de la misma gestión, lo que implica que se siembra y cosecha en el mismo año. Otra distinción importante respecto a la campaña de verano es que son menos las áreas y cultivos que se producen en invierno, y por tanto hay menor presencia de cultivos de invierno en los departamentos, afectando así el nivel de observaciones. Según los resultados encontrados, en todos los cultivos los modelos de regresión son globalmente significativos y presentan coeficientes de bondad de ajuste elevados entre 85% para el trigo y 96% para el arroz.

De acuerdo a los coeficientes estadísticamente significativos al 5% de las regresiones para los cultivos de invierno y considerando la variabilidad de los predictores medidos por la desviación estándar, el arroz requiere una mayor evapotranspiración y menor temperatura al momento de la siembra y mayores temperaturas en invierno. Para el cultivo de maíz, el predictor con más influencia en el rendimiento es la humedad, con relación negativa en el segundo trimestre y positivo para el tercer y cuarto trimestre. En la papa los predictores con mayor efecto son la humedad con relación positiva en el segundo trimestre y la precipitación del cuarto trimestre, pero con coeficiente negativo, es decir, una menor precipitación está asociado con mayor rendimiento. En cuanto a la soya los coeficientes son negativos para la precipitación del tercer trimestre y el NDVI del segundo trimestre, y presenta valores positivos para el NDVI del cuarto trimestre. Por último, en el trigo, las variables con más influencia positiva son la evapotranspiración del segundo trimestre, la humedad del tercer trimestre y NDVI del cuarto trimestre; en cambio el rendimiento presenta relación negativa con la precipitación.

**Cuadro N°5**  
**RESULTADOS DE REGRESIONES PARA EL RENDIMIENTO DE CULTIVOS DE INVIERNO**

Regresores	Variación Departamental: Rendimientos (kg/ha)				
	Arroz	Maíz	Papa	Soya	Trigo
Constante	51.88 (3.188,33)	369.76 (990,46)	31.865,37 (23.484,71)	1.688,43 *** (307,21)	-13.674,68 *** (3.288,30)
radiacion_t2	0,00 (0,00)				0,00 *** (0,00)
radiacion_t3	-0,00 * (0,00)		0 (0,00)		0 (0,00)
radiacion_t4	-0,00 ** (0,00)		-0,00 * (0,00)		
evap_t2	4,49 * (1,56)	-2.01 (1,19)			1.46 (0,77)
evap_t3	-4,04 **		-28,32 *		

Regresores	Variación Departamental: Rendimientos (kg/ha)				
	Arroz	Maíz	Papa	Soya	Trigo
evap_t4	(1,24)		(13,67)		
hume_t2		-25.44 (14,54)	113.23 (102,09)		
hume_t3		34,09 * (14,59)			67,76 *** (16,25)
hume_t4		9.96 (9.17)			36,99 * (14,33)
prec_t2	-3.67 (1,81)	7,15 ** (2,32)			-10,00 ** (3,35)
prec_t3				-5.34 (2,96)	-18,55 * (7,05)
prec_t4			-83,95 * (35,36)		-3.8 (2,48)
temp_t2	-360,99 * (156,68)				
temp_t3	666,03 *** (143,63)	88.07 (77,17)	-3.082,07 (1.648,40)		-232,51 * (105,21)
temp_t4			1.521,56 (996,08)		84.86 (70,65)
ndvi_t2	-3.293,66 * (1.270,95)		12.880,18 * (5.502,85)	-1.955,78 * (839,60)	
ndvi_t3	4.905,82 ** (1.437,55)		-2.409,15 (1.457,48)		
ndvi_t4				2.224,06 (1.084,83)	3.820,46 *** (724,46)
Dep. base	(La Paz)	(Chuquisaca)	(Chuquisaca)	(La Paz)	(Chuquisaca)
La Paz		-783.09 (914,97)	9.488,26 (5.941,75)		95.21 (636,02)
Cochabamba	2.095,86 ** (518,67)	71.57 (867,78)	16.168,91 * (6.577,85)	-234.42 (121,21)	950,59 ** (287.25)
Oruro			-21.715,52 ** (7.671,32)		
Potosí		-171.33 (323,81)	-1.0961,88 (5.722,60)		34.76 (379,46)
Tarija		832,55 * (310,59)	2.592,57 (4.043,80)	743,16 ** (216,24)	2.251,04 ** (755,40)
Santa Cruz	1.157,57 ** (290,22)	280 (1.051,84)	18.672,57 * (8.523,13)	524,96 ** (141,29)	5.890,85 *** (1.372,10)
Beni	791,15 ***	-663.76	30.698,33	542,53 ***	3.032,50 *

Regresores	Variación Departamental: Rendimientos (kg/ha)				
	Arroz	Maíz	Papa	Soya	Trigo
Pando	(148,34) 285,33 (209,55)	(1.148,80) 501.98 (1.152,40)	(17.168,38)	(142,04) -1502,98 *** (130,60)	(1.117,41)
N° Observaciones	25	40	40	30	35
R <sup>2</sup> ajustado	0.96	0.85	0.86	0.94	0.85
Estadístico F	41.23	18.38	15.76	62.05	12.73
valor-p	0	0	0	0	0

**Nota:** El periodo de análisis es 2019-2023; errores estándar en paréntesis; significancias \*\*\* p < 0,001, \*\* p < 0,01, \* p < 0,05; los efectos fijos tienen diferente departamento base de comparación.

### Pronósticos

Según los periodos de siembra y cosecha, el pronóstico del rendimiento un periodo adelante de la campaña de invierno requiere información de los regresores por tres trimestres adelante. Para el presente estudio las proyecciones de los regresores para pronosticar el rendimiento la campaña de invierno 2024, al no estar disponibles la información proveniente de teledetección, fueron obtenidos por modelos ARIMA. En el Cuadro N°6 se muestran los pronósticos obtenidos, en el mismo se observa que se espera una reducción del rendimiento del arroz del 41 por ciento alcanzado a 1.2987 kh/ha, esta caída por una parte se explica por el elevado rendimiento de la gestión 2023 y por otra parte por las reducciones proyectadas en temperatura y NDVI. En la papa también se espera una caída del rendimiento del 25 por ciento, que podrán deberse a caídas en NDVI, temperatura y humedad. En cambio, se esperan crecimientos positivos para el maíz del 17,8 por ciento por aumento de la humedad en el cuarto trimestre, soya 10 por ciento por aumentos en precipitación en el tercer trimestre y NDVI en el cuarto trimestre, y trigo 6 por ciento por aumentos esperados en precipitación en el tercer trimestre y humedad en el cuarto trimestre.

**Cuadro N°6**  
**BOLIVIA: PRONOSTICO DE RENDIMIENTOS DE PRINCIPALES CULTIVOS DE INVIERNO, 2019-2024**  
**(En kilogramos por hectárea)**

Cultivo	2019	2020	2021	2022	2023(p)	2024(e)			Cre. Est. (%)
						Est.	Lím. Inf.	Lím. Sup.	
Arroz con cáscara	1.689	1.737	1.730	1.707	2.197	1.297	932	1.662	<b>-41,0</b>
Maíz en grano	1.873	2.826	2.348	1.907	1.921	2.262	1.996	2.528	<b>17,8</b>
Papa	11.322	12.690	12.192	10.242	10.372	7.752	4.682	10.823	<b>-25,3</b>
Soya	2.226	1.979	2.029	1.838	1.829	2.012	1.795	2.229	<b>10,0</b>
Trigo	1.705	1.947	1.656	1.366	1.631	1.730	1.454	2.006	<b>6,0</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

**Nota:** los intervalos inferior y superior corresponden a un nivel de confianza del 95 por ciento.

Las estimaciones de la campaña de invierno para la gestión 2024 son referenciales, debido a que al no contar con observaciones de las variables predictoras, las mismas se basan en proyecciones, incorporando así al error en la predicción del rendimiento, los errores de predicción de los regresores. No obstante, ayuda a contar con una proyección base, misma que se deberá actualizar en la medida que se cuente con información observada de los predictores.

## **VI. CONCLUSIONES**

La producción agrícola es una actividad económica con un alto grado de incertidumbre, debido a que su proceso de producción abarca varios meses y, el rendimiento obtenido al final del mismo, es altamente dependiente de las condiciones climáticas que se presentan en ese proceso, desde la siembra hasta la cosecha. Los niveles de producción a obtenerse en una campaña agrícola, solo pueden ser observados o medidos al finalizar la cosecha, y con ello posteriormente determinar la disponibilidad de este producto y la suficiencia para cubrir la demanda interna (consumo humano, uso en la industria, etc.) y calcular el déficit o exceso de producción. Por estas características en el proceso de la producción agrícola, y considerando que el levantamiento de información sobre las estadísticas de los niveles de producción de una campaña determinada, se presenta demoras en su consolidación y están disponibles generalmente con una campaña agrícola de demora o retraso. Por tanto, no son oportunas para la toma de decisiones de política en diferentes ámbitos como el comercio exterior (exportación o importación) y el abastecimiento de alimentos a la población en el mercado interno.

Aprovechando que la información sobre las condiciones climáticas a diferencia de la producción, si están disponibles de forma oportuna y recurrente, además de utilizar modelos de regresión con datos mixtos del tipo sin restricciones, fue posible estimar el rendimiento para algunos cultivos importantes: arroz, maíz, papa, soya y trigo; tanto para la campaña de verano como para invierno. Además de identificar las variables que más influyen y explican los resultados obtenidos. Los modelos determinados son estadísticamente significativos y tienen bondades de ajustes entre el 89 y 99 por ciento para los cultivos de verano, y entre 85 y 96 por ciento para los cultivos de invierno. Con información agroclimática y NDVI observada al primer trimestre del 2024 (correspondiente al 75 por ciento de información observada de variables agroclimáticas y NDVI), se espera que al finalizar la campaña de verano 2023-2024 se obtengan crecimientos positivos para la papa (31,4%), trigo (7,7%), arroz con cáscara (2,2%) y maíz en grano (0,2%); y por el contrario una caída en el rendimiento de la soya (7,7%) esto explicado principalmente por la reducción de precipitación de 36,3% en el tercer trimestre de la gestión 2023 y del 57,4 % en el primer trimestre del 2024. También se hicieron estimaciones para la campaña de invierno con proyecciones de las variables explicativas que son de carácter referencial pero que pueden servir de escenario base; y a medida que se incorpore información observada los pronósticos serán más precisos.

La estimación realizada por este estudio e información observada de manera preliminar sobre los rendimientos en la campaña agrícola de verano 2023-2024, nos muestran lo siguiente: En el caso de la soya, se tiene comportamiento similar de caída de este indicador (estudio -7% y dato observado -9%), por lo que se debe prever que la disponibilidad de este producto se verá afectado, lo que podría limitar su abastecimiento en el mercado interno (producción de aceites y sus derivados como torta y harinas que se emplea como alimento balanceado), además de una posible reducción de las exportaciones, toda vez que en gran medida los productos derivados de este cultivo se destinan al mercado externo. Por el contrario, en el caso de la papa (estudio 31% y dato observado 19%), se puede señalar que el rendimiento tendrá un incremento, lo que permitiría el abastecimiento normal a la población en el mercado interno. En el resto del rendimiento de los otros cultivos, se podrá contrastar una vez se cuente con mayor información. Habiendo contrastado los resultados de la estimación realizada por este estudio con datos observados de carácter preliminar, se evidencia que existe coincidencia en la tendencia del comportamiento del indicador, lo que permite señalar que la metodología empleada en este estudio brinda información útil para los tomadores de decisiones en cuanto a políticas o acciones oportunas en este sector.

Por otro lado, el estudio nos muestra que la presencia de Fenómenos de El Niño y La Niña, viene alterado significativamente el comportamiento de las variables climáticas fundamentales, como la temperatura, precipitaciones, humedad, evapotranspiración, entre otros, además de la frecuencia e intensidad de fenómenos extremos que en promedio en la gestión 2023, la temperatura se incrementó en 5%, precipitación 13%, humedad 7%, etc. respecto al 2022. Estos cambios tienen implicancias directas en el desempeño de la agricultura de aquí en adelante, por lo tanto, obliga a este sector productivo a adaptarse, implementando técnicas como el riego eficiente, el desarrollo de variedades de cultivos resistentes, y la planificación basada en pronósticos climáticos precisos para enfrentar la variabilidad de estos patrones climáticos como el que presenta este documento.

Entre las limitaciones que se tuvo en el estudio es la diferencia en la amplitud de serie histórica de las variables que se requiere para la aplicación de la metodología como el caso del NDVI las imágenes Sentinel 2 sólo están disponibles desde el 2019 y de humedad que proviene de SMAP (Soil Moisture Active Passive) desde el 2015; otra limitación fue la disponibilidad de información del rendimiento que únicamente se cuenta a nivel agregado por departamento. Finalmente, es necesario señalar que la producción depende tanto del rendimiento como de la superficie cultivada, por lo que caídas en rendimiento no se traducen directamente en reducción de producción ya que la misma puede ser compensada con la ampliación de la superficie cultivada; por lo que es necesario construir también un modelo para la estimación de la superficie y de esta manera cuantificar cabalmente la producción agrícola.

## BIBLIOGRAFÍA

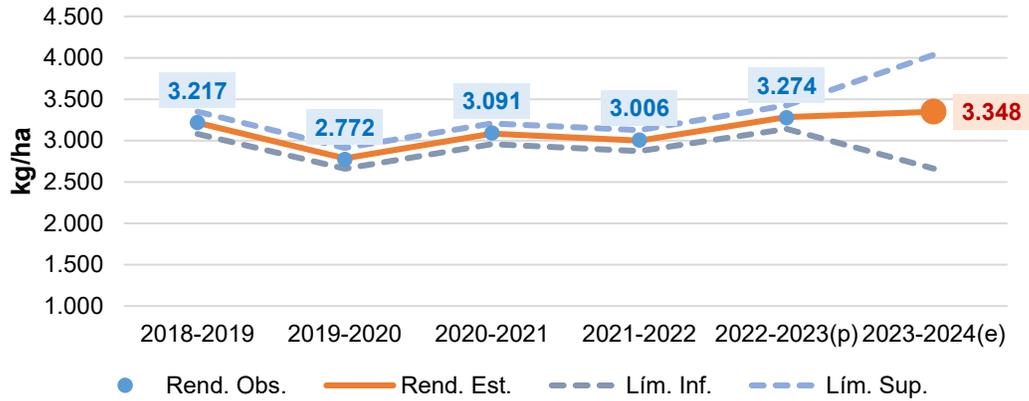
- Chatterjee, S. and Hadi, A. (2012). *Regression Analysis by Example*. Fifth Edition. A John Wiley & Sons, Inc.
- Alcaraz, A.; Muñoz, G.; Egas, J. J.; Paolo de salvo, C. & Lima, E. (2020). *Análisis de Políticas Agropecuarias en Bolivia*. BID.
- Bazgeer, S; Fadavi, Gh. & Hossainy, S.M. (2014). *Satistical Modelling for Cotton Yield Estimation Using Agricultural Climate Indices (A Case Study of Gharakhil District in Mazandaran Province, Iran*. *Research Journal of Environmental Sciences* 8(2).
- Bocco, M.; Sayago, S.; Violini, S. & Willington, E. (2015). *Modelos Simples para Estimar Rendimiento de Cultivos Agrícolas a partir de Imágenes Satelitales: Una Herramienta para la Planificación*. STS 2015, 2° Simposio Argentino sobre Tecnología y Sociedad.
- Brouwer, C. & Heibloem M. (1986). *Irrigation Water Management: Irrigation Water Needs*. FAO. Rome, Italy.
- Clavijo, A. (2022). *Productividad Agraria en Bolivia: Evaluación de Impacto del Crédito y la Asistencia Técnica mediante Propensity Score Matching*. *Revista de Investigación Aplicada de Economía Social y Desarrollo* N°1.
- Cortez, J. C. O. (2016). *Los Rendimientos de Cultivos y la Agricultura en el Estado Plurinacional de Bolivia*. *Apthapi* 2(2): 36-46.
- Cunha, R. L. F. & Silva, B. (2020). *Estimating Crop Yields With Remote Sensing and Deep Learning*. ISPRS, Volume IV-3/W2-2020. Santiago, Chile.
- FMI (2017). *Manual de Cuentas Nacionales Trimestrales*. Edición 2017. Washington, EE.UU.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2016). *Crop Yield Forecasting: Methodological and Institutional Aspects*. Rome, FAO.
- Foroni, C.; Marcellino, M. & Schumacher C. (2011). *U-MIDAS: MIDAS Regression With Unrestricted Lag Polynomial*. Discussion Paper Series 1: Economic Studies N°35/2011.
- Ghysels, E.; Kvedaras, V. & Zemlys, V. (2016). *Mixed Frequency Data Sampling Regression Models: The R Package midsr*. *Journal of Statistical Software*. Volume 72, Issue 4.
- Ghysels, E.; Santa-Clara, P. & Valkanov, R. (2004). *The MIDAS Touch: Mixed Data Sampling Regression Models*. Working paper, UNC and UCLA.
- Ghysels, E.; Sinko, A. & Valkanov, R. (2006). *The MIDAS Regressions: Further Results and New Directions*. Working paper, UNC and UCSD.
- Gomme René (2001). *An Introduction to the Art of Agrometeorological Crop Yield Forecasting Using Multiple Regression*. Dhaka, FAO.
- INE (2013). *Manual de Jefe(a) de Brigada y Empadronadores*.
- Johnson, D.M.; Rosales, A.; Mueller, R.; Reynolds, C.; Frantz, R.; Anyamba, A.; Pak, E. & Tucker, C. (2021). *USA Crop Yield Estimation with MODIS NDVI: Are Remotely Sensed Models Better than Simple Trend Analyses?* *Remote Sens.*
- Kukal, M. & Irmak, S. (2018). *Climate-Driven Crop Yield and Yield Variability and Climate Change Impacts on the U.S. Great Plains Agricultural Production*. *Scientific Reports* (2018) 8:3450.
- Mohammed, J. (2021). *Environmental Temperature and Crop Production*. *Agro-Hydrometeorology*-Chapter 3.
- OECD/FAO (2023). *OECD-FAO Agricultural Outlook 2023-2032*. OECD Publishing, Paris

- Raj, E. E.; Ramesh K. V. & Rajkumar, R. (2018). Modelling the Impact of Agrometeorological Variables on Regional Tea Yield Variability in South Indian Tea-growing Regions: 1981-2015. *Cogent food & agriculture* (2019), 5: 1581457.
- Ren, X.; He, H.; Zhang, L. & Yu, G. (2018). Global Radiation, Photosynthetically Active Radiation, and the Diffuse Components Dataset of China, 1981-2010. *Earth Syst. Sci. Data Discuss.*
- Wang, Y.; Zhang, Y.; Yu, X.; Jia, G.; Liu, Z.; Sun, L.; Zheng, P. & Zhu, X. (2021). Grassland Soil Moisture Fluctuation and Its Relationship with Evapotranspiration. *Ecological Indicators* 131 (2021) 108196.
- World Meteorological Organization (2010). *Guide to Agricultural Meteorological Practices*. Geneva, Switzerland.
- World Meteorological Organization (2010). *Agricultural Meteorological Practices*. WMO-N°134.
- Zhu, X.; Guo, R.; Liu, T. & Xu, K. (2021). Crop Yield Prediction Based on Agrometeorological Indexes and Remote Sensing Data. *Remote Sens.* 2021, 13, 2016.

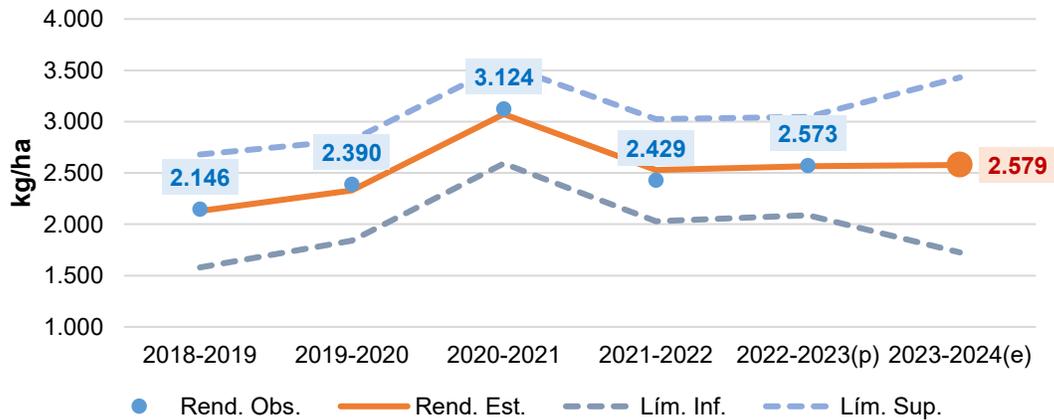
## ANEXOS

### BOLIVIA: PRONÓSTICO DE RENDIMIENTOS DE PRINCIPALES CULTIVOS DE VERANO, 2019-2024 (En kilogramos por hectárea)

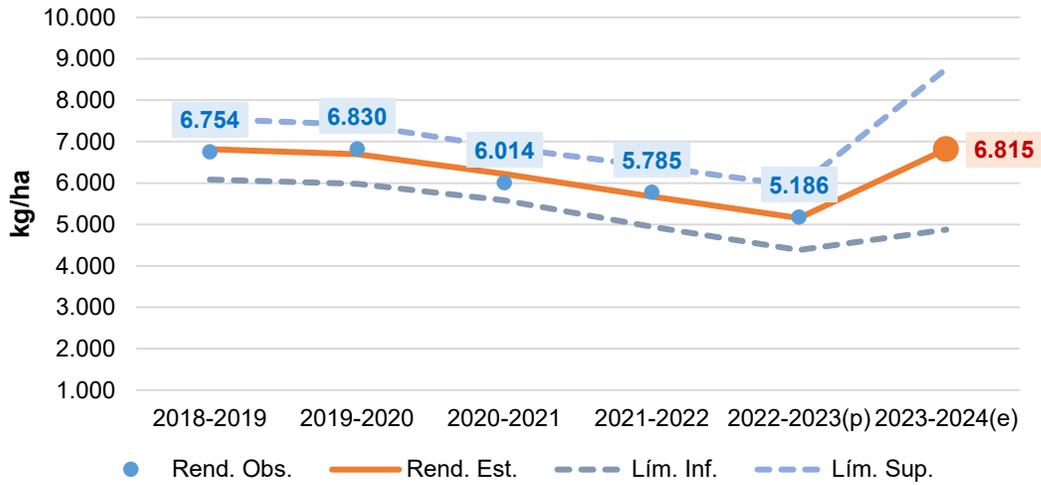
#### Arroz Verano



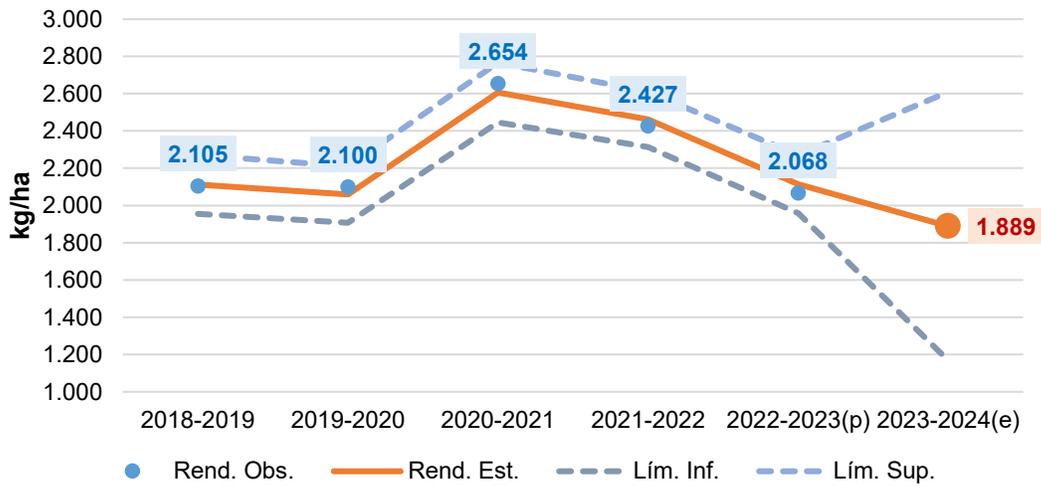
#### Maíz Verano



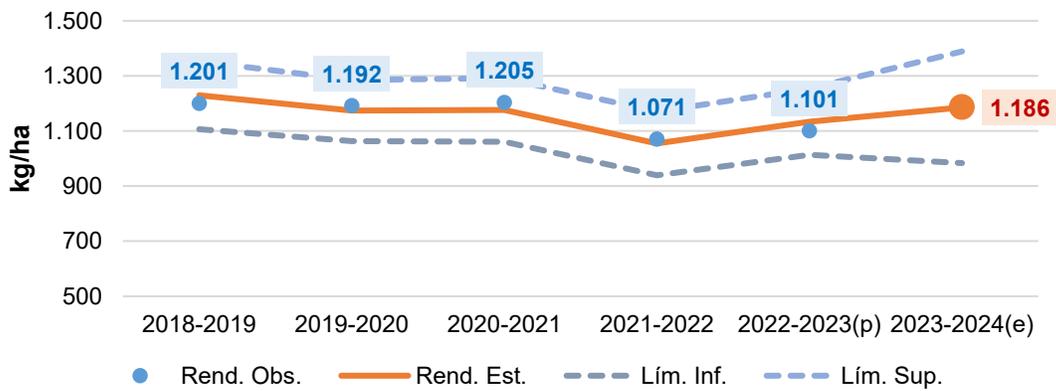
### Papa Verano



### Soya Verano



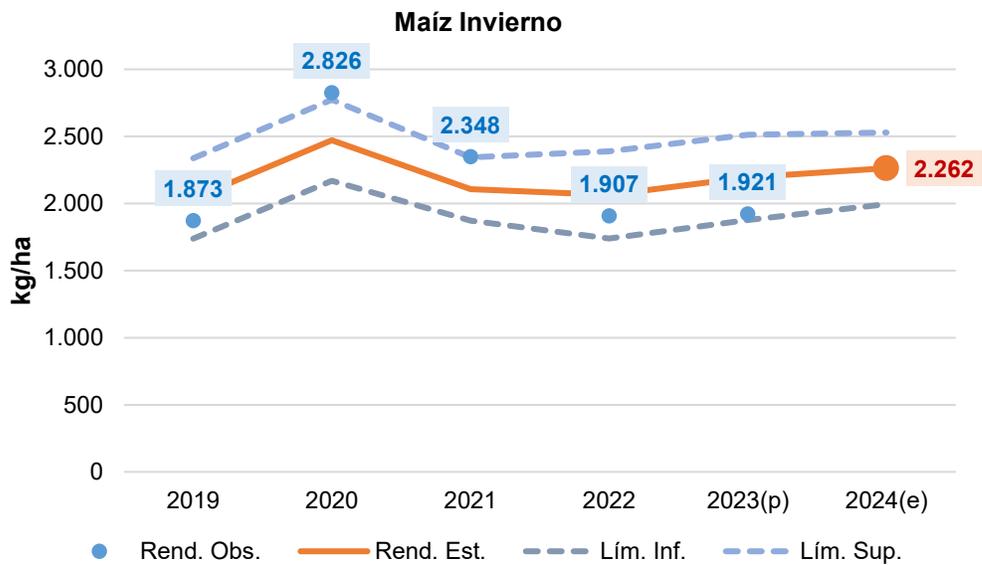
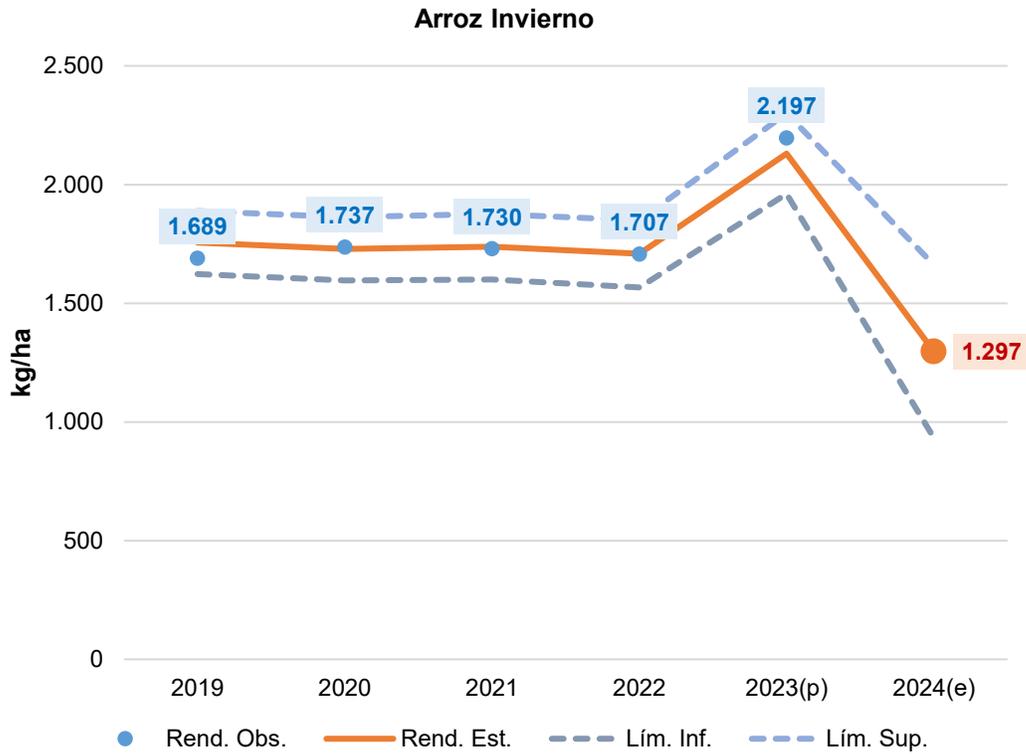
### Trigo Verano

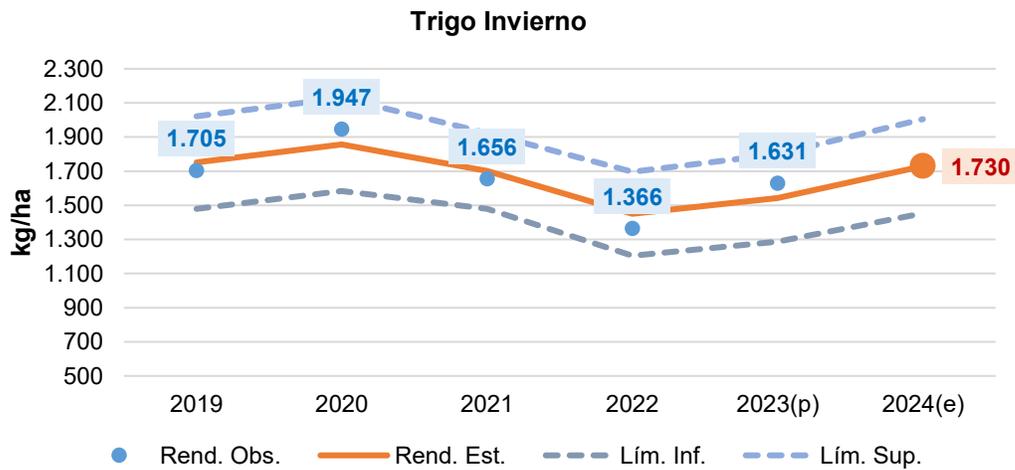
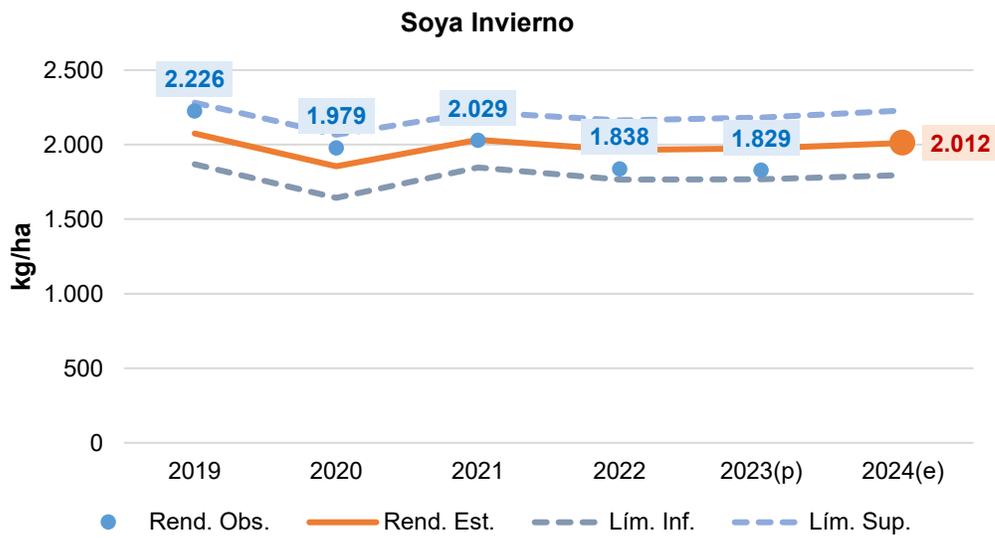
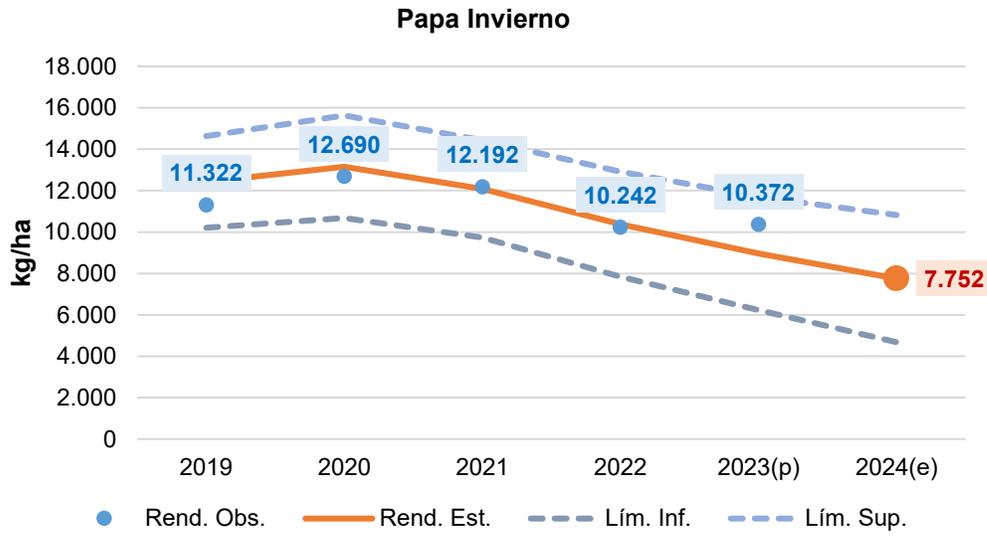


Fuente: Elaboración propia.

## ANEXOS

### BOLIVIA: PRONOSTICO DE RENDIMIENTOS DE PRINCIPALES CULTIVOS DE INVIERNO, 2019-2024 (En kilogramos por hectárea)





Fuente: Elaboración propia.