

RELACIÓN ENTRE UN ÍNDICE DE VEGETACIÓN SALUDABLE (NDVI) Y LA PRODUCTIVIDAD DEL TRIGO CON MÉTODOS DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN

RELATIONSHIP BETWEEN A HEALTHY VEGETATION INDEX (NDVI) AND THE PRODUCTIVITY OF WHEAT WITH PRECISION AGRICULTURE METHODS

Sr. Alfonso Sepúlveda Rivera¹

RESUMEN

La agricultura crece a pasos agigantados, es por esto que la tecnología se ha hecho parte en los últimos años de cooperar mediante sistemas de información geográfica (SIG), monitores de rendimiento enlazados con sistemas GPS, que aportan información de la cosecha en forma automática y en tiempo real, sistemas autónomos de aportes de nutrientes e hídricos, a todos estos sistemas integrados se les denomina Agricultura de Precisión (en adelante AP). En este estudio se analizaron diferentes variables que influyen en la producción de la cosecha del trigo, cuyo objetivo específico es determinar SI existe o NO, una relación entre un alto índice de vigorosidad, calculado mediante el método NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), y su productividad total, todo esto mediante diversos controles como el de “peso hectolitro” del trigo, análisis de pendientes (de existir), niveles de clorofila entre otros, utilizando imágenes multispectrales, obtenidas con el uso de Drones o RPAS y también imágenes satelitales a modo de comparación en la precisión del cálculo. El lugar de estudio se encuentra en la comuna de Yungay específicamente en el predio agrícola del INIA denominado “La Greda”, su punto central se encuentra en las coordenadas UTM 765153.22 m E y 5883174.89 m S Huso 18 Sur, posee un radio de 470 m con un total de 64 ha utilizables aproximadamente. Corresponde a una zona agroecológica de la precordillera andina, el área posee un clima Templado Mesotermal Inferior, Estenotérmico Mediterráneo Sub-húmedo (Santibañez F. y Uribe J.M, 1993).

ABSTRACT

Our agriculture is growing by leaps and bounds, this is why technology has become part of in recent years to cooperate using geographic information systems (GIS), performance monitors linked with GPS systems, that provide harvest information automatically and in real time, autonomous systems of nutrient inputs and water resources, all these integrated systems are referred as Precision Agriculture (AP). For the reason described above, along this study different variables that influence the wheat crop production were processed, with the specific objective of identifying if there IS or NOT a relationship between a high vigor index, calculated using the NDVI method (*Normalized Difference Vegetation Index*), with its total productivity all this made through diverse controls such as wheat hectoliter weight, using multispectral images, compiled by RPAS Drones or satellite images as well as satellite images in order to compare the calculation precision. The study place is located in the municipality of Yungay, specifically the INIA agricultural area of study named “La Greda”, its central point is located in coordinates UTM 765153.22 m E and 5883174.89 m S Huso 18 South, it has a ratio of 470 m with a total of 64 ha. usable approximately. It corresponds to an agro-ecological zone in the Andes premountain range; the area has a template climate, inferior mesothermal, stenothermic Mediterranean sub-humid (Santibañez F. y Uribe J.M, 1993).

Palabras Claves: Agricultura de Precisión, trigo, Drones-RPAS, multispectral, NDVI
Keywords: Precision Agriculture, Wheat, Drones-RPAS, Multispectral, NDVI.

¹Escuela Ciencias de la Tierra, Universidad Bernardo O’Higgins. assepulvedar@gmail.com.

INTRODUCCIÓN

En la presente investigación se demostrará si existe una relación entre una producción en la cosecha del trigo y su respectivo índice de vegetación saludable obtenido mediante métodos de agricultura de precisión.

En Chile la agricultura es uno de los pilares fundamentales para la economía, la cual lleva décadas en búsqueda de nuevos métodos que le permitan obtener mayores rendimientos en todos sus ámbitos. Es por esto que se está avanzando en la llamada "AP". Esta está basada principalmente en métodos de percepción remota y en los sistemas globales de navegación por satélites (GNSS, por sus siglas en inglés) cuyas órbitas ya son perfectamente conocidas y al determinar las distancias hacia los satélites, se obtiene la posición del usuario sobre la superficie terrestre, algunos ejemplos de GNSS son: el (GPS), Sistema de Posicionamiento Global proporcionado por el departamento de defensa de Estados Unidos, el (GLONASS) sistema ruso iniciado en la Unión Soviética, (GALILEO) sistema europeo, (COMPASS) chino, (IRNSS) indio y (QZSS) japonés, aún en desarrollo.

Este nuevo tipo de agricultura busca la utilización y aplicación de nuevas tecnologías en terrenos agrícolas, como los ya mencionados GNSS, estudios adicionales como diversidad del suelo, medio ambiente y las necesidades propias de las plantaciones, con la finalidad de gestionar y optimizar los insumos (fertilizantes, riego, fitosanitarios, semillas...).

Así este nuevo tipo de agricultura es según (Pierce, F.J.; Nowak, P., 1999) "*La aplicación de tecnologías y principios para el manejo de la variabilidad espacial y temporal*", que por su puesto estaría asociado a la producción Agrícola, mejorando su productividad y calidad ambiental. Otro pilar fundamental para la (AP) es la teledetección, aplicada para el análisis y gestión de los recursos, sin embargo su empleo se encuentra delimitado a la resolución espectral, espacial y temporal de las imágenes. Hasta hace unos años atrás se trabajaba con imágenes obtenidas de los satélites como el Landsat 5, 7 y 8, durante el desarrollo de este trabajo se utilizaron imágenes del satélite Landsat 7 del mes de diciembre del año 2007, las cuales poseen una resolución de 15 m en pancromático y de 30 metros en multiespectral, así mismo como ayuda a la teledetección llegan los UAS (*Unmanned Aerial System*) o RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*), los que son muy

versátiles para la adquisición de imágenes remotas, con múltiples aplicaciones.

Las Imágenes aéreas obtenidas de aviones convencionales poseen resoluciones submétricas (25 cm) con esto se ha podido realizar cartografía en las zonas con plagas de diversas hierbas no deseadas en cultivos del girasol y el trigo (López-Granados, F.; Gómez-Candón, A.; De Castro-Magias, A. I.; Jurado-Expósito, M.; Torres-Sánchez, J.; y Peña-Barragán, J.M., 2006), (Peña-Barragán, J.M.; López-Granados, F.; Jurado-Expósito, M.; y García-Torres, L, 2007, 2010). Sin embargo, las imágenes multiespectrales que provienen de satélites con mayores resoluciones espaciales son del satélites Geo-Eyes (1.64 m / Pixel) y *Quickbird* (2.4 m / Pixel). Si se requiere mayores resoluciones espaciales para discriminar, las infestaciones de hierbas no deseadas o malas hierbas por ejemplo, cuando presentan entre 2 y 6 pares de hojas en su estado fenológico temprano, se necesita de una resolución espacial mucho mayor (1-6 cm/ pixel) se hace necesario el uso de UAS para alcanzar estos objetivos.

Los datos recopilados por estos sensores remotos se guardan en formato digital, mediante tablas y mapas, información que ayuda al agricultor en la toma de decisiones. Finalmente el principal objetivo de la "AP" es "la obtención de mayores rendimientos económicos, medioambientales y sociales, aumentando la competitividad a través de una mayor eficacia en las prácticas agrícolas" (Díaz García-Cervigón, 2015).

Ya con las capturas de imágenes y de los sistemas de posicionamiento global, en complemento con maquinaria especializada en la producción es que en este trabajo se pretende establecer una relación entre los índices de vegetación saludable, capturados por imágenes de RPAS- Drones o imágenes satelitales, y su correspondiente producción de trigo.

El potencial del terreno en el uso agrícola es variable y dinámico, ya sea está por una buena calidad, tanto en nutrientes, como en la calidad del agua del riego, el aire influyente, pesticidas aplicados, y el control del efecto invernadero, entre otros, todo esto permite generar productos de mayor calidad y como resultado mayores beneficios económicos (Niggli, U.; Fliebach, A.; Hepperly, P.; Scialabba, N., 2009), ya que no tan solo se dispone de la calidad del producto mediante índices como el "Peso Hectolitro", si no también disminuye el tiempo del proceso de

cultivo y facilita la densidad cuantitativa del producto agrícola, para lo cual se debe determinar el uso adecuado del suelo agrícola, considerando los factores adecuados en la evaluación de la calidad del suelo y los recursos que puedan ser obtenidos a través del análisis del mismo, dentro de los cuales se describen los siguientes:

1. La erosión del suelo.
2. La acumulación de sedimentos generados por las condiciones climáticas.
3. La infiltración de agua por incremento de lluvias.
4. La disminución o pérdida de nutrientes.
5. Litificación o endurecimiento de la superficie.
6. Análisis químicos del suelo (cambios en el pH, metales pesados, evolución de materia orgánica).
7. Análisis biológico del suelo (organismos patógenos, calidad del agua).

Todos estos factores pueden ser analizados según los efectos estadísticos identificados en todos los productos a lo largo del país, es decir, de acuerdo a su ubicación geográfica la que permite obtener variedad de productos en distintas épocas del año, por ejemplo en cuanto a la zona central, los problemas productivos se ven asociados a la inversión económica y en la gestión de producción de la infraestructura existente, que busca optimizar los recursos a bajo costo, y por otro lado en la zona sur, en el cual existe un problema de gobierno, debido a los escasos y/o precarios sistemas institucionales para generar soluciones a la problemática, ya que para el país no existe una política de gestión que la priorice dentro del sector agrícola.

Las tecnologías asociadas a los problemas productivos en la agricultura, están directamente relacionadas al poco uso e implementación de esta, es decir la tecnología no se encuentra al alcance de la mediana y baja agricultura, solo para grandes productores agrícolas. Las grandes empresas de producción agrícola en Chile han tenido un incremento en las exportaciones gracias al desarrollo de las tecnologías que permiten una producción cada vez más eficiente y eficaz. (Best, S.; León, L; Méndez, A.; Flores, F.; Aguilera, H., 2014).

La incorporación de nuevas tecnologías en los procesos agrícolas ha generado un avance productivo a menos costo, es así como en países como Argentina, Estados Unidos, Reino Unido y

Bélgica, se han realizado grandes avances en la adopción de las tecnologías de agricultura de precisión (AP), en cultivos como trigo, maíz, soya y empastadas (Best, S.; León, L; Méndez, A.; Flores, F.; Aguilera, H., 2014). En Chile la agricultura de precisión (AP) va en crecimiento, debido a esto instituciones como el instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) y la Fundación para la Innovación Agraria (FIA) de Chile, han generado y participado en proyectos de viticultura y fruticultura lo que permite aumentar conocimientos y experiencias en el uso de nuevas herramientas tecnológicas.

Algunos de los métodos que se describirán más adelante corresponden a parte de lo que se podría llamar Agricultura de Precisión (AP) mediante métodos de percepción remota, la cual posee la capacidad de recopilar, interpretar y aplicar, información específica de los sectores analizados, transformando datos e información en conocimiento y rentabilidad. Estos sistemas además permiten aumentar la precisión de las labores y la eficiencia de los equipos (Kreime, 2003).



Figura 1. Ciclo completo de la AP (SUSTENTAB)

Un resumen de beneficios potenciales descritos por (Booltink, HWG; Alphen, BJ Van; Batchelor, WD; Paz, JO; Vargas, JJ Stoorvoege & R, 2001), al implementar la (AP) en sus campos corresponderían a:

- 1) El margen económico de la producción de cultivos puede ser aumentado por las mejoras en el rendimiento o la reducción en el uso de los insumos para la producción.
- 2) El riesgo de contaminación ambiental por agroquímicos aplicada a niveles

superiores al óptimo pueden ser reducidos.

- 3) Mayor garantía de precisión del objetivo y el registro de todas las aplicaciones de campo para mejorar la trazabilidad.

Por ende, es de vital importancia el uso de equipamiento de percepción remota como lo son, el uso de Drones o manejo de imágenes Satélites.

UAS-RPAS: Son aquellas aeronaves no tripuladas a bordo, controlados por un piloto en forma remota, mediante un sistema de control.

Se podría diferenciar en dos grupos:

* Aire:

Formado por el vehículo aéreo y todos sus subcomponentes (sistemas de aterrizajes).

* Tierra:

Posee la estación de control (dirige los drones desde tierra) desde el despegue hasta el aterrizaje.

Según la superficie de estudio, la resolución espacial requerida y en algunos casos, las condiciones para el despegue y aterrizaje en la zona, seleccionaremos que tipo de UAS-RPAS utilizaremos. (ver tabla 1. Diferencias entre ala fija y ala rotatoria).

Ala fija: en esta categoría se les puede considerar aviones y sus características son:

- Poseen mayor autonomía, son más eficientes que los multirrotores de igual tamaño.
- Vuelan a mayor velocidad por lo que cubren mayores superficies dada su autonomía superior, siendo muy útiles en teledetección y tareas cartográficas.
- Poseen menor huella sonora, lo que los hace especiales en tareas de vigilancia.
- Pueden operar en mayores rangos meteorológicos, temperatura, viento y lluvia.

Ala rotatoria: son aquellos capaces de lograr la fuerza de sustentación por el giro de sus hélices, más conocidos como multirrotores o helicópteros, sus características principales son:

- Despegue y aterrizaje vertical, lo que reduce las necesidades de espacio.
- Posibilidades de volar a puntos específicos, y así obtener un mayor detalle de alguna zona puntual.
- Mayor maniobrabilidad y precisión en el vuelo.

CARACTERISTICA	ALA FIJA	MULTIRROTOR
Peso total	3.5 kg	3.5 kg
Carga de pago	1.0 kg	1.0 kg
Autonomía	2 h	40 min
Propulsión	Eléctrica	Eléctrica
Velocidad	50 km/h	40 km/h
Despegue	Catapulta	Vertical
Aterrizaje	En panza o paracaídas	Vertical
Máximo viento	15 m/s	10 m/s

Tabla 1. Comparación entre ala fija y multirrotores de mismo peso.

En Chile la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) es el organismo encargado de regular el movimiento o actividad aérea del país, por lo tanto, desde el año 2015 incluyó la regulación de Drones o RPAS, mediante las normativas aeronáuticas DAN 151 y DAN 91, estableciendo que todo operador deberá poseer una credencial de piloto a distancia de RPAS, con la tarjeta de registro correspondiente del Dron y la autorización de la DGAC respectiva. Además, indica que el aspirante a operador de RPAS deberá cumplir con los siguientes requisitos:

- Tener dieciocho años cumplidos de edad.
- Presentar una declaración jurada notarial, que acredite que se recibió instrucción (teórica y práctica) del RPAS-Dron a utilizar.
- Rendir y aprobar un examen escrito sobre la norma DAN 151, DAN 91, Meteorología y Aerodinámica. Con un mínimo de aceptación del 75%.
- Nunca perder el contacto visual con el RPAS-Dron.
- Contratar un seguro de daños contra terceros, autorizado por la Junta Aeronáutica Civil (JAC).
- La operación deberá ser de interés público, ejemplo, vuelos asociados a filmaciones de medios de comunicación social, órganos del

estado o ante situaciones de catástrofe.

- g) Inscribir el Dron y certificarlo por la DGAC.

Según la DAN 91, “sólo Drones pequeños de hasta 750 gramos de peso, fabricados con polietileno expandido o material equivalente, destinados al uso privado o recreacional, podrán operar en áreas privadas sin autorización de la DGAC siempre y cuando no operen a más de 50 m de altura sobre el obstáculo o edificación de mayor altura de la zona”.

Además, indica que todo vuelo de RPAS que se realice en lugares no habitados, no requiere inscripción ni obtener una credencial de operador, sólo bastará con solicitar la autorización a la DGAC. (DGAC, 2018).

En el estudio “El impacto económico de la integración del sistema aeroespacial no tripulado en la economía de los EE. UU” realizado el año 2013 se mencionó que los principales usos para los UAS-RPAS, en su sistema aeroespacial, quedo representando en un 90% de los posibles mercados con más potencialidad a la Agricultura de Precisión y la seguridad pública.

El uso de vehículos aéreos no tripulados para la producción agraria lo describe (López-Granados, 2011), dada su gran evolución, de los muchos trabajos realizados por el autor antes mencionado, se destacan tres, que podrían afectar el rendimiento del cultivo:

- La detección de áreas plagadas por malas hierbas en diferentes cultivos.
- La detección de zonas que requieren mayor o menor riego en frutales.
- La detección de zonas plagadas por hongos en el olivo.

Varios autores reconocen la ayuda para lograr el máximo rendimiento, porque a diferencia del tradicional agricultor que se traslada por el campo, buscando solo visualmente “a ojo desnudo” (sin tecnología aplicada) las imperfecciones que puedan existir en el cultivo, el UAS-RPAS vuela sobre el sector y logra obtener información sobre el estado del cultivo, con mayor precisión, gracias a la fotografía termal y multiespectral. Según (BEST), “el productor necesita tener información certera para tomar medidas, y hoy, la tecnología nos permite

decirle al productor qué tiene que hacer y cómo, de manera más eficiente”.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, también conocido como NDVI por sus siglas en inglés, es un índice de vegetación que se utiliza para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja.

Bajo esa definición se podría entender que mientras más alto el índice de vegetación mayor será la calidad y producción, lo cual será comprobado mediante georeferenciación de la producción.

En esta investigación del “Trigo” se desea evaluar si existe alguna relación entre los índices de vegetación saludable y su productividad, para lo cual utilizaremos el método “NDVI” (*Normalized Difference Vegetation Index*), con el cual se podrán tomar decisiones como por ejemplo, si es el momento ideal de realizar la cosecha o si existe falta de nutrientes para mejorar la producción, todo mediante el uso de imágenes multiespectrales captadas por UAS/RPAS o imágenes satelitales, en un sector de Yungay de la provincia de Diguillín, región de Ñuble, Chile.

Solo implementando una metodología de trabajo cronológica y analógica, que nos permita cumplir con los siguientes requerimientos se podrá lograr los objetivos específicos:

- a. Recopilar datos del estado del suelo (Análisis químico, Tipos de suelo, estratigrafía del terreno).
- b. Realizar mapas de producción del trigo mediante GNSS.
- c. Realizar cálculos de NDVI a imágenes multiespectrales capturadas con RPAS y satelitales.

MATERIALES Y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO

El INIA (Instituto de Investigaciones Agropecuarias), posee diferentes predios agrícolas para estudios a lo largo de Chile, en esta investigación se utilizó el predio denominado “La Greda”, ubicado en la comuna de Yungay, Región de Ñuble, su punto central se encuentra en las coordenadas UTM 765153.22 m E y 5883174.89 m S Huso 18 Sur, posee un total de 64 ha utilizables aproximadamente.

Corresponde a una zona agroecológica de la precordillera andina, el área posee un clima

Templado Mesotermal Inferior, Estenotérmico Mediterráneo Sub-húmedo (*Santibañez F. y Uribe J.M, 1993*), con praderas naturales de baja productividad.

PROCEDIMIENTOS

Con la finalidad de obtener antecedentes que nos aporten sobre las condiciones del terreno se desarrollaron análisis mediante calicatas, y así contar con el estudio físico del suelo.

Se realizaron para este estudio cuatro (4) calicatas distribuidas en forma transversal por el predio.

Las calicatas son excavaciones de profundidad media a pequeña que permiten analizar en forma confiable y concreta la estratigrafía del suelo, las cuales se seleccionaron de acuerdo a cierta homogeneidad del potrero o predio, en cada punto se construirá una calicata de 1x1x1 m y se describirá el suelo (profundidad y límites de los horizontes, color con tabla Munsell y usando malla en acetato de 20x20 cm reticulada cada 1 cm, se evaluará la presencia de concreciones, piedras y raíces en el perfil), con los resultados de estas calicatas nos permiten en definitiva establecer cierta homogeneidad del suelo, y por

lo tanto disminuir la incertidumbre a la hora de confrontar los resultados

Otro Criterio a evaluar del suelo, son los índices de vegetación saludable o Vigor (NDVI), para este informe se utilizaron las imágenes multiespectrales capturadas por la cámara Duncan Tech MS-3100 como también las imágenes multiespectrales capturadas por el satélite Landsat 7 para el mismo periodo (dada su resolución de 30 m se recomienda para superficies de gran tamaño).

CARACTERÍSTICA	DETALLE
Resolución	1392(H) x 1040(V) x 3 sensores
Tamaño de Pixel	4.65 x 4.65 micrón
Rango de los datos de transferencia	14.318 MHz máx.
Lente	Nikon F-Mount or Canon ENG
Obturador Electrónico	1/8000 - 1/7.5 sec Independiente del canal de control
Rango de temperatura	0-65°C
Voltaje de trabajo	12 volts
Peso	1.62 Kg.

Tabla 2. Características cámara Duncan Tech MS 3100

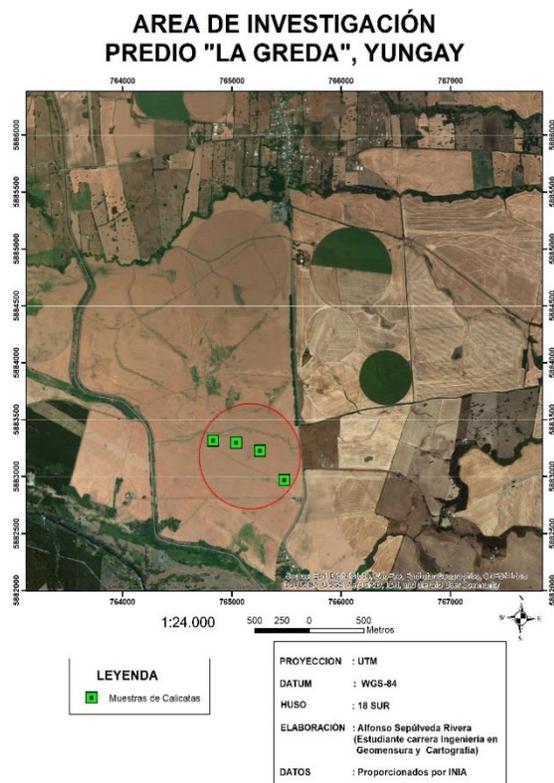


Figura 2. Calicatas, Predio "La Greda", Yungay. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se recogieron los datos georeferenciados de la producción del trigo, con esto se elabora un mapa de producción y otro de elevación.

Para finalmente realizar un cruce de datos, y determinar si existe relación entre un índice de vegetación saludable y un alto porcentaje de producción.

RESULTADOS

ANÁLISIS FÍSICO DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO

Al tomar muestras por estratos, la primera de 0-20 cm, segunda de 20-40 cm, la tercera de 40 a 60 y 60 y más cm, para los análisis físicos de laboratorio, como, por ejemplo, "Capacidad de Campo (CC), Punto de Marchites Permanente, Humedad Aprovechable, Textura, Densidad Aparente y Porosidad".

Calicata 1				Clase		4				
Coordenadas		Horizonte 1								
Este	Norte	Textura	Profundidad	Estructura			Limite del Horizonte		Raíces	
				Tipo	Clase	Grado	Tipo	Transición	Abundancia	Tamaño
764826	5883314	Franco Limosa	20 cm. (0-20 cm.)	Bloques angulares	Medio	Moderado	Ondulado	Gradual	Abundante	Fina
Horizonte 2										
	Textura	Profundidad		Estructura			Limite del Horizonte		Raíces	
				Tipo	Clase	Grado	Tipo	Transición	Abundancia	Tamaño
	Franca	33 cm. (20-53 cm.)	Bloques subangulares	Gruoso	Moderadamente fuerte	Ondulado	Claro	Comunes	Fina	
Horizonte 3										
	Textura	Profundidad		Estructura			Limite del Horizonte		Raíces	
				Tipo	Clase	Grado	Tipo	Transición	Abundancia	Tamaño
	Arillosa	47 cm. (33-100 cm.)	Bloques subangulares	Gruoso	Moderadamente fuerte	Ondulado	Claro	Escasas	Fina	

Nota: -Desde los 50 a 100 cm. abundante presencia de concreciones.
-No se observó pedregosidad.

Figura 3, Información In-situ de la calicata

NDVI

Los valores del Índice Normalizado Diferencial de Vegetación "NDVI" (Normalized Difference Vegetation Index), que fue utilizado para separar la vegetación del brillo del suelo (Rouse, L.W., R.H. Haas, J.A. Schell. and D.W. Deering, 1974). Indica la energía absorbida o reflejada por las plantas en distintos segmentos del espectro electromagnético, específicamente una vegetación sana o saludable se ve fuertemente incrementada en el infrarrojo cercano (NIR, near infrared), dado que en el rango visible los pigmentos de la hoja asimilan la mayor parte de la energía, en el NIR, las hojas reflejan la mayor cantidad de ésta, producto de su acumulación de agua en las hojas.

Por el contrario cuando la vegetación está sufriendo estrés, ya sea por sequías o algún tipo de plagas la cantidad de agua se reduce en las hojas por lo que la reflectividad disminuye en el NIR y aumenta en el rojo paralelamente al tener menor absorción de clorofila, logrando con esto detectar en forma rápida y clara la condición saludable de la planta, como por ejemplo para detectar en forma temprana plagas y enfermedades, dado que se refleja en el nivel de estrés de la vegetación.

La vegetación posee un comportamiento radiométrico por decirlo de algún modo "peculiar", donde se relacionan la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, permitiendo con esto obtener su vigorosidad.

Del análisis multi-espectral desarrollado por un proveedor del INIA se obtuvo las imágenes multispectrales, capturada por la cámara Duncan Tesh MS 3100, estas imágenes multispectrales fueron corregidas radiométricamente, luego georeferenciadas para luego generar el ortomosaico, finalmente fueron procesadas y clasificadas en distintos niveles de vigor, generando así cartografías temáticas, fáciles de interpretar para la toma de decisiones, determinando cuatro (4) zonas claramente identificables, siendo el mejor índice la zona cercana a los tonos verde oscuro y la de menor vigor la zona de color rojo.

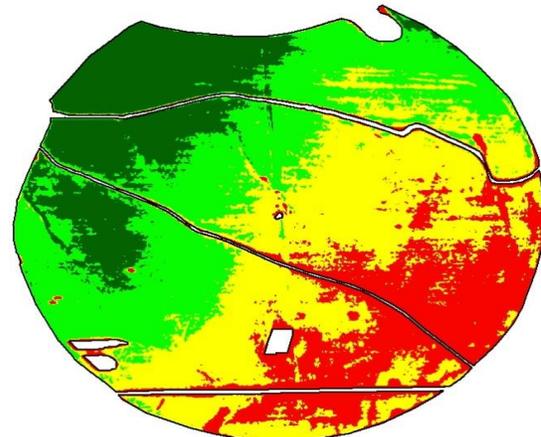


Figura 4. NDVI, Cámara Duncan Tesh

Así mismo con la imagen termal, es posible determinar la falta de hídricos en toda una zona, e el contenido de clorofila de las plantas, que no es otra cosa que la acumulación de nitrógeno de la hoja, al detectar esta falta de nutrientes nos permitirá hacer un uso adecuado de los fertilizantes, aplicándolos solo en las zonas necesarias.

Para el análisis con el método NDVI, es necesario utilizar bandas del espectro visible (400-700 nm), donde los espectros fotosintéticos condicionan la respuesta espectral de la vegetación, en tanto la banda infrarroja cercana (700-1.350 nm), es capaz de utilizar la estructura interna de la hoja como factor condicionante.

Para la fórmula del índice de vigor se deberá tener en cuenta la banda correspondiente al infrarojo según el tipo de satélite, dado que para los satélites hasta el Landsat 7 la banda N°4 corresponde al NIR, en tanto que para imágenes multispectrales tomadas con el satélite Landsat 8, su banda infraroja corresponde a la banda N°5.

$$NDVI = \frac{(NIR - ROJO)}{(NIR + ROJO)}$$

Ecuación 1. FORMULA NDVI

Con la finalidad de aportar algo más a esta investigación se procedió a descargar una imagen del satélite Landsat 7, del mismo periodo de tiempo, desde la página del USGS (United States Geological Survey), y generar con esto los respectivos cálculos de NDVI, guardando las proporciones producto de las resoluciones del pixel (30 m), se genera la siguiente cartografía:

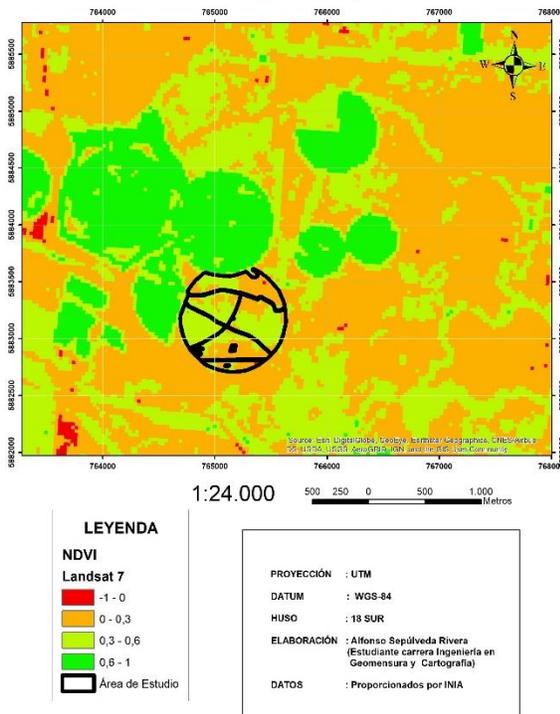


Figura 5. Cálculo del NDVI, a imagen satelital obtenida del satélite Landsat 7 (del mismo periodo). Fuente: elaboración propia.

PRODUCTIVIDAD DEL TRIGO

El rendimiento de la cosecha tiene relación con muchos factores como el clima, altimetría del sector, cantidad de nutrientes entregados y absorbidos por el suelo entre otros.

La calibración de los instrumentos específicos para el monitoreo del rendimiento del cultivo, se ejecuta mediante el método de pesada (utilizando un peso patrón), la maquinaria contará con un sistema integrado de GPS, el cual se comunica por RTK (Real Time Kinetic), que es una técnica basada en una estación de referencia (GPS receptor situado fijo en un lugar), que calcula correcciones al posicionamiento obtenido de los satélites y las envía generalmente vía radio (pero también puede ser vía telefonía, internet...) en tiempo real a otros receptores GPS móviles pasivos, que aplicando dichas correcciones a sus propios datos obtenidos de los satélites, con esto se obtienen datos de precisiones del orden centimétrico, con tan solo 2 segundos estacionados en la posición que se desea medir, obteniendo el siguiente resultado:

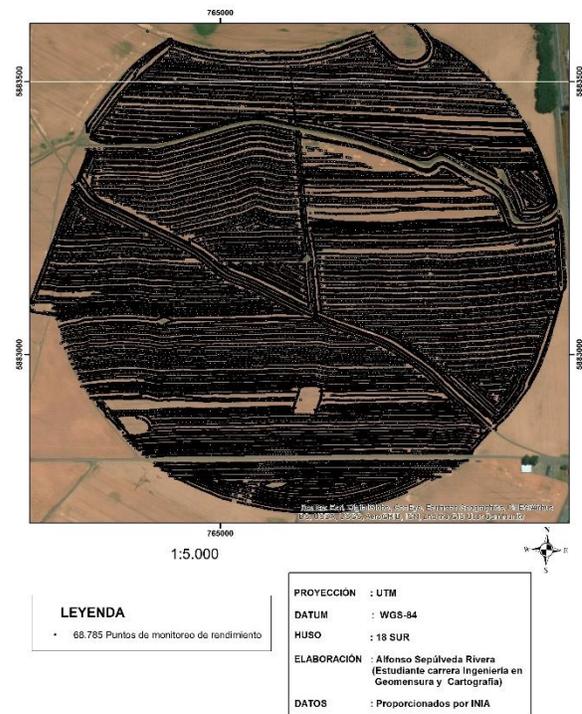


Figura 6. Puntos de monitoreo de rendimiento. Fuente: elaboración propia.

Con los datos recogidos por los sensores de rendimiento además del peso hectolitro se encuentran las cotas, por lo tanto, se generó un modelo digital de elevación o TIN (Triangulated Irregular Network), con la finalidad de apreciar de mejor manera la morfología de la superficie del predio “La Greda”, y así observar si la variabilidad de productividad se podría deber a la diferencia de altura dentro del predio.

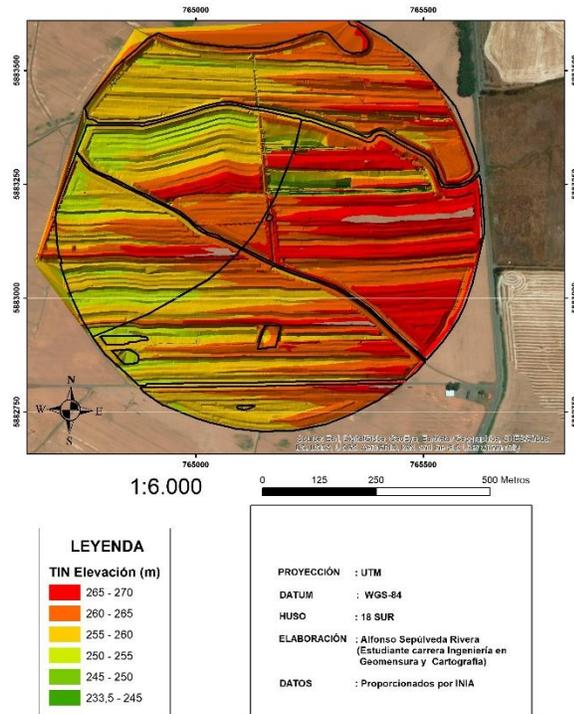


Figura 7. Modelo Digital de Elevación. Fuente: elaboración propia.

De lo anterior se extrajo un gráfico confrontando el rendimiento con su altura, esto nos permite visibilizar si la cosecha es homogénea en relación a su posición dentro del predio o si la altura afecta a la producción.

Producto de la gran cantidad de datos (68.785 puntos de monitoreo), se realizó un muestreo aleatorio de 40 puntos distribuidos por todo el predio, con la finalidad de poder representar de mejor manera el comportamiento de la cosecha. De los variados datos proporcionados por el software de mapeo de rendimiento, se utilizó el “peso Hectolitro”, fundamental para evaluar la cosecha, dado que un alto valor del peso indica por lo general un mejor rendimiento y productividad.

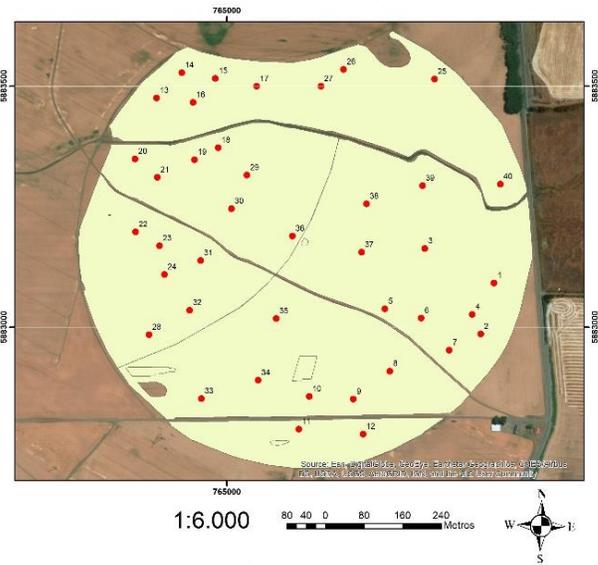


Figura 8. Muestreo de Calidad de producción. Fuente: elaboración propia.

Su peso se ve afectado o influenciado por el tamaño y forma, además de su densidad la que depende de su estructura biológica y química (Zambrano, 1986).

En la siguiente ilustración se visualizan los puntos muestreados y a posición dentro del calculo del NDVI correspondiente.

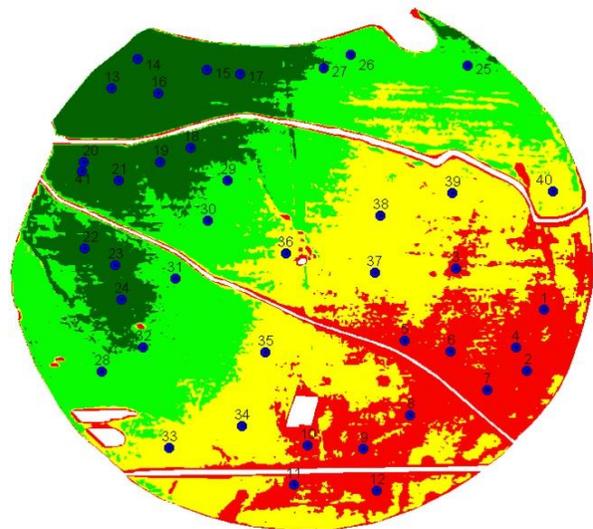


Ilustración 9. Puntos de control, en zonas según su índice de vigor, con imagen del Dron/Rpas. Fuente: elaboración propia.

Relación entre un índice de vegetación saludable (ndvi) y la productividad del trigo con métodos de agricultura de precisión
Alfonso Sepúlveda Rivera

ID PUNTO	VIGOR	ID PUNTO	VIGOR
1	1	21	4
2	1	22	4
3	1	23	4
4	1	24	4
5	1	25	3
6	1	26	3
7	1	27	3
8	1	28	3
9	1	29	3
10	1	30	3
11	1	31	3
12	1	32	3
13	4	33	2
14	4	34	2
15	4	35	2
16	4	36	2
17	4	37	2
18	4	38	2
19	4	39	2
20	4	40	2

Tabla 3. Detalle de los puntos de control según su índice de vigor, calculado con la imagen del Dron/RPAS

Mismo procedimiento se realizó con la imagen satelital, esta vez se aprecian solo 2 tonos preponderantes dentro de nuestra zona de trabajo.

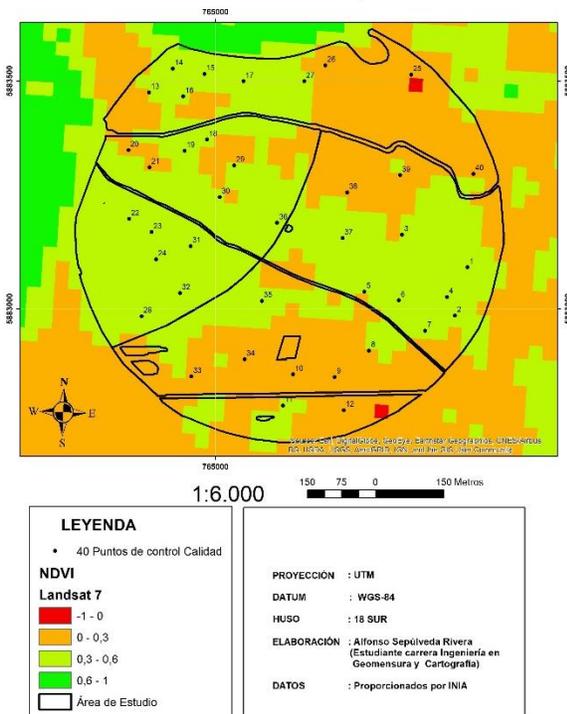


Figura 10. Puntos de control, en zonas según índice de vigor, con imagen satelital. Fuente: elaboración propia.

ID PUNTO	VIGOR	ID PUNTO	VIGOR
1	3	21	2
2	3	22	3
3	3	23	3
4	3	24	3
5	3	25	2
6	3	26	2
7	3	27	3
8	2	28	3
9	2	29	3
10	2	30	3
11	3	31	3
12	2	32	3
13	3	33	2
14	3	34	2
15	3	35	3
16	3	36	3
17	3	37	3
18	3	38	2
19	3	39	2
20	2	40	2

Tabla 4. Detalle de los puntos de control según su índice de vigor, calculado con la imagen satelital. Fuente: elaboración propia.

Los siguientes gráficos representan las diferencias de la producción versus su índice de vigor.

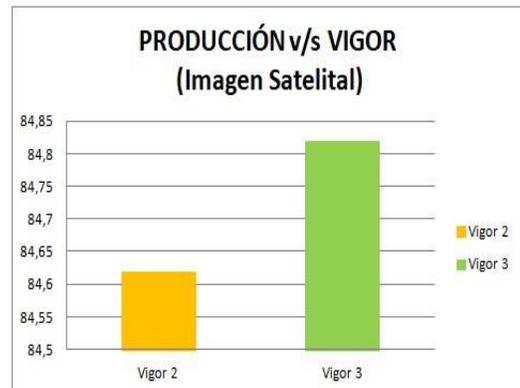
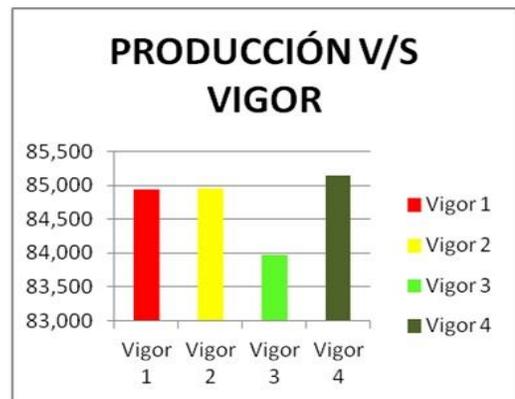


Tabla 5. Gráfico de producción v/s Vigor (cámara en DRON / RPAS). Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIÓN

Dada la información proporcionada por los gráficos e imágenes antes descritos en el desarrollo de este documento se puede concluir lo siguiente:

1. El uso de imágenes con Drones-RPAS, al poseer resoluciones espaciales mucho menores, permiten abordar otras variables no trabajadas en este informe, como la detección de plagas durante el periodo de crecimiento del cultivo, mejorar la aplicación de fertilizantes en zonas puntuales del cultivo, así mismo optimizar

el riego localizado, disminuyendo los costos de producción.

2. La diferencia en la precisión con respecto al promedio del peso Hectolitro obtenido con el satélite Landsat 7 y el promedio del UAS/RPAS no presenta grandes diferencias utilizando el mismo método, pero si en el detalle de la información a tratar.
3. Finalmente, y con los datos obtenidos "SI" existe una tendencia a obtener una mayor producción según su peso hectolitro en el índice de vigor más alto.

REFERENCIAS

Best, S.; León, L.; Méndez, A.; Flores, F.; Aguilera, H. 2014. *Adopción y Desarrollo de tecnologías en Agricultura de Precisión*. s.l.: Digital N° 3, Progap-INIA, 2014.

BEST, STANLEY. DIRECTOR INIA QUILAMAPU.

Booltink, HWG; Alphen, BJ Van; Batchelor, WD; Paz, JO; Vargas, JJ Stoorvoeg & R. 2001. *Tools for optimizing management of spatially-variable fields, Agricultural Systems*. 2001.

DGAC. 2018. www.dgac.gob.cl. [En línea] 2018. <https://www.dgac.gob.cl/como-operar-un-dron-en-chile-2/>.

Díaz García-Cervigón, Juan José. 2015. *Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión*. Madrid, España : s.n., 2015.

Kreime, P. 2003. *Las TICS en la Agricultura de Precisión*. s.l.: ceditec (centro de difusión de tecnologías ETSIT-UPM)., 2003.

López-Granados, F. 2011. *USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (UAV) PARA LA EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN AGRARIA*. s.l.: Instituto de Agricultura Sostenible- IAS/CSIC, 2011.

López-Granados, F.; Gómez-Candón, A.; De Castro-Magias, A. I.; Jurado-Expósito, M.; Torres-Sánchez, J.; y Peña-Barragán, J.M. 2006.

Instituto de Agricultura Sostenible- IAS/CSIC "DISCRIMINACIÓN DE MALAS HIERBAS EN CULTIVOS: DE LAS IMÁGENES DE SATÉLITE A LOS VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS". 2006.

Niggli, U.; Fliebach, A.; Hepperly, P.; Scialabba, N. 2009. *Low greenhouse gas agriculture: mitigation and adaptation potential of sustainable farming systems*. Roma : FAO, 2009.

Peña-Barragán, J.M.; López-Granados, F.; Jurado-Expósito, M.; y García-Torres, L. 2007, 2010. *Mapping *Ridolfia segetum* patches in sunflower crop using remote sensing. Weed; Sunflower yield related to multitemporal aerial photography, land elevation and*. 2007, 2010.

Pierce, F.J.; Nowak, P. 1999. *Aspects of Precision Agriculture. advances in Agronomy* 67: 1-85. 1999.

Rouse, LW., R.H. Haas, J.A. Schell. and D.W. Deering. 1974. *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with EATS*, In: S.C. Freden, E.P. Mercanti, and M. Becker (EDS) *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Volume I: Technical Presentations*, NASA SP-351, NASA, Washington, D.C., pp.309-317. 1974.

Santibañez F. y Uribe J.M. 1993. *Atlas Agroclimático de Chile: Regiones Sexta, Séptima, Octava y Novena*. Santiago : Universitaria, 1993.

Zambrano, Mario Mellado. 1986. *Peso del hectolitro en trigo*. s.l. : IPA, QUILAMAPU, 1986.