



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

PROCESO DE DESARROLLO DE CULTIVOS ANDINOS Y REFLECTANCIAS
ESPECTRALES DE LAS HOJAS, PROVINCIA DE HUAMANGA, 2020

Línea de investigación:
Biodiversidad, ecología y conservación

Tesis para optar el Grado Académico de Doctor en Medio Ambiente y
Desarrollo Sostenible

Autor

Solano Reynoso, Walter Mario

Asesora

Tafur Anzualdo, Vicenta Irene

ORCID: 0000-0002-1888-7848

Jurado

Zambrano Cabanillas, Abel Walter

Naupay Vega, Marlitt Florinda

Alburquerque Yataco, Celso Alejandro

Lima - Perú

2026



PROCESO DE DESARROLLO DE CULTIVOS ANDINOS Y REFLECTANCIAS ESPECTRALES DE LAS HOJAS, PROVINCIA DE HUAMANGA, 2020

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%	9%	3%	1%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.inia.gob.pe Fuente de Internet	1%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
3	www.coursehero.com Fuente de Internet	1%
4	documentop.com Fuente de Internet	<1%
5	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	www.redalyc.org Fuente de Internet	<1%
7	www.slideshare.net Fuente de Internet	<1%
8	tel.archives-ouvertes.fr Fuente de Internet	<1%
9	web.archive.org Fuente de Internet	<1%
10	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1%
11	livrosdeamor.com.br Fuente de Internet	<1%



Universidad Nacional
Federico Villarreal

VRIN | VICERRECTORADO
DE INVESTIGACIÓN

ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

PROCESO DE DESARROLLO DE CULTIVOS ANDINOS Y
REFLECTANCIAS ESPECTRALES DE LAS HOJAS, PROVINCIA
DE HUAMANGA, 2020

Línea de investigación:
Biodiversidad, ecología y conservación

Tesis para optar el Grado Académico de
Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible

Autor

Solano Reynoso, Walter Mario

Asesora

Tafur Anzualdo, Vicenta Irene
ORCID: 0000-0002-1888-7848

Jurado

Zambrano Cabanillas, Abel Walter
Naupay Vega, Marlitt Florinda
Alburquerque Yataco, Celso Alejandro

Lima-Perú
2026

Dedicatoria

A mi familia, esposa e hijos, por concluir este trabajo y una etapa más en la vida académica y profesional.

Agradecimientos:

A mi asesora, la Dra. Vicenta Irene Tafur Anzualdo, por su paciencia e interés en la orientación de la presente investigación.

A los colegas Renato Soca Flores y Noel Torres Huaripaucar por su colaboración desinteresada en el arduo trabajo de las mediciones de campo.

Al Ing. Abrahan Villantoy Palomino, quien acogió y colaboró realizar la presente investigación en las instalaciones del Instituto de Innovación Agraria-Ayacucho.

ÍNDICE

RESUMEN	xi
ABSTRACT.....	xii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.2. Descripción del problema.....	3
1.3. Formulación del problema	4
- Problema principal.....	4
- Problemas específicos.....	4
1.4. Antecedentes	4
1.4.1. Antecedentes internacionales.....	5
1.5. Justificación de la investigación.....	12
1.6. Limitaciones de la investigación	13
1.7. Objetivos de la investigación	14
- Objetivo general	14
- Objetivos específicos.....	14
1.8. Hipótesis.....	14
- Hipótesis general	14
- Hipótesis específicas.....	14
II. MARCO TEÓRICO.....	16
2.1. Base teórica	16
2.1.1. El espectro electromagnético	17
2.1.2. Absorción de la luz por la clorofila y otros pigmentos.....	19
2.1.3. Reflectancia espectral de las hojas.....	20
2.1.4. Contenido de clorofila.....	22
2.1.5. Contenido de agua de las hojas.....	26
2.1.6. Ubicación de la Provincia de Huamanga	27
2.1.7. Desarrollo sostenible y seguridad alimentaria	28

2.1.8.	Fotosíntesis y cambio climático.....	29
2.1.9.	Proceso de desarrollo de cultivos y reflectancias espectrales.....	30
2.2.	Marco filosófico.....	30
2.3.	Marco conceptual.....	32
III.	MÉTODO.....	34
3.1.	Tipo de investigación.....	34
3.2.	Población y muestra.....	35
3.3.	Operacionalización de variables.....	35
3.4.	Instrumentos.....	35
3.5.	Procedimientos.....	36
3.6.	Análisis de datos.....	37
3.6.1.	Suavizamiento de datos.....	37
3.6.2.	Datos del contenido de clorofila.....	40
3.6.3.	Análisis de datos del contenido de agua.....	44
3.7.	Consideraciones éticas.....	46
IV.	RESULTADOS.....	47
4.1.	Resultados de los índices espectrales del contenido de clorofila.....	47
4.2.	Resultados de los contenidos de clorofila.....	51
4.3.	Resultados de los índices espectrales del contenido de agua.....	65
4.4.	Resultados de los contenidos de agua.....	76
V.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	84
5.1.	Sobre el contenido de clorofila.....	85
5.2.	Sobre el contenido de agua.....	87
VI.	CONCLUSIONES.....	90
VII.	RECOMENDACIONES.....	91
VIII.	REFERENCIAS.....	92
IX.	ANEXOS.....	100
	ANEXO A. MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	100

ANEXO B. RESULTADOS DE LOS ÍNDICES ESPECTRALES Y DEL CONTENIDO DE CLOROFILA	101
ANEXO C. RESULTADOS DE LOS ÍNDICES ESPECTRALES DEL CONTENIDO DE AGUA.....	106

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Espectro electromagnético y sus diferentes regiones.</i>	18
Figura 2 <i>Espectro de absorción de los pigmentos contenidos en las hojas verdes: Clorofila, carotenoides y antocianinas.</i>	20
Figura 3 <i>Radiación incidente y reflejada en la superficie dA.</i>	21
Figura 4 <i>Reflectancia espectral típica de hojas verdes terrestres entre 350 nm y 2500 nm</i> ...	22
Figura 5 <i>Ilustración del par de valores ($\lambda, R(\lambda)$) almacenados por el espectrorradiómetro.</i> 23	
Figura 6 (a) <i>Región visible del espectro de reflectancia mostrando los colores que distingue nuestra visión.</i> (b) <i>Puntos importantes en la evaluación de índices de contenido de clorofila.</i>	24
Figura 7 <i>Molécula de clorofila a y b.</i>	25
Figura 8 <i>Región del infrarrojo cercano y medio, mostrando los valles de absorción del agua, a longitudes de onda de 970, 1200, 1470, 1900 y 2500 nm.</i>	26
Figura 9 (a) <i>Región Ayacucho y su división política.</i> (b) <i>Ubicación de la región Ayacucho en el Perú.</i>	27
Figura 10 <i>Reflectancia espectral de las hojas: (a) no filtrados y (b) filtrados.</i>	38
Figura 11 <i>Espectro de reflectancia de la hoja. (a) Filtrada; (b) no filtrada.</i>	40
Figura 12 <i>Derivada de la región visible e infrarrojo cercano. (a) Las reflectancias espectrales de los seis cultivos. (b) La derivada de la reflectancia espectral de un solo cultivo.</i>	41
Figura 13 (a) <i>Reflectancias espectrales de los cultivos.</i> (b) <i>Región NIR y SWIR mostrando las bandas de absorción del agua de las hojas frescas.</i>	45
Figura 14 <i>Índices de reflectancia de clorofila (Datt, 1999).</i>	48
Figura 15 <i>Comparación de varios índices espectrales del contenido de clorofila.</i>	50

Figura 16 Contenido de clorofila a de acuerdo a Datt (1999), usando los índices dados en la Fig. XX-1. Las unidades están en $\mu\text{g cm}^2$.	52
Figura 17 Contenido de clorofila a de acuerdo a Blackburn.	53
Figura 18 Contenido de clorofila b según Blackburn (1998).	55
Figura 19 Contenido de clorofila total según Datt (1999).	57
Figura 20 Contenido de clorofila utilizando el índice de clorofila del borde rojo (Gitelson y Solovchenko, 2017).	59
Figura 21 Contenido de clorofila utilizando el índice Datt modificado (MDRI) (Sun et al., 2021)	60
Figura 22 Contenido de clorofila según Datt-Sun.	61
Figura 23 Comparando contenidos de clorofila en términos de índices Datt y Blackburn.	63
Figura 24 Comparando cuatro propuestas del contenido de clorofila en $\mu\text{g cm} - 2$.	64
Figura 25 Índice de la razón R1200/R1430 utilizado por Inoue et al. (1993).	67
Figura 26 Índice de la razón R800/R1650 utilizado por Inoue et al. (1993).	68
Figura 27 Índice del contenido de aguade tres bandas, $(R850 - R1788)/(R850 - R1928)$, dado por Datt (1999b), denotado como Datt1.	69
Figura 28 Índice del contenido de aguade tres bandas, $(R850 - R2218)/(R850 - R1928)$, dado por Datt (1999b), denotado como Datt2.	71
Figura 29 Índice de la razón simple del contenido de agua R900/R970 (1993).	72
Figura 30 Índice de agua de diferencia normalizada (IADN), $(R860 - R1240)/(R860 + R1240)$ utilizado por Danson y Bowyer (2004).	73
Figura 31 Índice de estrés de humedad (MSI, Moisture Stress Index) dado como, $R1600/R820$, utilizado por Danson y Bowyer (2004).	75
Figura 32 Contenido de agua en términos de R_{1200}/R_{1430} utilizado por Inoue et al. (1993).	77

Figura 33 <i>Contenido de agua (WC), Ec. (10), para los seis cultivos en términos del índice R1200/R1650, según Inoue et al. (1993).....</i>	78
Figura 34 <i>Espesor equivalente del agua (EWT1) relacionado al índice Datt1.....</i>	80
Figura 35 <i>Espesor equivalente del agua (EWT2) relacionado al índice Datt2.....</i>	81
Figura 36 <i>Espesor equivalente del agua (EWT2) relacionado al índice Datt2.....</i>	83

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Reflectancias de borde rojo y correspondientes longitudes de onda.</i>	42
Tabla 2	<i>Mínimo de la reflectancia del rojo y su correspondiente longitud de onda.</i>	43
Tabla 3	<i>Máximo de la reflectancia del verde y la correspondiente longitud de onda.</i>	44
Tabla 4	<i>Longitudes de onda (nm) en orden creciente utilizados en la definición de índices espectrales relacionados al contenido de agua de las hojas vegetales.</i>	46

RESUMEN

La producción de cultivos como la papa, quinua y maíz en la región andina peruana es ancestral y ha formado parte importante de la alimentación peruana, especialmente andina. La papa y maíz son productos extendidos en el mundo y, en los últimos años, se va dando la globalización de la producción de la quinua, habiendo variedades que solamente se producen en zonas altoandinas. La preocupación por el desarrollo sostenible, seguridad alimentaria y preservación ambiental, nos lleva a realizar investigaciones de diferente naturaleza, entre ellos la mejora de la calidad y cantidad de alimentos, requiriendo una mayor productividad de los cultivos. Las técnicas ópticas modernas adaptadas para mediciones de campo vienen contribuyendo en un mejor control de los cultivos en países más desarrollados, las que requieren adaptarlas a nuestra realidad, ya que se cuenta con un moderno espectrorradiómetro que permite medir entre 350 y 2500 nanómetros, obteniendo información espectral de las hojas donde la clorofila y agua que las contienen, proporcionan un patrón característico de la reflectancia espectral. De este modo, se ha planteado determinar, debido al proceso de desarrollo, las modificaciones de la reflectancia espectral de los cultivos. La investigación es del tipo aplicativo y nivel descriptivo, siguiendo un diseño no experimental y longitudinal. Los resultados obtenidos confirman que las modificaciones espectrales de las hojas son significativas, tal como se comprueba con las determinaciones de los índices espectrales, contenido de clorofila y contenido de agua de las dos variedades de las hojas de maíz, papa y quinua. Los métodos ópticos usados en este trabajo no solo contribuyen a realizar investigaciones orientadas a mejorar la calidad y productividad de los cultivos, se puede extender a vegetales que tiene importancia en el equilibrio ecológico y ambiental.

Palabras claves: reflectancia espectral, índice espectral de clorofila, índice espectral de agua.

ABSTRACT

The production of crops such as potatoes, quinoa and corn in the Peruvian Andean region is ancestral and has been an important part of the Peruvian diet, especially in the Andes. Potatoes and corn are widespread products throughout the world and, in recent years, the globalization of quinoa production has been taking place, with varieties that are only produced in high Andean areas. The concern for sustainable development, food security and environmental preservation leads us to carry out research of different kinds, including the improvement of the quality and quantity of food, requiring greater crop productivity. Modern optical techniques adapted for field measurements have contributed to better control of crops in more developed countries, which require adaptation to our reality, since we have a modern spectroradiometer that can measure between 350 and 2500 nanometers, obtaining spectral information from the leaves where the chlorophyll and water they contain provide a characteristic pattern of spectral reflectance. In this way, it has been proposed to determine, due to the development process, the modifications of the spectral reflectance of the crops. The research is of the application type and descriptive level, following a non-experimental and longitudinal design. The results obtained confirm that the spectral modifications of the leaves are significant, as proven by the determinations of the spectral indices, chlorophyll content and water content of the two varieties of corn, potato and quinoa leaves. The optical methods used in this work not only contribute to carrying out research aimed at improving the quality and productivity of the crops, they can be extended to vegetables that are important in the ecological and environmental balance.

Keywords: spectral reflectance, chlorophyll spectral index, water spectral index.

I. INTRODUCCIÓN

Los índices del contenido de clorofila y de agua de las hojas verdes obtenidos a partir de la reflectancia espectral fueron investigadas desde la década de los años 70 del siglo XX, en parte estimulados por la necesidad de cuantificar el nivel de clorofila y agua de las hojas a partir de datos satelitales, como el índice de vegetación de diferencia normalizada (Rouse et al., 1974). El conocimiento de la reflectancia espectral de las hojas permitió identificar rasgos de las regiones importantes para definir índices de las reflectancia espectrales relacionados a la clorofila (Roberts et al., 2019; Jacquemoud y Ustin, 2019) obtenidos de la reflectancia espectral, como también índices relacionados al contenido de agua (Jacquemoud and Ustin, 2019), permitiendo obtener relaciones empíricas del contenido de clorofila en unidades de masa por unidad de área de las hojas en función de algún índice espectral así como el contenido de agua en unidades de masa del agua por área de las hojas, aplicándose en el control de los cultivos y la mejora de la productividad. Los instrumentos comercialmente diseñados para obtener la información espectral de las hojas, entre 350 y 2500 nanómetros, permitieron extender su uso y evaluar una serie de índices relacionados al contenido de clorofila, carotenoides, antocianinas y agua de las hojas, los cuales continúan utilizándose en el presente en el control de los cultivos y la flora (Zhang et al., 2022; Gao et al., 2024).

La aplicación de los índices espectrales propuestos en el contexto latinoamericano y peruano es todavía limitada (Loayza et al., 2023; Solano-Reynoso et al., 2024), en parte por el uso de técnicas de absorción y transmitancia de la luz a través de las hojas, como el SPAD (Yáñez-Segovia, 2023; Huang et al., 2023) que mide el contenido de clorofila por ser apreciablemente más baratas, sin embargo, no permiten obtener información del contenido de agua como lo hacen los espectrorradiómetros que miden hasta los 2500 nanómetros.

En la presente investigación se han utilizado índices espectrales de clorofila que permitieron determinar la clorofila de las hojas en microgramos por centímetro cuadrado extraídos de las publicaciones, como también el contenido de agua en gramos por centímetro cuadrado y el espesor equivalente del agua de las hojas frescas en centímetros, de algunas variedades de cultivos andinos de maíz, quinua y papas proporcionadas y cultivadas en las instalaciones del Instituto de Innovación Agraria (INIA) de la ciudad de Ayacucho, obteniendo comportamientos cualitativos similares del contenido de clorofila en cada tipo de cultivo, no ocurriendo lo mismo para el caso del contenido de agua y espesor equivalente del agua. Los resultados sugieren que es necesario investigar relaciones entre índices espectrales y contenido de agua o clorofila aplicables a cada tipo de cultivo.

1.1. Planteamiento del problema

La productividad en la producción agrícola primaria tiene que ver con la salud de las plantas, la cual, a su vez, con el buen desempeño de las funciones básicas del vegetal como la fotosíntesis y los recursos mínimos de agua, nitrógeno, minerales, etc., que garanticen las condiciones básicas para la mejor productividad agrícola. Así, tener información de los niveles de clorofila y agua en el desarrollo de los cultivos es fundamental para el seguimiento de la salud de las plantas (Jacquemoud y Ustin, 2019). Hasta aproximadamente la primera mitad del siglo XX los métodos de control de clorofila y agua de las hojas de las plantas eran destructivos, es decir, había que arrancar las hojas y extraer químicamente la clorofila para su cuantificación, siendo necesario el uso de solventes y la instrumentación necesaria para la cuantificación, como balanzas analíticas de bastante precisión y espectrofotómetros entre los principales instrumentos. Gracias a la aparición de la tecnología de los semiconductores y la miniaturización de los dispositivos, se fueron ensayando métodos ópticos para cuantificar el contenido de clorofila y agua de las hojas de los cultivos, definiendo y validando índices de contenido de clorofila y agua, dinamizada también por la tecnología satelital que permite la

observación de la superficie terrestre y, como consecuencia, algoritmos de cuantificación de parámetros relacionados a la salud de las plantas. Estas nuevas tecnologías se fueron introduciendo en la gran agricultura de los países desarrollados y en las dos últimas décadas en la agricultura de exportación de la costa peruana. Es limitado el uso de las nuevas tecnologías señaladas en la agricultura andina, posiblemente por desconocimiento y costos para el pequeño y mediano agricultor.

1.2. Descripción del problema

No es habitual cuantificar el contenido de clorofila y agua de las hojas de cultivos en la producción agrícola primaria en la región de Ayacucho y su área de influencia, especialmente usando tecnologías modernas no destructivas como los métodos ópticos, particularmente en evaluaciones de cultivos andinos de la región Ayacucho. La Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga dispone de un instrumento que es capaz de medir la reflectancia espectral de las hojas en el rango de 350 a 2500 nanómetros, que barre justamente el rango espectral de la fotosíntesis y bandas de absorción del agua, donde se almacena la información que permite evaluar el contenido de clorofila y agua de las hojas de las plantas. Esta posibilidad ha llevado a plantear la evaluación del contenido de clorofila y agua de algunos cultivos como la quinua, papa y maíz, en un intervalo de tiempo del período de desarrollo de los cultivos en las instalaciones del Instituto Nacional de Innovación Agraria con sede en la ciudad de Ayacucho, ubicado aproximadamente a 2700 msnm. Si bien, el seguimiento del desarrollo de los cultivos es importante, el uso de tecnologías modernas como los métodos ópticos, se van perfeccionando y abaratando los costos, siendo conveniente introducirlo en la agricultura de la región, especialmente por las adversidades climáticas, como la sequía, heladas, o exceso de lluvias, que pueden perjudicar la producción agrícola, para evaluar los impactos con datos validados científicamente y no estar restringido solamente a observaciones empíricas como tradicionalmente se hace.

En el marco del desarrollo sostenible y la seguridad alimentaria, la agenda 2030 aprobado en 2015 por las Naciones Unidas, que cuenta con 17 objetivos de desarrollo sostenible, especialmente el objetivo 2, de la lucha contra el hambre y mejora de la agricultura sostenible, el presente trabajo contribuye al conocimiento científico básico en función de la mejora de la productividad y la calidad alimentaria de la agricultura alto andina.

1.3 Formulación del problema

Problema general

¿Cómo el proceso de desarrollo de cultivos andinos modifican las reflectancias espectrales de las hojas, Provincia Huamanga, 2020?

Problemas específicos

- ¿Cómo el proceso de desarrollo de cultivos andinos modifica el índice y contenido de clorofila de las hojas de maíz, papa y quinua, Provincia de Huamanga, 2020?
- ¿Cómo el proceso de crecimiento de cultivos andinos modifica el índice y contenido de agua de las hojas de maíz, papa y quinua, Provincia de Huamanga, 2020?

1.4. Antecedentes

La cuantificación del seguimiento del desarrollo de las plantas mediante la reflectancia espectral de las hojas verdes, la cual es un fenómeno óptico de interacción de la luz con las hojas, es gracias al desarrollo de la tecnología de los semiconductores que fue introduciéndose desde los años 60 del siglo XX. La región espectral de interés se ubica entre 350 y 2500 nanómetros (nm), que es la visible, infrarrojo cercano y el infrarrojo medio, de donde se definen diferentes índices espectrales del contenido de clorofila y de agua. En la parte visible es donde se produce la fotosíntesis por la absorción de la luz por las moléculas de clorofila, mientras que en el infrarrojo cercano y medio hay varias bandas de absorción debido a la presencia de moléculas de agua líquida en las hojas. El interés y estímulo de estas investigaciones fue gracias

al lanzamiento de los satélites ambientales a partir de los años 70 del siglo XX. Las investigaciones específicas del contenido de clorofila de las hojas y del contenido de agua de las hojas se desarrollaron paralelamente a las mejoras de las tecnologías de observación satelital.

1.4.1. Antecedentes internacionales

Blackburn (1998), mediante un estudio descriptivo y relacional, se planteó la posibilidad de estimar pigmentos fotosintéticos utilizando la reflectancia espectral tomados de muestras de árboles senescentes y trabajo esencialmente descriptivo y relacional, propusieron varios índices, entre los cuales se tienen dos índices de la razón, uno específico a la clorofila *a* que se abrevia como $PSSRa = R_{800}/R_{680}$, donde PSSR se refiere a las siglas en inglés (Pigment Specific Simple Ratio). El otro índice específico a la clorofila tipo *b* es el $PSSRb = R_{800}/R_{635}$, encontrando relaciones empíricas para el contenido de clorofila en unidades mg cm^{-2} en función de los índices $PSSRa$ y $PSSRb$ con buenas correlaciones estadísticas. Asimismo, también encontró índices de diferencia normalizada específicas al pigmento (PSND, Pigment Specific Normalised Difference) dadas como $PSNDa = (R_{800} - R_{675})/(R_{800} + R_{675})$ y $PSNDb = (R_{800} - R_{675})/(R_{800} + R_{675})$. Otro aporte importante es el índice del pigmento insensible a la estructura (SIPI, Structure Insensitive Pigment Index), que lo relacionó a la razón del contenido de carotenoide a clorofila (Car/Chl), que es informativo del desarrollo saludable de la planta. En relación al desarrollo de las plantas, Merzlyak et al. (1999) propusieron un índice de senescencia de la planta (PSRI, Plant Senescence Reflectance Index).

Datt (1999, 1999b), mediante un estudio explicativo y relacional, dio un aporte importante de índices espectrales para la cuantificación del contenido de clorofila de las hojas, basado en fundamentos físicos teóricos, propuso un índice de tres bandas que es insensible al

esparcimiento de la luz en la hoja, pero muy sensible a los cambios de clorofila de las hojas, comprobando su propuesta en diferentes especies de hojas de eucalipto. Dicho índice es dado como $(R_{850} - R_{710}) / (R_{850} - R_{680})$, donde R_{850} es la reflectancia espectral en la longitud de onda 850 nm que corresponde al infrarrojo cercano donde la absorción es insignificante, R_{710} es la reflectancia en torno de la longitud de onda del borde rojo y R_{680} es la reflectancia para 680 nm, que corresponden a longitudes de onda en torno de la máxima absorción de la clorofila. Asimismo, encontró fórmulas semiempíricas que relacionan el contenido de clorofila a y clorofila $a + b$ con los índices de tres bandas propuestos. También evaluaron índices de la primera derivada del espectro de la reflectancia espectral que correlacionan bien con el contenido de clorofila, tales como los índices empíricos $D1_{754}/D1_{704}$ y $D1_{712}/D1_{688}$.

Gitelson et al. (2003), mediante una investigación explicativa y relacional, con datos de plantas jóvenes, maduras y senescentes, partiendo del recíproco de las reflectancias espectrales, $(R_{\lambda})^{-1}$, plantearon índices de reflectancia, comprobando que en el rango de longitudes de onda (λ) entre 525 y 555 nm y de 695 a 725 nm, existe una buena correlación con el contenido de clorofila. La exactitud mejora si la relación es dada como $[(R_{\lambda})^{-1} - (R_{\text{NIR}})^{-1}] R_{\text{NIR}}$, encontrando que hay tres bandas espectrales, ya sea 550 ± 20 nm, 715 ± 20 nm o 450 ± 20 nm, utilizando para el NIR longitudes de onda mayores a 750 nm.

Gitelson et al. (2009), siguiendo una investigación descriptiva y correlacional, se plantearon validar un modelo semianalítico de índices para estimar el contenido de clorofila y antocianinas de las hojas verdes, validando un índice que utiliza la reflectancia del verde (550 nm) y del borde rojo (700 nm) y otros que además incluye la reflectancia del infrarrojo cercano, en torno de 800 nm. También validó un índice del contenido de clorofila baso en el borde rojo e infrarrojo cercano. Utilizaron datos de muestras de cuatro tipos de plantas (Merzlyak et al.,

2008) para validar los índices. La investigación fue descriptiva por la validación y explicativa por el modelo semianalítico usado para plantear los índices.

Gitelson y Solovchenko (2017), realizando una investigación descriptiva y correlacional, basados en investigaciones previas de modelos de tres bandas (Gitelson et al., 2003; Gitelson et al., 2006, Gitelson et al., 2009) de las regiones del borde rojo, infrarrojo cercano y el verde del espectro electromagnético, propusieron relaciones que permiten determinar el contenido de clorofila y antocianinas de hojas. Siendo el nivel de investigación descriptivo, sus resultados son de alguna manera más generales, ya que utilizaron datos de 524 hojas de 45 diferentes especies y el contenido de clorofila es dado en microgramos/cm². Sus resultados incluyen una relación para determinar el contenido de clorofila a partir de los datos del sensor satelital MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometric) a bordo del Envisat de la Agencia Espacial Europea, usando el índice espectral MTCI = $(R_{753.75} - R_{708.75}) / (R_{708.75} - R_{681.25})$.

Li et al. (2019), con una investigación descriptiva y correlacional, consideraron la influencia de la reflexión angular en la exactitud de la estimación del contenido de clorofila de la hoja, para lo cual utilizaron tres especies de plantas y probaron varios índices espectrales de reflectancia, encontrando que la mejor correlación se da con el índice $(R_{720} - R_{761}) / (R_{720} - R_{672})$, al cual denominaron índice Datt modificado (MDatt), ya que se ha derivado de un índice propuesto por Datt (1999). Esta propuesta sugiere ser utilizada en mediciones de campo directamente en la planta, ya que la dirección de la reflexión de luz en las hojas se puede considerar cambiante. En la publicación no se encontró la relación del índice propuesto con el contenido de clorofila de la hoja.

Sun et al. (2021), siendo el nivel de investigación descriptiva y correlacional, evaluaron varios índices espectrales del contenido de clorofila, utilizando la reflexión multiangular

hiperespectral de 706 hojas de 10 especies de plantas, de los cuales la correlación lineal más alta resultó para el índice MDRI = $(R_{720} - R_{761}) / (R_{720} - R_{672})$, seguido de los índices Datt (Datt, 1999), Chl_{mND705} y Chl_{mSR705} . Asimismo, validaron 2024 hojas de 114 especies de plantas, utilizando aprendizaje de máquina y el modelo PROSPECT (Féret et al., 2017), obteniendo la mejor correlación lineal para el índice MDRI. Estos resultados son importantes, ya que los autores concluyen que el MDRI no depende de parámetros específicos a la especie de planta y pueden utilizarse mediciones de campo de la reflectancia espectral para cuantificar este índice espectral.

Paralelamente a las investigaciones del contenido de clorofila de las hojas, también se utilizaron los espectros de reflectancia de las hojas para definir índices de reflectancia de contenido de agua, cuyas bandas de absorción del agua se encuentran entre el infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo medio, para cuya validez se relacionaron con el contenido de agua definidos de acuerdo a las aplicaciones de interés. Las regiones de absorción de la luz por el agua en las hojas ya se conocían en la segunda mitad del siglo XX (Carlson et al., 1971; Hunt et al., 1987), centradas aproximadamente en longitudes de onda de 970 nm, 1200 nm, 1450 nm, 1950 nm y 2250 nm. Hay diferentes criterios para relacionar las cantidades relacionadas al contenido de agua de las hojas con los índices espectrales que definen el contenido de agua, los cuales se irán definiendo según la publicación de los autores. También es pertinente aclarar que los índices espectrales que se fueron definiendo y validando, estuvieron motivados no sólo por la búsqueda de técnicas ópticas para cuantificar el contenido de agua de las hojas, sino por necesidades de validar las observaciones satelitales en ciertas bandas del espectro electromagnético.

Peñuelas et al. (1993), mediante una investigación descriptiva, sometieron a plantas de frijoles, pimienta y gerbera a diferentes condiciones, midiendo el contenido relativo del agua,

potencial de agua y niveles de deshidratación, encontraron que cuando el contenido relativo de agua es más pequeño que 80-85 por ciento y el estrés del agua estuviera bien desarrollado, ocurren cambios significativos del índice R_{970}/R_{900} , donde 970 nm es la longitud de onda próxima de una de las regiones de absorción del agua y 900 nm es la meseta del infrarrojo cercano, donde la absorción es despreciable. Los cambios significativos debido al estrés del agua también se da en la longitud de onda donde se produce el mínimo de la reflectancia del infrarrojo cercano $\lambda_{\text{NIRminimum}}$ y el valor de la derivada de la reflectancia para tal mínimo $\lambda d_{\text{NIRminimum}}$. Se concluye que el índice R_{970}/R_{900} es adecuado para el seguimiento del contenido del agua.

Inoue et al. (1993), mediante una investigación de nivel descriptivo y correlacional, realizaron estudios usando muestras de trigo, maíz y maní de cultivos de campo. Usaron dos espectrorradiómetros para mediciones de campo y laboratorio y la esfera integrante para mediciones de la reflectancia en regiones de absorción del agua, como también el contenido de agua $WC = (FW - DW)/A$ y el contenido relativo de agua $RWC = (FW - DW)/(SW - DW)$, siendo A el área de la hoja, FW el peso fresco de la hoja, DW el peso seco de la hoja y SW el peso saturado. Ellos evaluaron varios índices y contenidos de clorofila con correlaciones encima del 90%, siendo algunos de ellos: $\ln R_{1910}$, $\ln R_{1430}$, $\ln R_{1650}$, R_{1650}/R_{1430} , R_{1100}/R_{1430} , $(R_{1200} + R_{1650})/R_{820}$. También propusieron relaciones lineales entre dos índices espectrales y el contenido de agua con correlación de 95%.

Datt (1999c), siguiendo una investigación descriptiva y correlacional, usando modelos semiempíricos se justifica la propuesta de índices espectrales y usando hojas verdes de 21 especies de eucalipto, evaluó el contenido de agua relacionándolos con el espesor equivalente de agua, encontrando que dos índices de tres bandas correlacionaron mejor. Dichos índices son

$(R_{850} - R_{1788})/(R_{850} - R_{1928})$ y $(R_{850} - R_{2218})/(R_{850} - R_{1928})$ con correlaciones de 76% y 78%, respectivamente.

Danson y Bowyer (2004), llevaron a cabo una extensa investigación descriptiva y relacional para encontrar índices espectrales del contenido de agua con parámetros característicos del contenido de agua de las hojas. Uno de ellos es el contenido de humedad de combustible que caracteriza el contenido de agua de la hoja en relación a la materia seca de la misma hoja, escrito como $FMC = (FW - DW)/DW$, donde DW (Dry Water) denota el peso de la hoja completamente seca y FW (Fresh Water) el peso de la hoja fresca, siendo la diferencia el agua que contenía en la hoja. La otra cantidad que caracteriza la humedad de la hoja es el espesor equivalente del agua, escrito como $EWT = (FW - DW)/A$, ya utilizado en publicaciones anteriores. Estos autores encontraron relaciones empíricas no lineales entre el índice de agua dado como $WI = R_{900}/R_{970}$ y el contenido de humedad de combustible expresado en porcentajes, como también relaciones no lineales entre el índice de agua de diferencia normalizada de la hoja (NDWI, Normalised Difference Water Index), escrita como $NDWI = (R_{860} - R_{1240})/(R_{860} + R_{1240})$ y el espesor equivalente del agua; igualmente la relación entre índice de estrés de humedad de la hoja dado como $MSI = R_{1600}/R_{820}$, y el espesor equivalente del agua.

Sun et al. (2008), mediante un estudio descriptivo y relacional, definieron un nuevo índice de reflectancia del agua relacionado al estrés, denominado índice de reflectancia del contenido de agua (WCRI, Water Content Reflectance Index), así como el incremento relativo de la reflectancia (RRI, Relative Reflectance Index), que se incrementa cuando disminuye el contenido relativo de agua (RWC, Relative Water Content). Se encontró que la longitud de onda de 1455 nm es la más sensible a los cambios del RWC, si bien hay otras longitudes de onda sensibles a los cambios del RWC como los de 1502 nm, 1391 nm y 1656 nm.

Genéricamente definieron $RRI_{\lambda t} = (R_{\lambda t} - R_{\lambda c})/R_{\lambda c}$, donde R_{λ} denota la reflectancia a la longitud de onda λ , c el control y t el tiempo transcurrido desde el inicio del estrés, definiendo también $WCRI = R_{\lambda SWIR}/(R_{\lambda NIR} - R_{\lambda SWIR})$, donde SWIR denota la longitud de onda en el infrarrojo medio y NIR en el infrarrojo cercano. Para tal efecto, se colocó $\lambda SWIR = 1455$ nm.

Yi et al. (2013) hicieron un estudio descriptivo y correlacional detallado para estimar el contenido de agua de las hojas relacionando con índices espectrales, utilizando parámetros característicos del contenido de agua de las hojas como el espesor equivalente del agua (EWT) y el contenido de agua de combustible (FMC). Utilizaron varios índices espectrales de agua de publicaciones previas e introdujeron índices basados en la primera derivada espectral, llegando a determinar que tanto EWT y FMC tienen una alta correlación lineal con los índices D_{1647}/D_{1133} y D_{1653}/D_{1687} , respectivamente; sin embargo, también se ha encontrado correlaciones con otros índices como $R_{900}/\min(R_{930}, R_{980})$ y normalizado $(R_{858} - R_{2130})/(R_{858} + R_{2130})$.

Kovar et al. (2019), siguiendo un estudio descriptivo relacional, evaluaron el espesor equivalente de agua (EWT) y el contenido de agua de combustible (FMC), tanto en unidades de peso de masa fresca de las hojas y de masa seca, relacionando con varios índices espectrales. Encontraron fuertes correlaciones con el índice de agua (WI), índice de banda de agua (WIB) y el índice de reflectancia fotoquímica (PRI).

1.4.2 Antecedentes nacionales

En cuanto a publicaciones nacionales donde específicamente se utilice la reflectancia espectral de las hojas, solamente se han encontrado algunas, posiblemente porque el instrumento básico utilizado en la investigación, como es el espectrorradiómetro, solamente lo poseen el Centro Internacional de la Papa (hasta 1100 nm), la Universidad Nacional de San

Cristóbal de Huamanga (hasta 2500 nm), y una reciente adquisición por parte de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (hasta 1100 nm).

Loayza et al. (2023), del Centro Internacional de la Papa (CIP), mediante un estudio descriptivo y correlacional, utilizaron tres tipos de papas SA-2563, Pumamaqui y Purranca, donde midieron el espectro de reflectancia de los folíolos sin nervaduras, realizando mediciones de clorofila con un aparato que mide SPAD-2055 y con extracción de la clorofila para cuantificar el contenido de clorofila. Las correlaciones encontradas entre el contenido de clorofila y valores SPAD resultaron más del 90%, como también con las amplitudes de las derivadas de la reflectancias espectrales en 715 y 725 nm.

Solano-Reynoso et al. (2023), como parte de una investigación conjunta entre la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga y el Instituto Nacional de Innovación Agraria, Ayacucho, realizaron estudios descriptos de diferentes índices de reflectancia espectral de clorofila, carotenoides, antocianinas y la relación de carotenoides/clorofila, con dos variedades de cultivos de maíz, papas y quinua, encontrando comportamientos diferenciados entre dichos cultivos y que el uso de dichos índices contribuirían a monitorear el desarrollo de los cultivos durante su crecimiento hasta la madurez, en diferentes aplicaciones agronómicas.

1.5. Justificación de la investigación

El conocimiento del contenido de clorofila y agua de las hojas de las plantas tiene un interés científico, ya que se relaciona con la fisiología de la planta, que depende de factores ambientales y la manera particular de cómo la planta responde a dichos factores. Si bien el conocimiento ancestral de los cultivos andinos es importante, sin embargo, a la luz del conocimiento científico y tecnológico actual que proporciona instrumentación moderna, hay todavía limitaciones en el conocimiento intrínseco de los cultivos andinos, especialmente lo relacionado a la productividad agrícola.

En este contexto, contando con técnicas ópticas no destructivas y teniendo en cuenta que una de las funciones más importantes de las plantas es la fotosíntesis, es posible medir la reflectancia espectral de las hojas del cual se puede extraer información del contenido de clorofila y agua, como también otros pigmentos de las hojas como carotenoides y antocianinas, habiendo perspectivas prometedoras de ampliar investigaciones futuras de diferentes cultivos de nuestra región y relacionarlo con las propiedades de los suelos, nitrogenación de las plantas, contaminación de suelos, especialmente metales pesados, etc.

En términos de producción agrícola alimentaria, la presente investigación es una contribución al conocimiento básico de las condiciones bajo las cuales se desarrolla el cultivo y sus cambios por efectos ambientales y calidad de suelos. Las mismas técnicas se aplican en la conservación de la flora natural de la región, ya que la clorofila es un pigmento esencial para la fotosíntesis la cual necesita de agua para tal proceso en la captación y almacenamiento de energía, siendo esencial en la salud y crecimiento de las plantas. Paralelamente, el conocimiento del contenido de agua de las hojas para su desarrollo está también relacionado al uso óptimo del recurso hídrico en la productividad de los cultivos. Así, en el marco del desarrollo sostenible, la seguridad alimentaria y preservación de la flora nativa, las técnicas ópticas utilizadas en este trabajo, contribuirán no sólo al conocimiento científico, sino también a las aplicaciones que de ella se derivan en beneficio de la alimentación y preservación de la flora nativa andina.

1.6. Limitaciones de la investigación

Hay limitaciones de orden económico y de tiempo para realizar las mediciones si se quisiera abarcar más variedades y a diferentes alturas, motivo por el cual se está considerando tres especies de cultivos representativos con dos variedades de cada uno de ellos, sembrados en las instalaciones del Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Ayacucho ubicada en el entorno de la ciudad de Ayacucho a una altura aproximada de 2700 msnm, por tener las

facilidades y la cercanía para realizar un seguimiento del cultivo y las correspondientes mediciones. Sin embargo, los resultados que se espera encontrar pueden ser un punto de partida para realizar investigaciones futuras de otras variedades y en diferentes pisos altitudinales, lo cual significaría dedicar más tiempo y ampliar los costos de operativos.

1.7. Objetivos de la investigación

Objetivo general

Determinar en el proceso de desarrollo de cultivos andinos las reflectancias espectrales de las hojas, Provincia de Huamanga, 2020.

Objetivos específicos

- Determinar en el proceso de desarrollo de cultivos andinos el índice y contenido de clorofila de las hojas de maíz, papa y quinua, Provincia de Huamanga, 2020.
- Determinar en el proceso de desarrollo de cultivos andinos el índice y contenido de agua de las hojas de maíz, papa y quinua, Provincia de Huamanga, 2020.

1.8. Hipótesis

Hipótesis general

El proceso de desarrollo de cultivos andinos modifica significativamente las reflectancias espectrales de las hojas, Provincia de Huamanga, 2020.

Hipótesis específicas

- El proceso de desarrollo de cultivos andinos modifica significativamente el índice y contenido de clorofila de las hojas de maíz, papa y quinua, Provincia de Huamanga, 2020.
- El proceso de desarrollo de cultivos andinos modifica significativamente el índice y contenido de agua de las hojas de maíz, papa y quinua, Provincia de Huamanga, 2020.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Base teórica

La luz es una onda electromagnética que al interactuar con cualquier tipo de sustancia o material, es reflejada, absorbida o transmitida, cuya descripción y observación es posible con ayuda de instrumentos especializados que cuantifica la energía de la onda electromagnética. Las características mencionadas son utilizadas para entender la reflexión, absorción y transmisión de la luz por las hojas de las plantas, siendo la función más importante de las hojas la absorción de la luz para la fotosíntesis que consiste en utilizar la energía de la luz para los procesos bioquímicos que necesita la planta en su desarrollo y supervivencia. La cuantificación de la luz reflejada por los materiales en relación a la incidente en diferentes regiones del espectro electromagnético, se denomina reflectancia espectral (Jacquemoud y Ustin, 2019; Roberts et al., 2019), cuyo análisis permite identificar la naturaleza de cada tipo de material cuando es analizada en función de la longitud de onda o frecuencia de la luz incidente y reflejada.

Una de las interacciones fundamentales encontradas en la naturaleza es la electromagnética, cuya síntesis en el marco de la física clásica fue dada por Maxwell en sus ecuaciones y forma parte de un curso de electromagnetismo y óptica (Griffiths, 2013; Hetch, 2017; Guenter, 2020), demostrándose que la luz es una onda electromagnética cuyas fuentes son de diferente naturaleza, siendo el Sol una fuente esencial para la vida en nuestro planeta. El conocimiento actual, basado en la mecánica cuántica, nos dice que los portadores del campo electromagnético son los fotones con energías discretas dadas como $h\nu$, donde h es la constante de Planck y ν denota la frecuencia expresada en Hertz en el sistema internacional (Hetch, 2017). Estos fotones interactúan con los electrones y protones que también forman parte de la estructura de los átomos que, a su vez, interactúan con otros átomos para formar moléculas,

que en el caso de la vida terrestre son las moléculas orgánicas como las proteínas y diversas biomoléculas.

De este modo, la naturaleza atómica de la materia y sus interacciones entre sí y con el medio que los rodea son de naturaleza fundamentalmente electromagnética moldeada por la interacción gravitacional en nuestro planeta. En otras palabras, la vida en nuestro planeta se ha desarrollado gracias a la presencia del Sol quien nos envía ondas electromagnéticas, donde la energía máxima del espectro se da precisamente en el rango visible que corresponde justamente a lo que normalmente denominamos luz visible y nos permite ver el medio que nos rodea y donde se produce la fotosíntesis para captar la energía del Sol y desarrollar la vida de las plantas (Brinkert, 2018, Covshoff, 2018; Croce, 2018).

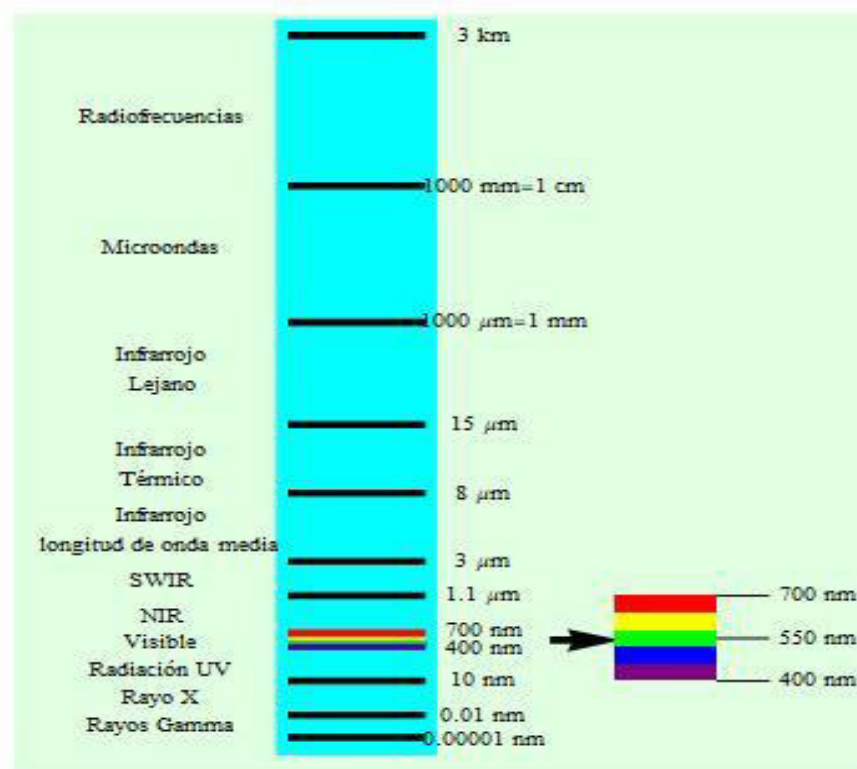
2.1.1. El espectro electromagnético

El Sol es un cuerpo emisor de ondas electromagnéticas llegando una parte de ella a la Tierra. Ahora se sabe que dicha radiación es emitida desde los rayos gama, que son las más energéticas con longitudes de onda más pequeñas, pasando luego por los rayos X, ultravioleta, visible, infrarrojo, hasta las microondas y radioondas, como se muestra en el esquema en la Figura 1. La composición de la radiación electromagnética en sus diferentes longitudes de onda se denomina espectro electromagnético y sus propiedades se pueden encontrar en textos especializados (Griffiths, 2013; Hetch, 2017; Guenter, 2015). El espectro electromagnético también se representa en función de la frecuencia ν , donde las más energéticas corresponden a las de mayor frecuencia justificada por la relación $E = h\nu$. Puesto que $c = \nu\lambda$, donde c es la velocidad de la luz, la energía se escribe como $E = hc/\lambda$, observando que los fotones menos energéticos tienen mayores longitudes de onda o, equivalentemente, menores frecuencias. Observando la Figura 1, los rayos gamma al ser de longitudes de onda más pequeñas, son las más energéticas y de mayor frecuencia, originándose en los núcleos atómicos. Los rayos X se

pueden producir por cargas eléctricas altamente aceleradas y también los electrones atómicos más energéticos, siguiendo en orden los rayos ultravioleta y visible, hasta las ondas de radio.

Figura 1

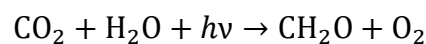
Espectro electromagnético y sus diferentes regiones



Si bien el término luz se refiere al visible, por costumbre, uso y abreviatura, se referirá a todo el espectro electromagnético. Es de importancia particular la parte visible del espectro, el infrarrojo cercano (NIR, Near InfraRed) e infrarrojo medio (SWIR, Short Wave Infrared) debido a que en la parte visible se produce la fotosíntesis de las hojas de las plantas (Golbeck y van der Est, 2014; Brinkert, 2018, Covshoff, 2018) y en el infrarrojo cercano y medio se puede detectar el agua contenida en las hojas. Observando la Figura 1, notar que la parte visible del espectro es una franja estrecha compuesta de los colores que nuestra visión es capaz de captar, desde aproximadamente 400 nm hasta 700 nm.

2.1.2. Absorción de la luz por la clorofila y otros pigmentos

Para la medición de las señales en las diferentes regiones del espectro, se definen cantidades radiométricas que se relacionan con las mediciones energéticas de las diferentes partes del espectro electromagnético. En términos generales, la radiación electromagnética incidente en los materiales, particularmente en las hojas vegetales, es absorbida, reflejada y transmitida. En la Figura 2 se tiene el espectro de absorción de los pigmentos de las hojas verdes terrestres, que está compuesto por la clorofila *a*, clorofila *b*, carotenoides y antocianinas, observando que entre 400 y 500 nanómetros están los picos de absorción de las dos clorofilas y carotenoides. Entre 500 y 600 nanómetros disminuye la absorción de los anteriores pigmentos a casi cero, correspondiendo a un incremento de la reflectancia. Sin embargo, en dicha región se produce la absorción de las antocianinas (Figura 2), lo cual contribuye en la disminución del pico de la reflectancia (Gitelson et al., 2001). Entre 600 y 700 nm las dos moléculas de clorofila absorben otra vez la luz (Figura 2) que corresponde al rojo de dicha región. En general, la energía de los fotones de la luz visible absorbida por las moléculas de clorofila es utilizada para producir la reacción química que combina las moléculas de agua y del dióxido de carbono para producir los carbohidratos (Jacquemoud & Ustin, 2019, Roberts et al., 2019), lo cual se esquematiza en la reacción siguiente:

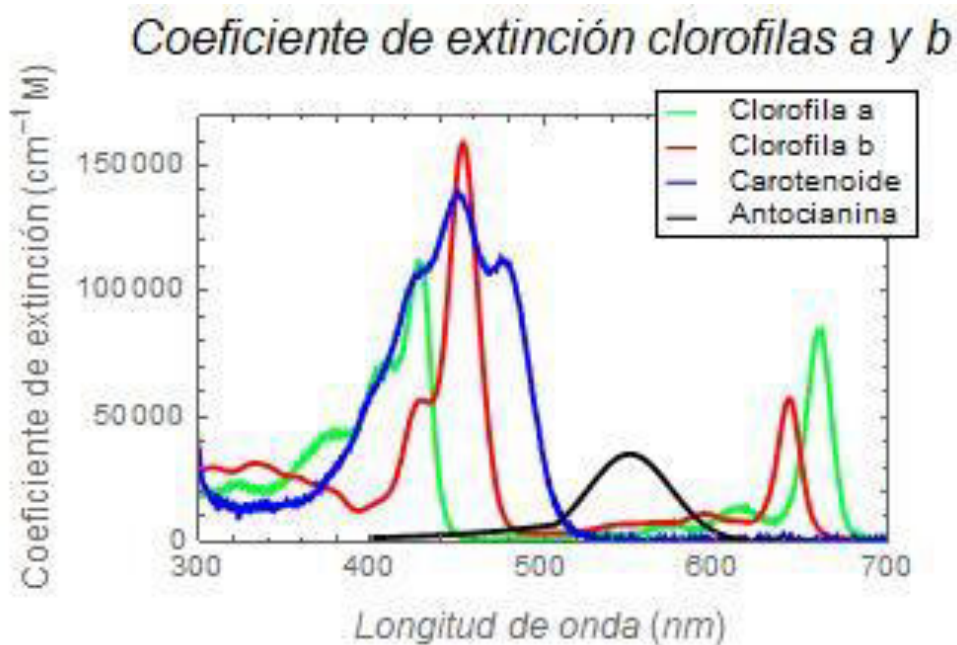


donde $h\nu$ representa la energía del fotón de luz proporcionada para que el dióxido de carbono y la molécula de agua se transformen en una molécula de carbohidrato y otra de oxígeno, que es justamente lo que respiramos.

La fotosíntesis es la función más importante realizada en nuestro planeta para la vida, gracias a ella se capta la energía del Sol, hoy tenemos fuentes energéticas como gas, petróleo y carbón.

Figura 2

Espectro de absorción de los pigmentos contenidos en las hojas verdes: Clorofila, carotenoides y antocianinas.



Nota: Gráfica elaborado por datos de clorofila y carotenoides obtenidos en internet: <https://omlc.org/spectra/PhotochemCAD/html/125.html>.

2.1.3. Reflectancia espectral de las hojas.

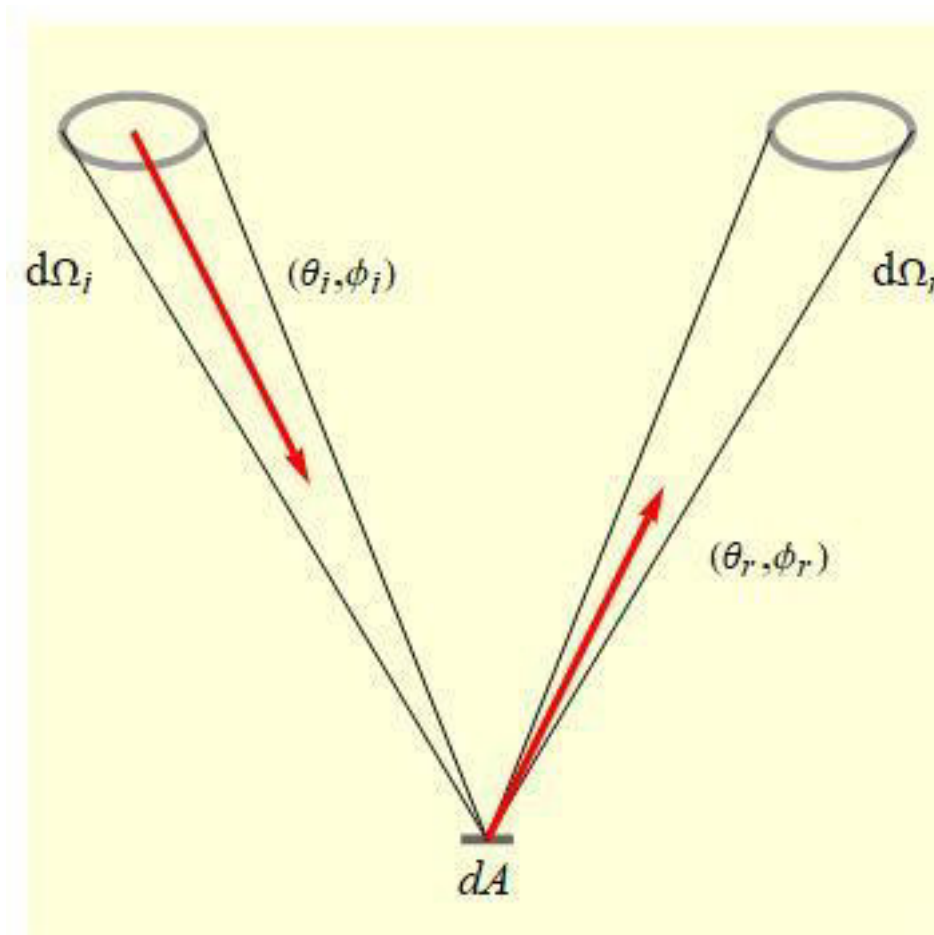
Se puede imaginar la incidencia de la radiación en una pequeña área de la hoja y cuantificar energéticamente usando el concepto de **radiancia espectral**, como el flujo de energía radiante por unidad de tiempo, unidad de área, unidad de ángulo sólido y de intervalo de longitud de onda, con unidades $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{nm}^{-1}$, que incide en un área denotado como dA , en la cual una parte penetra en la hoja para ser absorbida y transmitida, mientras que la restante es reflejada. La expresión matemática para representar la energía reflejada en la superficie por cada intervalo de longitud de onda (Schaeppman-Strub et al., 2006; Qiao et al., 2022) es dada por la expresión:

$$R_t(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \frac{L_t(\theta_r, \phi_r, \lambda)}{L_{\text{ref}}(\theta_i, \phi_i, \lambda)} R_r(\lambda),$$

donde $L_t(\theta_r, \phi_r, \lambda)$ es la radiancia espectral observada en la dirección (θ_r, ϕ_r) , $L_{\text{ref}}(\theta_i, \phi_i, \lambda)$ es la radiancia de la placa de referencia lambertiana medida por el espectrorradiómetro, $R_r(\lambda)$ es la reflectancia de la placa lambertiana de referencia y $R_t(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)$ es la reflectancia direccional calculada en la dirección (θ_i, ϕ_i) cuando la incidencia está en la dirección (θ_r, ϕ_r) . Una superficie se dice lambertiana cuando refleja igualmente en todas las direcciones. En la Figura 3 se representa esquemáticamente el proceso físico de incidencia y reflexión.

Figura 3

Radiación incidente y reflejada en la superficie dA .

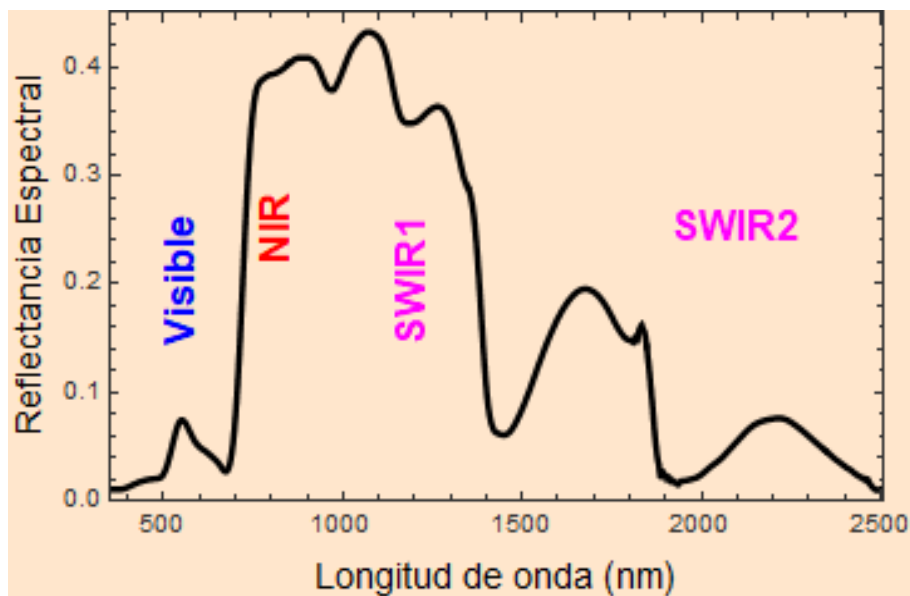


2.1.4. Contenido de clorofila

En la Figura 4 (a) se muestra la reflectancia de una hoja vegetal en el intervalo de 350 a 2500 nanómetros, donde puede observarse que en el rango visible se produce un primer pico importante que corresponde a la reflectancia en el verde, es decir, la luz reflejada por las hojas que llega a nuestros ojos y ver la coloración verde de las hojas. Luego se observa un mínimo debido a la absorción de la luz en el rojo, es decir, poquísima reflectancia en dicha región. Después se observa el rápido crecimiento de la reflectancia hacia longitudes de onda mayores, que corresponde al infrarrojo cercano (NIR, Near Infrared), observando valores altos de la reflectancia, es decir, muy poca absorción de la onda electromagnética, pasando por regiones del infrarrojo cercano y medio denominados SWIR1 y SWIR2 (Short Wave Infra Red), donde se observa máximos y mínimos hasta los 2500 nm. En esta región los mínimos de la reflectancia corresponden a la absorción de las moléculas de agua centrados en longitudes de onda de 970, 1200, 1470, 1900 y 2500 nanómetros (Jaquemoud y Ustin, 2019).

Figura 4

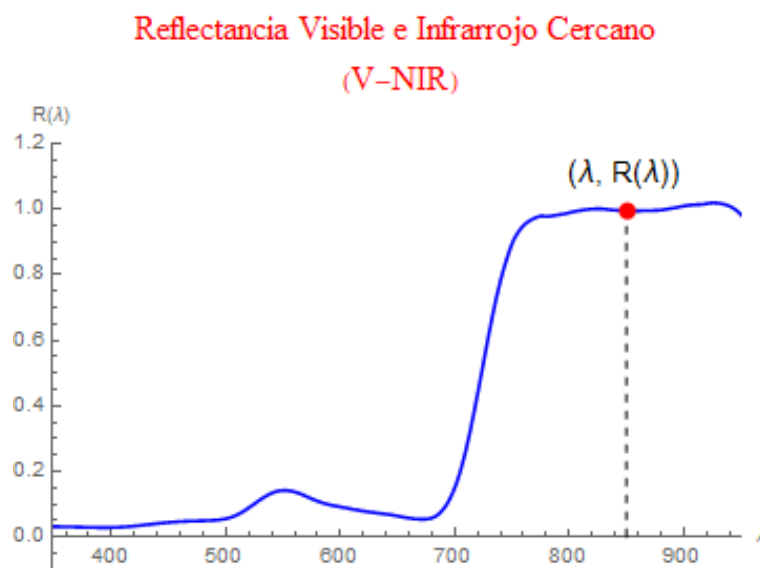
Reflectancia espectral típica de hojas verdes terrestres entre 350 nm y 2500 nm



La Figura 5 es una ilustración del par de valores $(\lambda, R(\lambda))$, que representa la gráfica de la reflectancia espectral en función de la longitud de onda, cuyos puntos son obtenidos por el espectrorradiómetro. Normalmente las longitudes de onda se miden en nanómetros ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) y la reflectancia espectral es una cantidad adimensional que relaciona la intensidad de la energía reflejada a la incidente de la luz en la hoja.

Figura 5

Ilustración del par de valores $(\lambda, R(\lambda))$ almacenados por el espectrorradiómetro

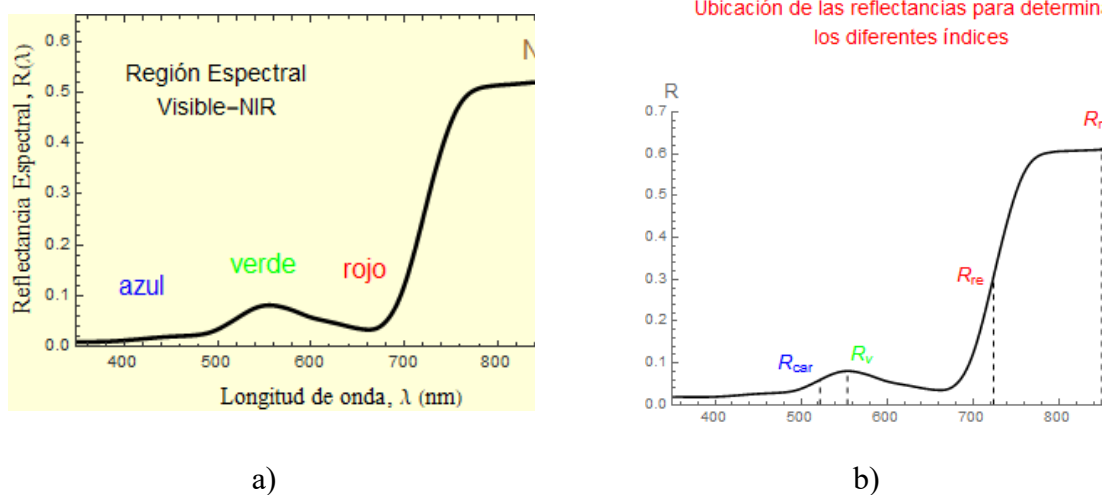


En las Figuras 6(a) y 6(b) se identifican las regiones importantes de la reflectancia, mostrando la región visible donde la visión humana es capaz de distinguir, mientras que en la Figura 6(b) se muestran los puntos más utilizados en la definición de los índices de contenido de clorofila. Estas figuras son importantes para entender los diferentes índices definidos en relación al contenido de clorofila. El mínimo de reflectancia mostrada en aproximadamente 670 nm, corresponde a los segundos picos de absorción de la clorofila *a* y *b* que se han observado en la Figura 2. Del extremo rojo visible se observa una subida rápida de la reflectancia hacia el infrarrojo cercano (NIR), definiéndose el llamado borde rojo (RE, Red Edge), cuya reflectancia se denota como R_{re} , el cual es un punto de inflexión que

geométricamente representa el cambio de concavidad de una curva, es decir, un punto donde su derivada tiene un máximo (Horler et al., 1983; Boochs et al. 1990; Curran et al., 1990; Curran et al., 1991; Filella y Peñuelas, 1994; Danson y Plummer, 1995). Esta propiedad se ha utilizado para relacionarlo con el contenido de clorofila de las hojas y su ubicación es importante para dichos fines, dando lugar a numerosos estudios los cuales tienen que ver con el desarrollo de las plantas con aplicaciones en agricultura para la mejora de la producción (Liu et al., 2018; Zheng et al., 2018; Velichkova y Krezhova, 2019).

Figura 6

(a) Región visible del espectro de reflectancia mostrando los colores que distingue nuestra visión. (b) Puntos importantes en la evaluación de índices de contenido de clorofila

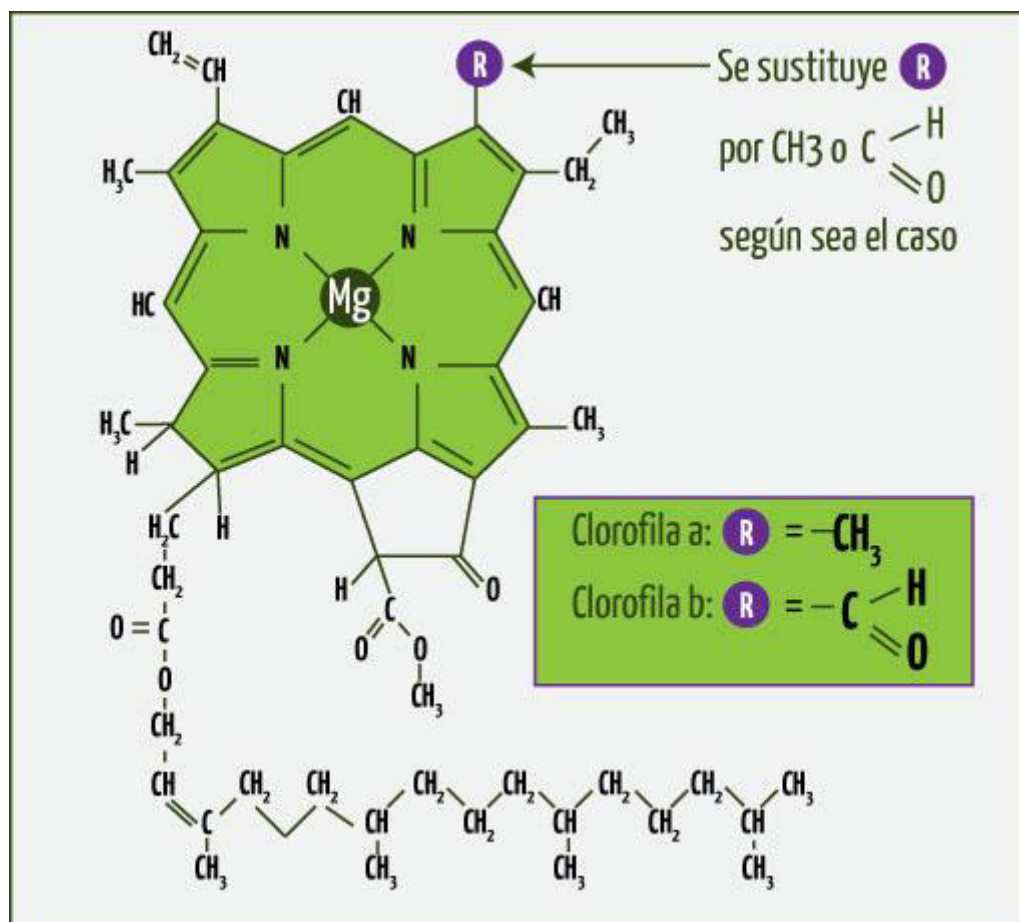


Ya que la clorofila es una molécula especializada en la absorción de la luz, que transforma la energía solar en energía química para los diferentes procesos bioquímicos que se dan en las funciones celulares para el desarrollo de las plantas, hay diferentes tipos de clorofila, como en las algas marinas, que han desarrollado hasta cuatro tipos de clorofila denominadas Chl *a*, Chl *b*, Chl *c* y Chl *d*, cuya complejidad se debe a la mayor dificultad en captar la energía solar. En el caso de las plantas terrestres se tienen básicamente las clorofilas Chl *a* y Chl *b*

(Golbeck, 2014; Brinkert, 2018, Covshoff, 2018; Croce, 2018), que han evolucionado en la optimización de la cosecha de luz, mostrándose en la Figura 7 el esquema de la estructura de ambas moléculas, que las diferencia solamente por el tipo de radical mostrado por una flecha.

Figura 7

Molécula de clorofila a y b



Nota: Tomado de <https://quimica.substack.com/p/quimica-de-la-clorofila>.

Además de la clorofila, se tienen otros pigmentos que desempeñan roles complementarios a la clorofila. Los carotenoides, que es un grupo importante de pigmentos fotosintéticos para la captura de luz en la región espectral del azul-verde y transferida a la clorofila. Los carotenoides también cumplen una función de fotoprotección de la clorofila por exceso de luz y convertirlo en energía térmica (Sonobe & Wang, 2018). El otro pigmento es la antocianina (Gould et al., 2009; Agati et al., 2022), que desempeña un rol fotoprotector de la

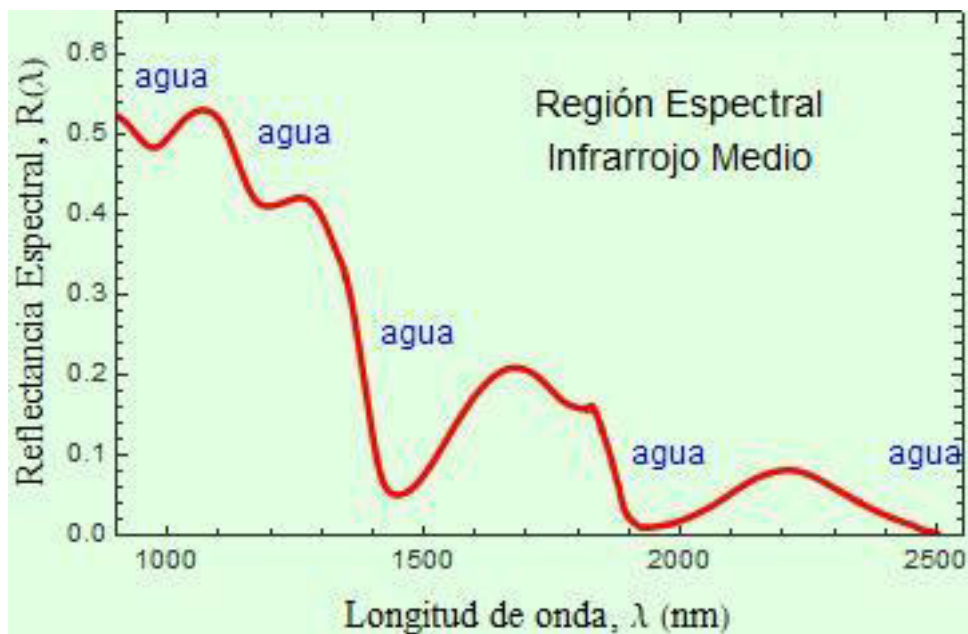
clorofila en la captura de luz, si bien algunos aspectos de sus funciones no están todavía bien esclarecidos (Agati et al., 2022).

2.1.5. Contenido de agua de las hojas.

En la definición de los índices espectrales del contenido de agua, se han relacionado regiones cercanas a los mínimos de reflectancias en el infrarrojo cercano y medio, conforme a la Figura 8; sin embargo, se han relacionado y validado con diferentes criterios de cuantificación del contenido de agua, donde básicamente se colecta las hojas frescas para someterlas a procedimientos como pesar y secar completamente los pedazos de hoja para permitir medir el agua contenida en las hojas frescas (Jacquemoud y Ustin, 2019).

Figura 8

Región del infrarrojo cercano y medio, mostrando los valles de absorción del agua, a longitudes de onda de 970, 1200, 1470, 1900 y 2500 nm

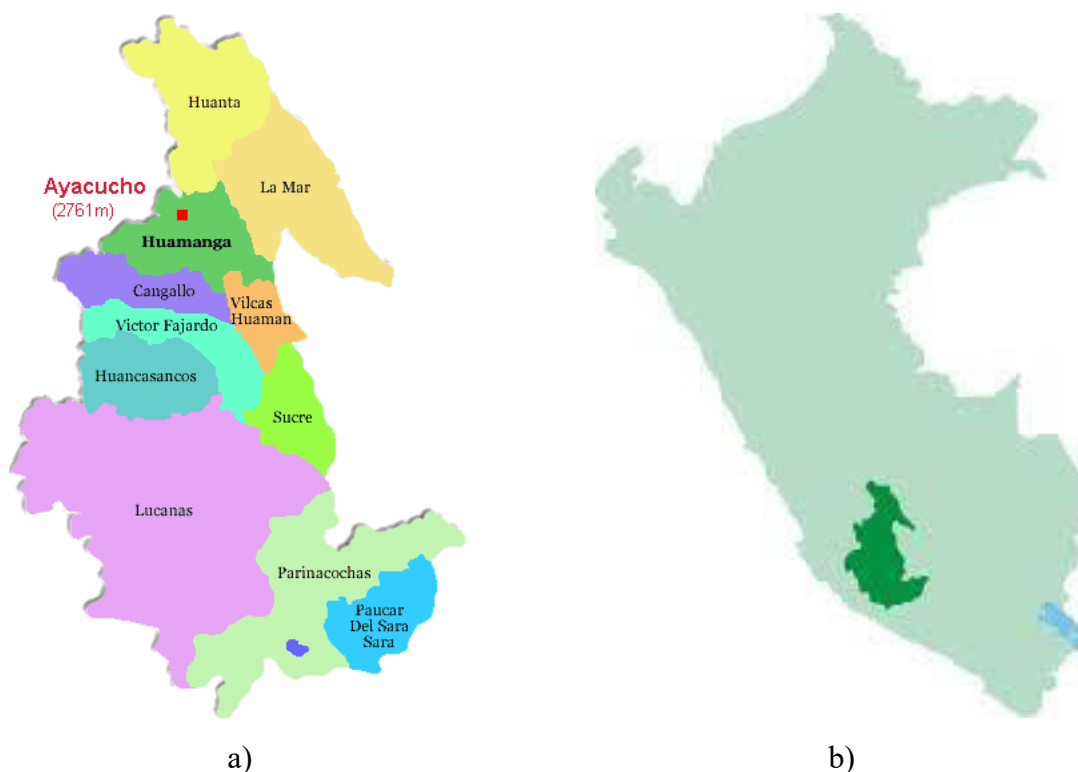


2.1.6. Ubicación de la Provincia de Huamanga

La provincia de Huamanga está ubicada en la parte norte de la región Ayacucho, donde también se sitúa la ciudad de Ayacucho, capital de la Región, con aproximadamente 250 mil habitantes según el censo de 2015. Como se observa en el mapa de la Figura 6, limita por el norte con las provincias de Huanta y la Mar, por el este con la región Huancavelica y al este con la región Apurímac. Por el sur se tienen a las provincias de Cangallo y Vilcashuamán. Si bien la provincia es un territorio árido de tierras poco cultivables, posee valles debajo y encima de los 3000 msnm donde se han desarrollado la agricultura nativa de maíz, papa, quinua, kiwicha y otros productos.

Figura 9

(a) Región Ayacucho y su división política. (b) Ubicación de la región Ayacucho en el Perú



Nota: Tomado de Wikipedia la enciclopedia libre

En las dos últimas décadas, gracias al proyecto de irrigación Cachi, se ha logrado incrementar la producción ganadera y, por tanto, lechera y sus derivados, impulsando también la producción agrícola por encima de los 3000 msnm que contribuye al abastecimiento del consumo local de la ciudad de Ayacucho con una población cada vez más creciente.

2.1.7. Desarrollo sostenible y seguridad alimentaria

La producción alimentaria es clave para un país o grupo social, ya que es parte de la propia sobrevivencia de la sociedad. En la época actual, especialmente por el incremento de la población, hay la necesidad de incrementar áreas agrícolas para la producción, llevando al deterioro de los suelos, la flora y fauna nativa, alterando el equilibrio ambiental. Nos encontramos en una época especial en el que nuestra responsabilidad no es sólo el presente, sino el futuro de la humanidad y el ambiente que debe preservarse. De acuerdo a los compromisos internacionales sobre desarrollo sostenible y seguridad alimentaria, no se trata solamente del derecho de las personas de tener acceso a suficientes alimentos de calidad, sino de garantizar la disponibilidad de los recursos para las futuras generaciones (Lescano-Sandoval et al., 2011). Los conocimientos ancestrales de la producción alimentaria andina, si bien importantes, no son suficientes en la actualidad para garantizar la mejor productividad agrícola sin causar daños ambientales irreversibles, puesto que el conocimiento científico y tecnológico actual permite conocer detalles de la naturaleza del suelo, el funcionamiento fisiológico de las plantas en el proceso fotosintético y la influencia ambiental en dicho funcionamiento, para conocer las fortalezas y debilidades de la planta, lo cual ayuda a tomar decisiones adecuadas en la mejora de la productividad del cultivo y minimizar efectos negativos ambientales.

Bajo el reconocimiento que la fotosíntesis es uno de los procesos fisiológicos y bioquímicos más importantes de nuestro planeta, Li et al. (2023) realizaron una revisión de factores restrictivos e investigaciones para mejorar la eficiencia fotosintética de las plantas,

tales como los mecanismos moleculares de la fotosíntesis para mejor entender el proceso fotosintético que se da en las hojas de las plantas y, como consecuencia, la mejora de la eficiencia fotosintética de las plantas, especialmente en lo referentes a los cultivos alimenticios, orientando así las investigaciones para reducir impactos negativos sobre las plantas.

2.1.8. Fotosíntesis y cambio climático

Si bien la presente investigación no está relacionado al cambio climático, hay una relación entre la fotosíntesis de las plantas terrestres y el rol que desempeña en el balance del intercambio de carbono en la biosfera, donde el concepto de producción primaria bruta (PPB) de la vegetación terrestre es vital para comprender el ciclo global del carbono y predecir el cambio climático futuro (Gitelson et al., 2015; Gitelson et al., 2016). Actualmente hay disponibles varias maneras de calcular la producción primaria bruta (Gitelson et al., 2016), pero sus resultados varían sustancialmente cuando se validan los cálculos o estimaciones. La productividad primaria bruta desempeña un rol importante en el balance y ciclo global del carbono, con estimaciones a través de modelos de la eficiencia del uso de luz, habiendo planteamientos que mejoran los modelos (Wang et al., 2017), teniendo en cuenta la absorción de la radiación fotosintéticamente activa y la eficiencia del rendimiento cuántico intrínseco de la fotosíntesis (Zhang et al., 2024). Para tener en cuenta el consumo de carbono por la fotosíntesis y el balance de carbono en la biosfera, la producción primaria bruta y el uso eficiente de la luz, toman en cuenta la fotosíntesis en plantas (Wang et al., 2017), planteándose una ecuación para tal fin, tomando en cuenta también el uso eficiente de la luz. El contenido de clorofila de las plantas, tanto de la clorofila *a*, *b* y *a + b* están relacionados a los efectos debido al clima, suelo, etc., habiendo investigaciones para ver hasta qué punto el contenido de clorofila de bosques naturales influyen en el funcionamiento de los ecosistemas (Li et al., 2018). Es así que en los últimos años se ha dado bastante importancia debido a su relación con la producción primaria y la seguridad alimentaria (Liu et al., 2022).

2.1.9. Proceso de desarrollo de cultivos y reflectancias espectrales

Si bien el término proceso de desarrollo es genérico, dependiendo de qué tipo de desarrollo se trate, en cuanto a agricultura se puede considerar como las etapas o fases desde la preparación del terreno, germinación de las plantas, crecimiento hasta la floración y consecuente madurez del cultivo hasta la cosecha. En cada una de las etapas, los requerimientos de agua, luz, abono, etc., varían conforme a las condiciones ambientales de su entorno. En la etapa intermedia los cultivos visualmente se observan verdes debido a la absorción de la luz por la clorofila en el azul y rojo. Tener en cuenta que nuestro mecanismo de la visión solamente distingue el espectro visible dándonos la sensación de los diferentes colores, siendo el verde la parte del espectro visible que más se refleja en las hojas en la etapa joven, surgiendo los colores amarillentos a marrones claros cuando se da el proceso de madurez, donde paulatinamente la función fotosintética de la clorofila de las hojas se va deteriorando y comienza a crecer la importancia de los carotenoides, que reflejan la luz más amarilla (Jacquemoud y Ustin, 2019). En cuanto a la absorción del agua por las hojas verdes, se da en el infrarrojo cercano y medio, región que no es observada por nuestro mecanismo de la visión, requiriendo de la ayuda de detectores del infrarrojo para observar la absorción del agua. Así, en la etapa joven de las plantas de cultivo es donde la función fisiológica de las hojas se puede mejor distinguir mediante aparatos tales como el espectrorradiómetro cuyas gráficas se muestran en la Figura 4, Figura 6 y Figura 8, que son capaces de registrar la reflectancia espectral entre 350 y 2500 nanómetros, dando información de lo señalado líneas arriba, es decir, de las regiones del proceso fotosintético y absorción del agua, entre las más importantes.

2.2. Marco filosófico.

Los cultivos andinos son parte de la historia del desarrollo de la agricultura andina desde que el hombre comenzó a domesticar las plantas y dar nacimiento a las diferentes culturas que se desarrollaron hasta llegar al imperio Inca. El Perú, antes de la llegada de la colonización

española, era básicamente un país agrario, especialmente en la región de la costa y sierra, con dominio de la agricultura y conocimientos acumulados y estudios en la mejora de la producción agrícola. En la época colonial y republicana del siglo XIX y hasta finales del siglo XX, la agricultura de cultivos andinos fueron básicamente de subsistencia y su valoración comenzó a darse con el uso de las tecnologías modernas que fueron capaces de identificar diversas características alimenticias de cultivos como la quinua, kiwicha, maíz morado, diferentes variedades de la papa, tarwi, etc., que proporcionaban cualidades nutritivas mayores que otros cultivos no oriundos. Así, en las primeras décadas del presente milenio se da importancia a la producción de los cultivos andinos por su valor alimenticio y económico como producto de exportación. Sin embargo, dado nuestro retraso científico y tecnológico y poco apoyo a la investigación, todavía no se ha llegado a acumular el conocimiento científico necesario para mejorar la calidad y productividad de los diferentes cultivos y sus variedades, teniendo limitaciones al respecto. En este contexto, el uso de fertilizantes, agroquímicos y otros productos, no sólo por la necesidad de incrementar la productividad, sino también por el control de enfermedades, la agricultura andina está siendo afectada por la contaminación de los suelos y, por consiguiente, de los productos alimenticios consumidos. Paulatinamente viene tomándose conciencia de la importancia de la investigación científica en la producción y cuidado ambiental, que es un aspecto importante a tomarse en cuenta (Campillo, 2019), ya que de otro modo, el simple conocimiento empírico y tradicional no es suficiente por los grandes problemas de contaminación ambiental que se padece en esta época. Así, la investigación científica para la mejora de la producción agrícola está relacionada a la seguridad alimentaria de una población cada vez más creciente, donde hay que incrementar la productividad en beneficio de la sociedad, más aún tratándose de productos nativos andinos producidos encima de los 2500 msnm, cuyas cualidades alimenticias naturalmente evolucionadas deben ser aprovechadas. Las mismas metodologías científicas utilizadas en la mejora de la producción

agrícola alimentaria son válidas también en el caso de investigaciones de la flora natural nativa, por lo cual se puede extender a investigaciones hacia el conocimiento de las condiciones de conservación de la flora natural. Sin embargo, como señala el filósofo alemán Jonas (1996), la humanidad debe mantener un principio de responsabilidad en el uso de las ciencia y tecnología moderna, cuidando la vida natural y garantizando la supervivencia de la vida, en general, en el devenir de nuestro planeta.

2.3. Marco conceptual.

La investigación utiliza instrumentos basados en la interacción de la luz con las hojas de plantas, en particular las hojas de los cultivos andinos estudiados. Como consecuencia de dicha interacción, el aparato proporciona información de la luz que se refleja en las hojas en un amplio rango de longitudes de onda que se denomina *espectro*. Básicamente la *reflectancia espectral* es la relación entre la intensidad de la luz que se refleja en la hoja a la intensidad de luz incidente, medidos para cada longitud de onda.

Los cultivos se desarrollan desde la germinación, pasando por la etapa de crecimiento y llegando a la madurez, donde las hojas comienzan a secarse dejando de cumplir las funciones fisiológicas del vegetal. La reflectancia espectral lleva la información de importantes componentes de la hoja, como la clorofila y el agua, modificándose en el proceso de crecimiento de la planta, puesto que los componentes mencionados se van modificando debido a factores ambientales y el crecimiento mismo de la planta. Visualmente observamos la planta verde, muy saludable o no tan verde y decaída, como consecuencia de su desarrollo, afectando el contenido de clorofila y agua de las hojas, cuya información es posible obtener a partir de la reflectancia espectral. A su vez, como se explicó en el marco teórico, de la reflectancia espectral podemos obtener los índices de clorofila o de agua, que resultan ser los indicadores de las variaciones producidas en la reflectancia espectral. Los aparatos construidos para tales mediciones se denominan espectrorradiómetros que captan longitudes de onda entre 350 a 2500

nanómetros. En la región visible, entre 400 y 700 nanómetros se produce la fotosíntesis, que es la absorción de la luz por parte de los pigmentos de la clorofila, observándose una baja reflectancia. En el infrarrojo cercano y medio se produce la absorción de la radiación por el agua, produciendo también baja reflectancia. A partir de estas observaciones se pueden cuantificar parámetros como los índices de clorofila e índices de agua. Estos procesos se dan en el marco de una de las interacciones fundamentales que se dan en la naturaleza, la interacción electromagnética, que sin ella la vida no se habría desarrollado en nuestro planeta.

III. MÉTODO

En la investigación no se han utilizado abonos, pesticidas u otros agentes, de modo que los cultivos se desarrollaron en condiciones ambientales naturales y los cuidados de rutina que se dan en la agricultura tradicional andina. De este modo, en la etapa de crecimiento se tomaron semanalmente los datos de la reflectancia espectral de las hojas entre 350 y 2500 nanómetros de longitud de onda del espectro electromagnético, utilizando el espectrorradiómetro de campo Field Spec 4. De los datos espectrales de reflectancia de las hojas de cultivo se determinaron los índices de contenido de clorofila y agua, de acuerdo a la información encontrada en la literatura. En las Tablas 2 se muestra diferentes índices espectrales del contenido de clorofila y en la Tabla 3 los referentes al contenido de agua.

3.1.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación es aplicada, ya que trata de determinar en el proceso de desarrollo los cambios de la reflectancia y, a partir de ellas, los índices espectrales para determinar el contenido de clorofila y agua de las hojas (Sampieri-Hernández y Mendoza-Torres, 2018).

El nivel de investigación es descriptivo, puesto que los datos son tomados en un lugar fijo e intervalo de tiempo fijado, para describir el comportamiento de los cultivos (Sampieri-Hernández y Mendoza-Torres, 2018).

El diseño es **no experimental**, ya que no hay control sobre las variables, no siendo posible repetir las mediciones en las mismas condiciones realizadas. Es también **longitudinal**, porque se realiza un seguimiento a un mismo sujeto, es decir, los cultivos, a lo largo de un período concreto (Sampieri-Hernández y Mendoza-Torres, 2018).

3.2. Población y muestra

Los tres cultivos considerados fueron: maíz de dos variedades, el maíz blanco “INIA 620” de grano blanco y el maíz morado “INIA 615 Negro Canaán” de grano morado; papa de la variedad “Yungay” de tubérculos blancos y papa de la variedad “INIA 316 Roja Ayacuchana” de color rojo, quinua de la variedad “Blanca de Junín” de grano blanco y la variedad “INIA 415 Pasankalla” de grano rojo. Las mediciones de las reflectancias espectrales se hicieron en tres hojas, elegidas aleatoriamente, entre las 10 a.m. y 12:00 m, con 10 mediciones por cada hoja.

3.3. Operacionalización de variables

Variables	Dimensión	Indicadores
Proceso de desarrollo del cultivo	Crecimiento Madurez	Color verde de las hojas Color amarillento
Reflectancia espectral	Clorofila de las hojas Agua de las hojas	Índice de clorofila Contenido de clorofila Índice de agua Contenido de agua

3.4 Instrumentos

La adquisición de datos de la reflectancia espectral se hizo mediante un espectrorradiómetro modelo ASD Fiel Spec 4, diseñada para tomar datos desde los 350 a 2500 nanómetros en intervalos de un nanómetro. La calibración de la reflectancia de referencia se hizo utilizando un espectralón que consiste de un material blanco de reflectancia cercana al 100 %. Las ecuaciones utilizadas para determinar los índices y los contenidos de clorofila y agua se tomaron de las referencias citadas. El procesamiento de los datos y todas las figuras se hicieron utilizando el software científico Mathematica Versión 14, para lo cual hay que

implementar algunos programas que permitan automatizar los cálculos y las correspondientes gráficas.

3.5 Procedimientos

La siembra de los cultivos se realizaron en el mes de enero de 2020 en las instalaciones del Instituto de Innovación Agraria con sede en la ciudad de Ayacucho, aproximadamente a los 2700 msnm. Por cada cultivo se sembraron dos hileras de aproximadamente 15 metros y se desarrollaron en condiciones ambientales naturales con lluvias estacionales y complementadas con riego en ciertos días por falta de lluvias. Los datos se tomaron los días 17 de febrero, 24 de febrero, 2 de marzo y el 9 de marzo de 2020, periodo en el que aún no había ocurrido la floración de las papas ni el nacimiento de espigas en el maíz y quinua. Los datos de reflectancia fueron tomados en el mismo campo entre las 10 a.m. y 12 m., utilizando como fuente de luz solamente la radiación solar, es decir en condiciones naturales, almacenando los datos en el ordenador que controla las funciones del espectrorradiómetro.

En cada fecha de medición, se midieron tres hojas por cada cultivo y por cada hoja se programaron 10 mediciones. Debido a la aleatoriedad ambiental al momento de realizar las mediciones y el propio ruido de la electrónica del instrumento, se hace necesario suavizar los datos, para lo cual se utilizó el filtro Savitzky-Golay (Savitzky and Golay, 1964; Press et al., 2007) y después ser utilizados en los cálculos de los índices y promediarlas, mostrando los resultados en gráficas siguiendo cronológicamente las fechas donde se realizaron las mediciones. Los datos de las reflectancias espectrales medidas por el instrumento utilizado están en el intervalo de 350 a 2500 nm, en pasos de 1 nm. Los cálculos y gráficas se han procesado usando el software científico Mathematica Versión 14.

Hay puntos críticos importantes de la reflectancia en la definición de los diferentes índices del contenido de clorofila y agua de las hojas, como son los puntos de máxima reflectancia en el verde, de mínima reflectancia en el rojo, el llamado borde rojo importante

para la evaluación de índices de clorofila. La región de máxima reflectancia que es el infrarrojo cercano (NIR) es también importante ya que se toma puntos de esta región para definir los índices de contenido de clorofila. Después de los 900 nanómetros se tienen 4 regiones de absorción del agua, donde se toman puntos de las reflectancias cercanos a estos mínimos de acuerdo a las propuestas encontradas en la literatura científica. Se han evaluado algunos puntos críticos para ver su variabilidad y los efectos que tendrían en la determinación de los índices de contenido de clorofila y agua. También se ha comparado las reflectancias de las hojas estudiadas, especialmente en la región del espectro visible, ya que se esperaba encontrar diferencias o similitudes entre los seis tipos de cultivos evaluados.

En la revisión realizada se han encontrado numerosas propuestas de los índices de clorofila y de agua basados en la reflectancia espectral, de los cuales se han utilizado aquellos que siguieron un procedimiento de validación de la relación entre los índices espectrales y los contenidos de clorofila y agua descritos en los antecedentes.

3.6. Análisis de datos

3.6.1. Suavizamiento de datos.

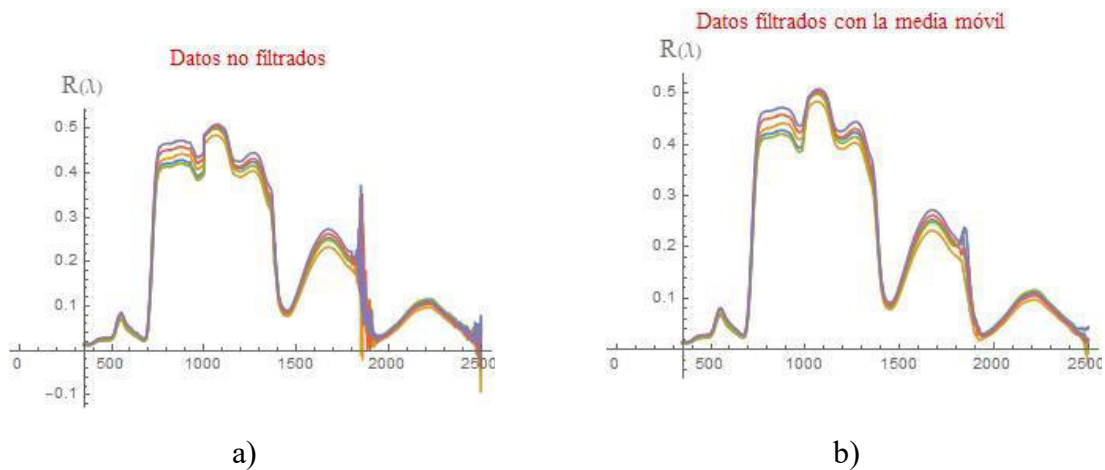
Los datos originales de la reflectancia obtenidos en el rango de 350 nm a 2500 nm, consta de 2151 datos a intervalos de 1 nm. La gráfica original del espectro de reflectancia se muestra en la Figura 10(a), cuya curva no es suave como se pensaría inicialmente. Esto es debido a la aleatoriedad intrínseca en las mediciones de este tipo, cuyas fuentes son diversas, entre ellas las fluctuaciones de la corriente eléctrica de aparato de medición, que es muy crítico cuando las señales deben ser medidas con la mejor resolución posible. En mediciones de campo como es en este trabajo, utilizan las reflexiones de la luz solar incidentes en las hojas calibrando en un panel blanco con la luz solar directa como fuente de iluminación, habiendo fluctuaciones

por la presencia de nubes y otros factores como el viento circundante en el momento de la medición.

En la Figura 10 se observa que en la región visible hay poca dispersión, mientras que en el infrarrojo cercano y medio hay más dispersión de datos, especialmente en la banda de absorción más intensa del agua, en torno de 1900 nm. Este comportamiento se debe a que en la región visible la energía de los fotones de luz visible son más intensas que la del infrarrojo, como consecuencia, la intensidad de corriente que genera la luz visible es más intensa respecto a la del infrarrojo. Para aclarar, los sensores que recogen la energía de la señal electromagnética son convertidas en energía eléctrica en forma de corriente eléctrica, de modo que en una corriente eléctrica más intensa, el ruido es menos visible que en una corriente débil. Antes de procesar los datos, es conveniente suavizarlos para minimizar los errores aleatorios, cuyo procedimiento es aplicar algún criterio de ajuste de los datos llamado filtros.

Figura 10

Reflectancia espectral de las hojas: (a) no filtrados y (b) filtrados



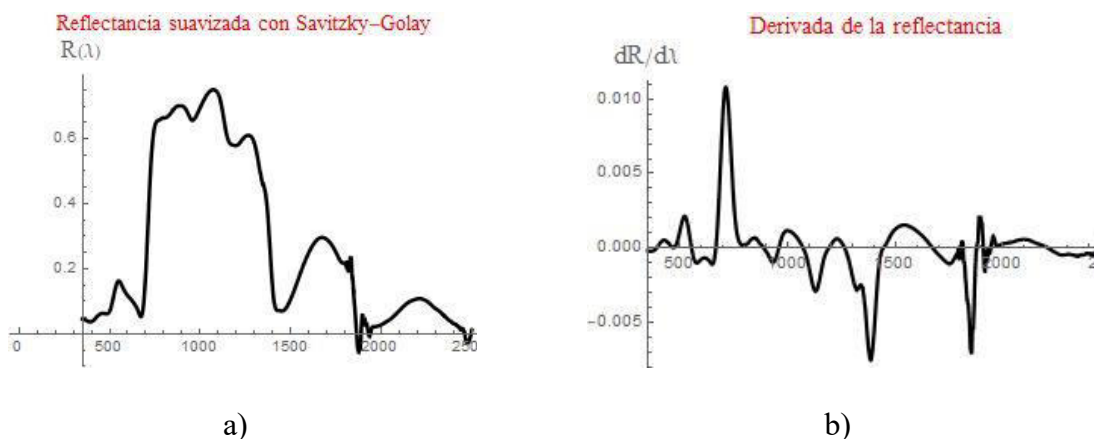
Existen muchos tipos de filtros (Press et al., 2007), cuyos usos dependen de la naturaleza de los datos y la aplicación que se quiera realizar. El filtro más sencillo es el de la media móvil que se aplica a datos que no muestran demasiados máximos y mínimos agudos. En cuanto a los datos de reflectancia de las hojas verdes, el uso del filtro de Savitzky-Golay

(Savitzky and Golay, 1964; Press et al., 2007) es prácticamente un estándar, tal como se ha constatado en la literatura revisada. Este filtro utiliza un ajuste polinomial por intervalos de datos, no habiendo restricciones en el número de datos usados por cada intervalo considerado, adecuándose muy bien a los máximos y mínimos del espectro de las hojas verdes. Para decidir cuántos datos considerar por intervalo tomado, se ha ensayado varios de ellos y de acuerdo a la observación cualitativa de las curvas obtenidas con los ajustes, se ha considerado 15 datos por intervalo. Como un comentario, puede ocurrir que tomando más datos por intervalo la curva se suavice mejor, no obstante, puede afectar la contribución de datos intermedios como una pérdida de información e incrementaría los errores del cálculo de los índices. Así, hay un compromiso entre usar más o menos datos en cada intervalo y la pérdida de información que puede ser afectado por una utilización de muchos datos en el intervalo considerado.

Otro aspecto analizado en los datos fueron la dispersión de puntos críticos utilizados en el cálculo de los índices espectrales, especialmente clorofila. Uno de los puntos más críticos es el llamado borde rojo (RE, Red Edge), que es el punto de inflexión entre el mínimo del rojo y el máximo del infrarrojo cercano (NIR, Near InfraRed). En el análisis matemático se sabe que existe un punto de inflexión cuando la curva cambia de concavidad, lo cual ocurre entre un mínimo y máximo o al revés. En la Figura 11 a) se observa cómo la curva de reflectancia de la hoja va del mínimo rojo al máximo del NIR, al derivar los puntos de inflexión se convierten en máximos o mínimos.

Figura 11

Espectro de reflectancia de la hoja. (a) Filtrada; (b) no filtrada.



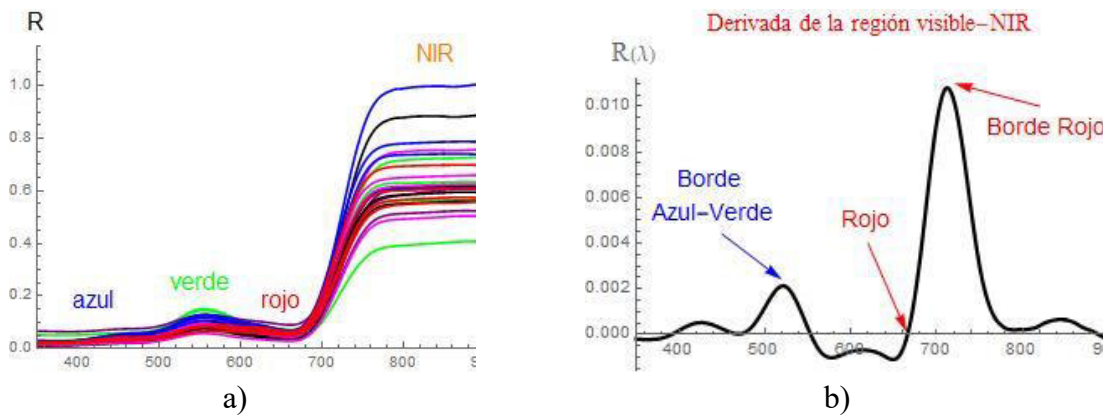
3.6.2. Datos del contenido de clorofila

En la Figura 12(a) se muestran las reflectancias obtenidas de los seis cultivos en las cuatro fechas de toma de datos, observando el comportamiento típico en las diferentes regiones del espectro y el infrarrojo cercano (NIR). Observar que el mínimo de la reflectancia del rojo está aproximadamente en torno de 670 nm, a partir del cual sube abruptamente a la meseta del NIR, encontrándose el borde rojo en el ascenso de la curva. La meseta del NIR se da aproximadamente desde 780 nm hasta 900 nm, habiendo considerado en nuestros cálculos la reflectancia del NIR en 800 nm, valor que también consideran como R_{NIR} en varias publicaciones (Gitelson et al., 2006; Gitelson et al., 2009). En la Figura 12 (b) se muestra la derivada de uno solo de los cultivos de las reflectancias con la finalidad de señalar los puntos críticos relacionados a los puntos de inflexión de las curvas de reflectancia, denominados borde rojo y borde azul-verde. El pico máximo en la región cercana a 720 nm es el borde rojo y puede detectarse dicho máximo con algoritmos del software utilizado. El corte de la curva de la derivada en el rojo de la Fig. 12 (b), es el mínimo de la reflectancia que corresponde a la absorción de la luz por la clorofila. También en la misma gráfica se muestra un máximo que corresponde al punto de inflexión entre el azul y verde. En el azul hay otra región de absorción

por la clorofila y carotenoides de modo que hacia el rojo hay poca absorción de la luz, por lo que la reflectancia aumenta y es justamente la coloración verde que observamos en las hojas. De acuerdo a la literatura investigada, las longitudes de onda mencionadas son puntos críticos utilizados para la determinación no solo de los índices espectrales de clorofila, sino también de otros pigmentos como carotenoides y antocianinas.

Figura 12

Derivada de la región visible e infrarrojo cercano. (a) Las reflectancias espectrales de los seis cultivos. (b) La derivada de la reflectancia espectral de un solo cultivo



En la Tabla 1 se tienen las longitudes de onda detectadas en las hojas de los cultivos estudiados en esta investigación, que corresponden a la ubicación de la longitud de onda del borde rojo. Para tal efecto, se han derivado numéricamente los promedios de cada fecha y mediante el software Mathematica se ubican las longitudes de onda que corresponden al máximo. En la Tabla 1 la fila denotada con P significa el promedio, mostrando el promedio para cada cultivo.

Tabla 1*Reflectancias de borde rojo y correspondientes longitudes de onda*

Maíz Blanco (MB)		Maíz Morado (MM)		Papa Blanca (PB)		Papa Roja (PR)		Quinoa Blanca (QB)		Quinoa Roja (QR)	
λ (nm)	$R(\lambda)$	λ (nm)	$R(\lambda)$	λ (nm)	$R(\lambda)$	λ (nm)	$R(\lambda)$	λ (nm)	$R(\lambda)$	λ (nm)	$R(\lambda)$
23	.3800	26	.3219	23	.4340	23	.4340	23	.4837	20	.3822
21	.1985	22	.2612	18	.2917	22	.3377	17	.3911	17	.2802
17	.3248	19	.3116	18	.3053	15	.2694	18	.3199	16	.2813
17	.2993	19	.3119	20	.2815	16	.2374	19	.3775	19	.2704
19.5		21.5		19.2		19.2		19.2		18	

El promedio de la longitud de onda del borde rojo de los seis cultivos resultó 719.5 nm, el cual fue redondeado a 720 nm para efectos de calcular índices de clorofila con longitudes de onda de valor entero conforme a lo proporcionado por el instrumento. Dependiendo de las publicaciones, las longitudes de onda del borde rojo son tomadas entre 700 y 720 nm. En nuestro caso era necesario determinar la longitud de onda del borde rojo para conocer el correspondiente valor de la reflectancia y ser utilizado en los cálculos de índices.

Para el mismo conjunto de datos, también se han determinado las longitudes de onda del mínimo de la reflectancia del rojo, mostrado en la Tabla 2, cuya derivada de la reflectancia en dicho punto es cero, que se aprecia en la Figura 12 (b). En este caso se obtiene una media de 674.375 nm cuyo valor redondeado es 674 nanómetros.

Tabla 2*Mínimo de la reflectancia del rojo y su correspondiente longitud de onda*

Maíz Blanco (MB)		Maíz Morado (MM)		Papa Blanca (PB)		Papa Roja (PR)		Quinua Blanca (QB)		Quinua Roja (QR)	
λ (nm)	$R(\lambda)$	λ (nm)	$R(\lambda)$	λ (nm)	$R(\lambda)$	λ (nm)	$R(\lambda)$	λ (nm)	$R(\lambda)$	λ (nm)	$R(\lambda)$
75	.0603	75	.0260	76	.0374	75	.0355	75	.0452	74	.0435
74	.0270	74	.0232	75	.0293	75	.0212	74	.0490	74	.0470
74	.0411	74	.0331	74	.0330	74	.0424	74	.0500	74	.0400
74	.0543	74	.0783	75	.0222	74	.0398	74	.0537	74	.0395

Cuando el contenido de clorofila de las hojas es mayor, la longitud de onda del borde tiende a crecer, lo cual se debe a que el ancho de línea de la absorción de la clorofila crece, desplazando el borde rojo hacia longitudes de onda ligeramente mayores (Gitelson et al, 2001). La consistencia de estos resultados es concordante con las publicaciones, esperando que el contenido de clorofila de la quinua roja tienda a ser menor que los otros cultivos.

En la Tabla 3 se tienen las longitudes de onda del máximo de la reflectancia del verde, siendo prácticamente invariable, como también el promedio de las reflectancias correspondientes de cada variedad de cultivo, observando que dicho promedio es menor en las hojas de quinua roja. También este resultado es consistente con el mayor contenido de antocianinas que debe contener las hojas de quinua por las manchas rojas observadas en las hojas de este cultivo, debido a que el pico de absorción de las antocianinas se encuentra precisamente en la región de mayor reflectancia en el verde, contribuyendo a la disminución de la reflectancia (Gitelson et al., 2001).

Tabla 3

Máximo de la reflectancia del verde y la correspondiente longitud de onda

Maíz Blanco (MB)		Maíz Morado (MM)		Papa Blanca (PB)		Papa Roja (PR)		Quinoa Blanca (QB)		Quinoa Roja (QR)	
λ (nm)	$R(\lambda)$	λ (nm)	$R(\lambda)$	λ (nm)	$R(\lambda)$	λ (nm)	$R(\lambda)$	λ (nm)	$R(\lambda)$	λ (nm)	$R(\lambda)$
20	.0826	20	.0544	20	.0719	20	.0661	20	.0874	20	.0596
20	.0442	20	.0530	20	.0537	20	.0391	20	.0892	20	.0613
20	.0991	20	.0781	20	.0628	20	.0778	20	.0776	20	.0606
20	.1008	20	.1001	20	.0479	20	.0603	20	.0863	20	.0485
R	.0817		.0714		.0591		.0608		.0851		.0575

3.6.3. Análisis de datos del contenido de agua

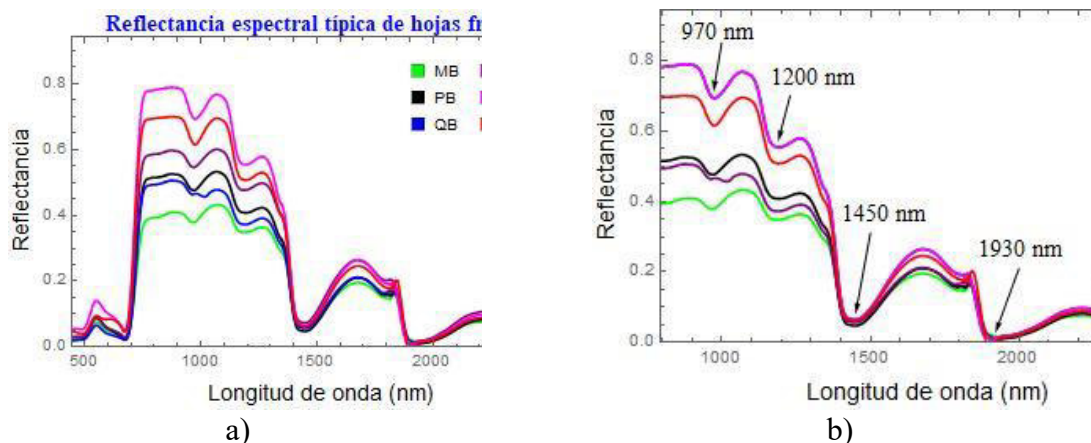
En la Fig. 13 se muestra los promedios de las reflectancias obtenidas de los seis cultivos de las cuatro fechas mencionadas, observándose el comportamiento típico en las diferentes regiones del espectro y el infrarrojo cercano (NIR). El mínimo de la reflectancia del rojo está aproximadamente en torno de 670 nm, a partir del cual sube abruptamente a la meseta del NIR, encontrándose el borde rojo en el ascenso de la curva. La meseta del NIR se da aproximadamente desde 780 nm hasta 900 nm, habiendo considerado en nuestros cálculos la reflectancia del NIR en 800 nm, valor que también consideran como R_{NIR} en varias publicaciones (Gitelson et al., 2006; Gitelson et al., 2009).

Para entender el significado de los índices espectrales del contenido de agua, en la Figura 12 b) se muestran las medias filtradas de las reflectancias típicas de hojas verdes frescas, que corresponde a las reflectancias de los seis cultivos estudiados y obtenidas el 24 de febrero de 2022, donde se observa el ascenso abrupto de las reflectancias del rojo hacia el infrarrojo cercano (NIR) y se extiende por el infrarrojo medio hasta los 2500 nm. Queda claro de la figura y para los resultados mostrados en las gráficas que vienen, las abreviaturas representan a los

cultivos estudiados: Maíz Blanco (MB), Maíz Morado (MM), Papa Blanca (PB), Papa Roja (PR), Quinua Blanca (QB) y Quinua Roja (QR).

Figura 13

(a) Reflectancias espectrales de los cultivos. (b) Región NIR y SWIR mostrando las bandas de absorción del agua de las hojas frescas



En la Figura 12 (b) se muestra la región que corresponde a la absorción del agua, donde los mínimos vienen a ser la disminución de la reflectancia debido a la absorción del agua señalados por flechas y sus correspondientes longitudes en nanómetros (nm): 970 nm, 1200 nm, 1450 nm, 1930 nm y 2500 nm, donde los diferentes autores consideran estas bandas espectrales para definir los índices espectrales del contenido de agua de las hojas frescas. En la Tabla 5 se tienen diferentes longitudes de onda utilizados por los autores en la definición de los índices de contenido de agua. Similar al caso de los índices de clorofila, en algunos índices de agua se utilizan reflectancias del NIR como referencia, donde entre 820 a 900 nm la absorción del agua es prácticamente nula, para compararlas con longitudes de onda de absorción del agua o cercanas a ella, como por ejemplo el índice R_{900}/R_{970} . Como una ayuda para visualizar las longitudes de onda utilizadas, en la Tabla 4 se tienen las longitudes de onda en orden creciente utilizadas para definir diferentes índices y las que están en negrita corresponden a las de

absorción del agua, aunque la Tabla 8 no representa una lista completa de todos los índices definidos en la literatura.

Tabla 4

Longitudes de onda (nm) en orden creciente utilizados en la definición de índices espectrales relacionados al contenido de agua de las hojas vegetales

800	820	850	900	970	1070	1100	1152	1187	1200
	1240	1275	1350	1397	1240	1350	1397	1430	1450
1485	1490	1500	1600	1614	1689	1750	1788	1828	1930
	2130	2218	2370	2500					

3.7. Consideraciones éticas

Las mediciones se realizaron en condiciones ambientales naturales, donde los instrumentos utilizados son electrónicos, utilizando baterías recargables como fuente de energía de los aparatos de medición. Los cultivos se realizaron también en condiciones naturales, sin abono ni otros productos contaminantes que los afecten. Se ha tenido la colaboración de un investigador de Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) de Ayacucho y dos colegas del Area de Física de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (UNSCH). El espectrorradiómetro utilizado es del Laboratorio de Física Ambiental (LABFA) de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (UNSCH).

IV. RESULTADOS

De la gran variedad de índices espectrales propuestos en la literatura científica, se han tomado básicamente aquéllos que se han validado con los contenidos de clorofila o de agua de las hojas, cuyos procedimientos de validación están explicados en las respectivas publicaciones citadas. Puesto que en los resultados se han calculado los índices espectrales de reflectancia a partir del espectro de reflectancia de las hojas varios de los cuales se han relacionado a los contenidos de clorofila y otros al contenido de agua de las hojas verdes, mostraremos los resultados en subsecciones de índices y contenidos, según el caso, primero para los índices de reflectancia de clorofila y a continuación los contenidos de clorofila, luego se muestran resultados de los índices de reflectancia y contenidos de agua de las hojas.

4.1. Resultados de los índices espectrales del contenido de clorofila

Puesto que para cada cultivo se han calculado los promedios del conjunto de mediciones de la muestra, se determinaron la media de cada índice y las respectivas desviaciones cuadráticas medias. Las barras de errores graficados para cada fecha y tipo de cultivo pueden parecer demasiados grandes en algunos casos. Esto es debido a que las mediciones se han realizado en campo donde las condiciones ambientales al momento de las mediciones fueron bastante aleatorias, influyendo significativamente en los resultados.

Uno de los índices más citados y evaluados es el propuesto por Datt (1999, 1999b) debido a su mejor comportamiento en diversos vegetales y aplicabilidad más general, a pesar de que fue inicialmente usado y validado en hojas de eucalipto. Se denota a este índice como Datt y está dado como

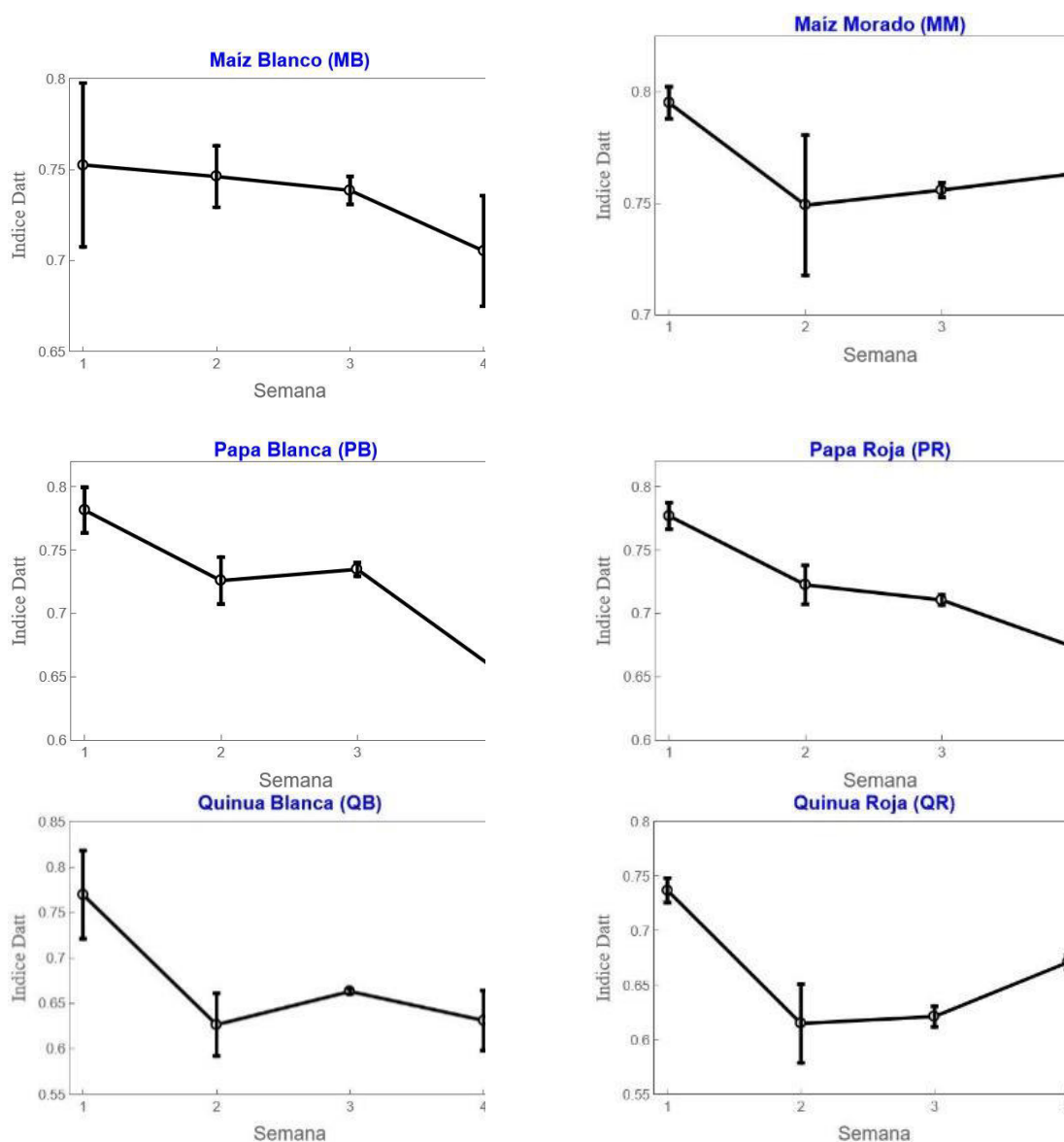
$$\text{Datt} = \frac{R_{850} - R_{710}}{R_{850} - R_{680}}. \quad (1)$$

En la Figura 14 se muestran los índices Datt del contenido de clorofila de los seis cultivos, donde se observa en todos los cultivos la disminución del índice de la primera a la

segunda semana. Hay una similitud del comportamiento del MB y PR en el decaimiento del índice desde la primera hasta la cuarta semana, lo cual no se observa en los otros cultivos. El comportamiento de la PB ya QB también son similares, observando que hay un incremento de la segunda a la tercera semana y decaimiento hacia la cuarta semana. Se observa otro tipo de

Figura 14

Índices de reflectancia de clorofila (Datt, 1999)



comportamiento en el MM y QR, donde se ve la recuperación del índice de la segunda hasta la cuarta semana.

En la Figura 15 se observan las gráficas de algunos índices de clorofila utilizados en las relaciones que dan el contenido de clorofila con la finalidad de compararlos entre sí. En las gráficas se está utilizando la denominación Datt para el índice $(R_{850} - R_{710}) / (R_{850} - R_{680})$ dado por la Ec. (1). El otro índice importante es el de la razón simple del borde rojo dado como

$$RS = \frac{R_{800}}{R_{720}}, \quad (2)$$

que en la leyenda de la gráfica se denota como RS – BR, que significa razón simple del borde rojo. Otro índice propuesto en la literatura es el del borde rojo usado por Gitelson y Solovchenko (2017), el cual denotamos como

$$BR - GS = \frac{R_{800}}{R_{720}} - 1, \quad (3)$$

Un cuarto índice utilizado es el MDRI (Modified Difference Ration Index) planteado por Sun et al. (2021), dado como

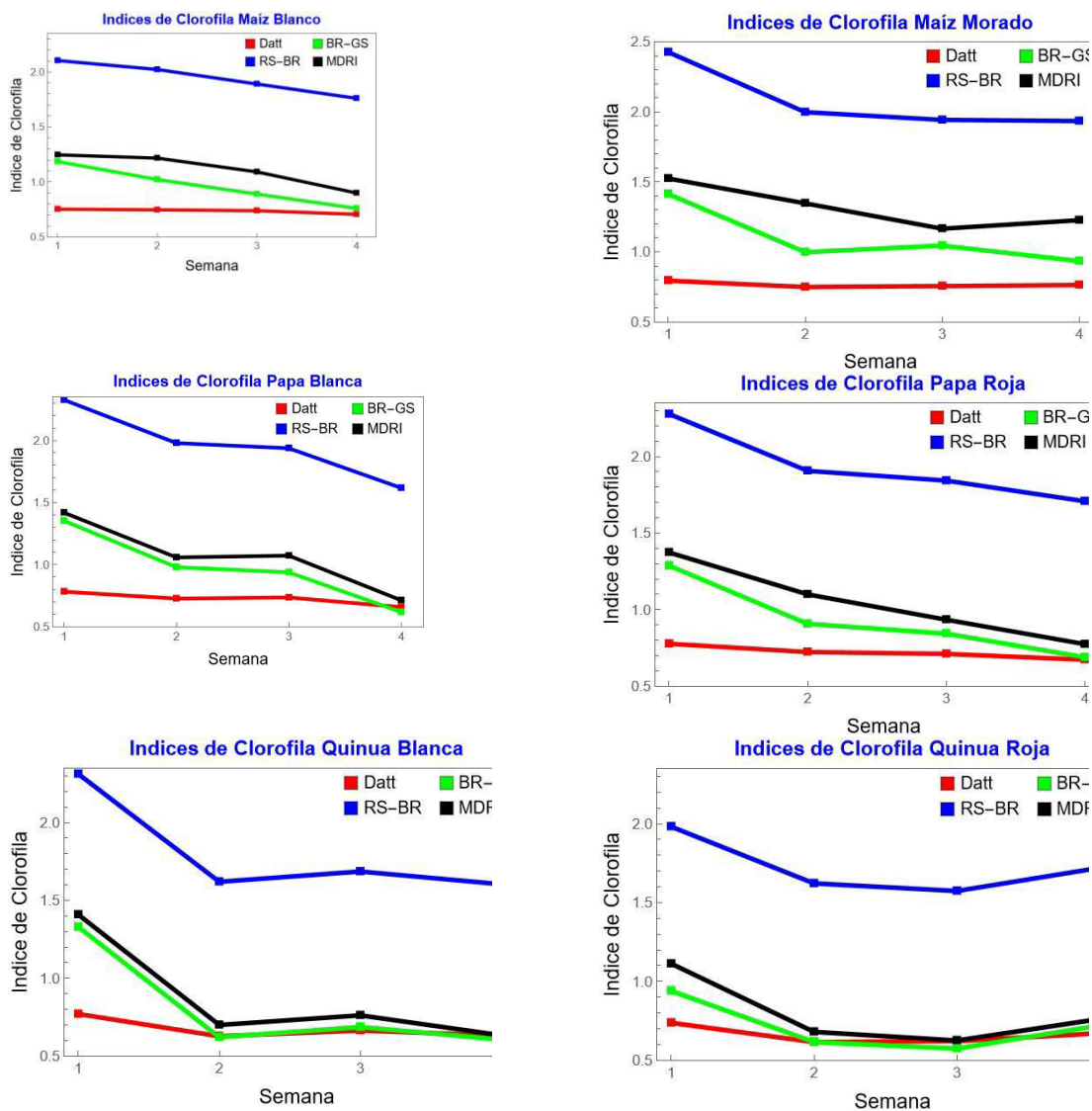
$$MDRI = \frac{R_{720} - R_{761}}{R_{720} - R_{672}}. \quad (4)$$

Este índice es una modificación del índice propuesto por Datt (1999). Hay que notar que la diferencia $R_{720} - R_{761}$ es normalmente negativa en hojas verdes, porque la reflectancia R_{720} es menor que R_{761} , que se encuentra en la región del infrarrojo cercano y R_{720} se aproxima al fondo o cercano a la absorción del rojo. Por ello, en la Figura 15 se ha graficado en valor absoluto con la finalidad de comparar con los otros índices que son positivos. Debido a que los índices Datt son normalmente menores que 1, sus variaciones no se observan muy pronunciadas comparadas con las de los otros índices que son mayores que 1, lo cual se puede verificar observando los índices Datt de la Figura 14. La importancia de evaluar el uso de solamente los índices de reflectancia del contenido de clorofila, se debe a que sus variaciones siguen una tendencia que dependen del proceso de desarrollo del cultivo, lo cual se interpreta

como una respuesta de las plantas a las condiciones de su entorno dando información de su estado en el momento de la medición.

Figura 15

Comparación de varios índices espectrales del contenido de clorofila



Lo interesante e importante de los resultados obtenidos es la disminución de todos los índices de la primera a la segunda semana, siendo dependientes del cultivo las variaciones que dan en las siguientes semanas. Los índices en el caso del MB, PB y PR disminuyen desde la primera hasta la cuarta semana, mientras que para el MM y QB la tendencia es la recuperación de la segunda a la cuarta semana.

En la QR, donde en todos los casos se observa la tendencia a la recuperación del índice clorofila a partir de la segunda semana, es un comportamiento singular que sugiere investigar las características fisiológicas de la QR por su respuesta diferenciada respecto a los otros vegetales, ya que estuvieron sometidos a las mismas condiciones.

4.2. Resultados de los contenidos de clorofila

Generalmente el contenido de clorofila es dado como la masa de clorofila contenida en un área de la hoja, de modo que dimensionalmente se expresa como masa por unidad de área, es decir, en el sistema internacional sus unidades están en kg/m^2 . Debido a que la masa de las moléculas de clorofila contenidas en las hojas son muy pequeñas, las publicaciones científicas acostumbran expresar la masa en miligramos (mg) o más frecuentemente en microgramos (μg), mientras que el área se expresa más comúnmente en centímetros cuadrados (cm^2) de hoja, la cantidad de clorofila por hoja se expresa en $\mu\text{g/cm}^2$, que se acostumbra escribir como $\mu\text{g cm}^{-2}$.

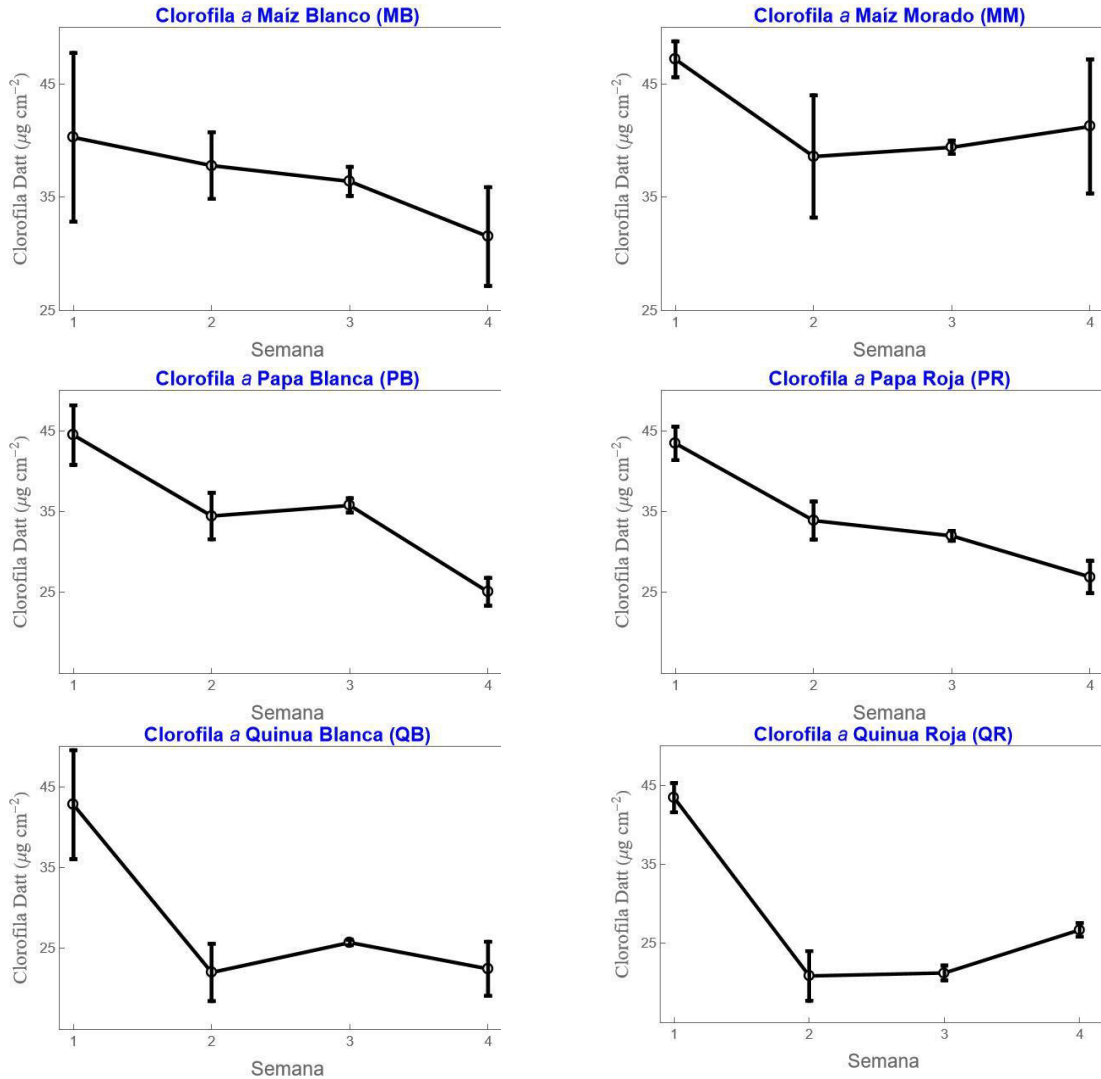
Como ya se había expuesto en el marco teórico, la clorofila de las hojas verdes terrestres están compuestas por clorofila *a* y *b*, validándose mayormente los contenidos totales de clorofila, es decir, $a + b$. Sin embargo, se ha encontrado publicaciones que validan por separado la clorofila *a* y *b*, por ello se iniciará la presentación de los resultados con los contenidos de clorofila *a* y clorofila *b* por separado. En la Figura 16 se tienen los contenidos de clorofila *a* en función del índice Datt según la relación validada (Datt, 1999b) siguiente:

$$\text{Chl } a \text{ (}\mu\text{g cm}^{-2}\text{)} = 1.22 e^{4.596 \frac{R_{850}-R_{710}}{R_{850}-R_{680}}} \pm 1.22. \quad (5)$$

Figura 16

Contenido de clorofila *a* de acuerdo a Datt (1999), usando los índices dados en la Fig. XX-1.

Las unidades están en $\mu\text{g cm}^2$



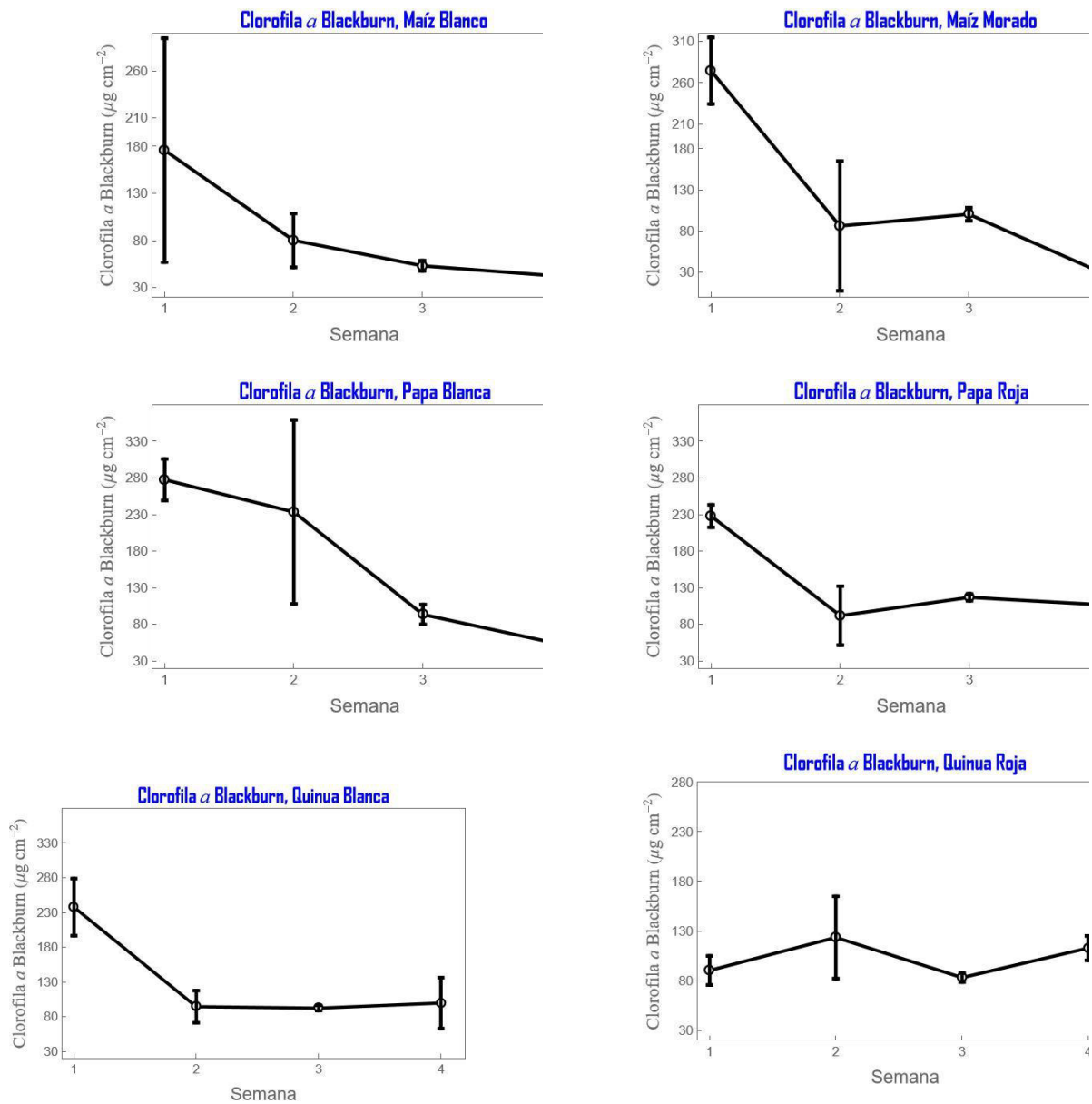
Observando la Ecuación (5), el contenido de clorofila *a* está en términos del índice Datt dado en la Ec. (1). Lo interesante de la Figura 16 es observar que reproduce cualitativamente los cambios de los índices Datt de la Figura 14, donde la clorofila disminuye de la primera a la segunda semana y la tendencia a la recuperación de clorofila en el MM, QB y más acentuadamente en la QR.

En la Figura 17 se muestra el contenido de clorofila *a*, según la relación de Blackburn (1998), dada como

$$\text{Chl}a \text{ (mg m}^{-2}\text{)} = 10.928 \left(\frac{R_{800}}{R_{680}} \right)^{1.7691} \quad (6)$$

Figura 17

Contenido de clorofila a de acuerdo a Blackburn



Las unidades utilizadas por Blackburn para el contenido de clorofila está en mg m^{-2} (Blackburn, 1998), habiendo transformado a $\mu\text{g cm}^{-2}$ en los cálculos aplicados a los cultivos andinos.

El índice de reflectancia utilizado por Blackburn es la razón R_{800}/R_{680} para el caso de la clorofila a , cuyas gráficas no se muestran, debido a que el contenido de clorofila sigue el comportamiento cualitativo de los índices usados. Los resultados observados en la Figura 17 muestran comportamientos similares en el MB y PB, mientras que para el MM se observa una tendencia a la recuperación de la clorofila a , finalmente decae a la cuarta semana, lo que no es observado en el caso de Datt mostrado en la Fig. 16. Asimismo, se observa que en la PR se llega a una situación estable de no disminución de la clorofila a , contrario al caso de Datt de la Figura 16. Para la QB hay una disminución de la primera a la segunda semana, coincidiendo prácticamente con el comportamiento de Datt mostrado en la Figura 16. En la QR hay diferencias en los contenidos de clorofila relacionados a los índices Datt y Blackburn para la clorofila a , donde en la Figura 17 se observa que hay disminución e incremento ligero de la clorofila. En los datos dados en el Anexo B, se verifica que los valores del contenido de clorofila a en las cuatro semanas según Blackburn varía como 884.211, 1246.36, 830.581 y 1128.02 verificándose que hay un incremento neto de la primera a la cuarta semana.

Blackburn (1998), también propuso una relación para el contenido de clorofila b , dada como

$$\text{Chl}b \text{ (mg m}^{-2}\text{)} = 9.1047 \left(\frac{R_{800}}{R_{635}} \right)^{1.6099}, \quad (7)$$

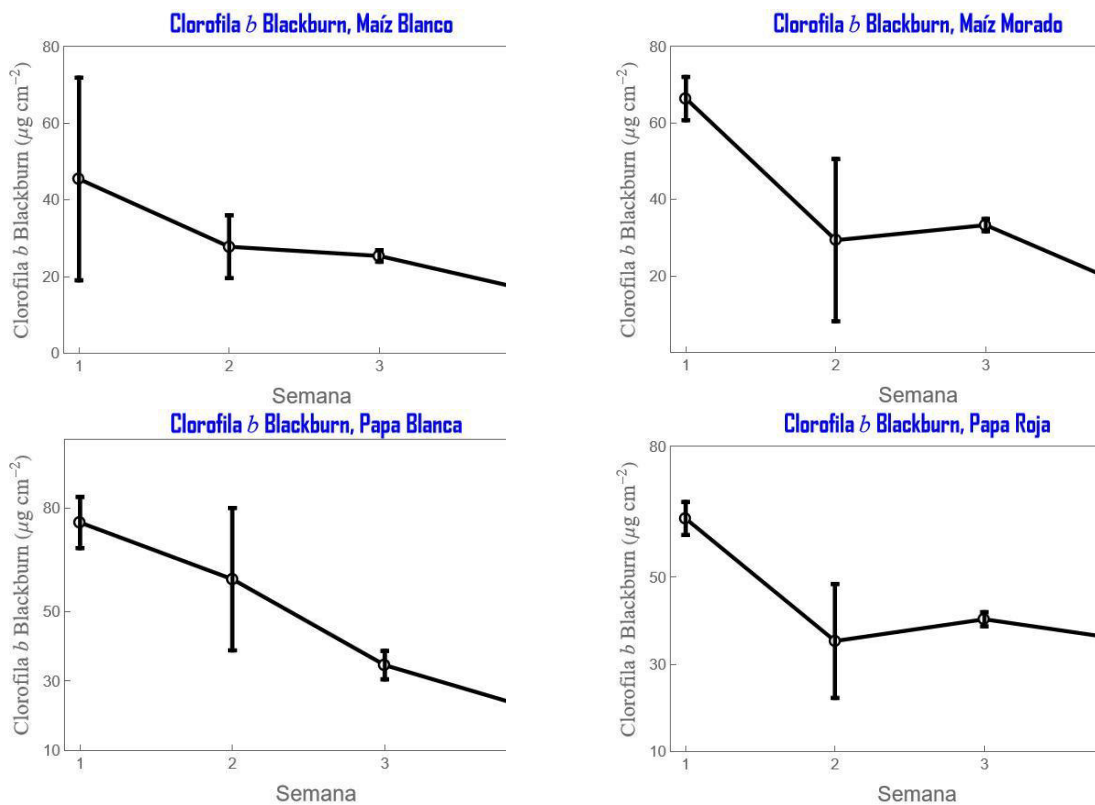
que se aplicó en este trabajo, mostrando los resultados en las gráficas de la Figura 18, cuyo comportamiento es similar al contenido de la clorofila a de la Figura 17, excepto en el caso de la QR, donde hay una disminución no muy pronunciada de la primera hasta la tercera semana y luego un incremento ligero para la cuarta semana. Según los datos del Anexo B se tienen los

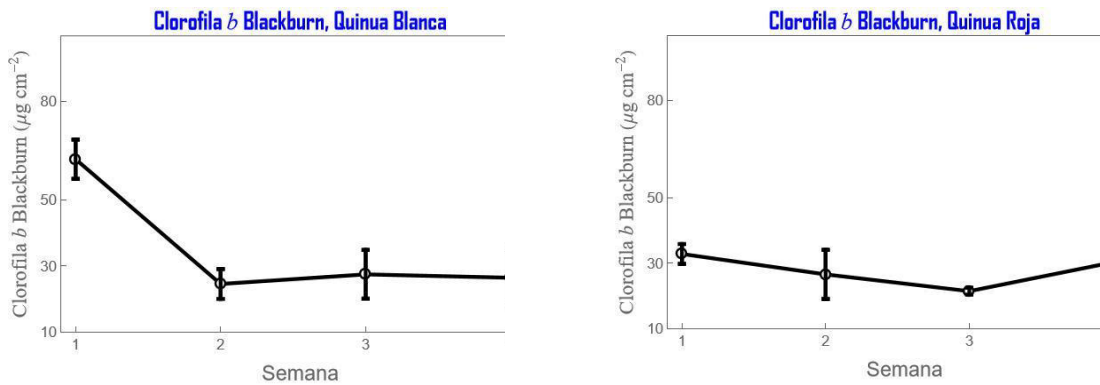
valores numéricos cronológicos de las cuatro semanas: 328.596, 265.814, 214.316, y 302.987, verificándose una disminución neta entre la primera y cuarta semana.

Para la determinación del contenido de clorofila *b* se ha utilizado el índice de la razón R_{800}/R_{635} , que no se muestra en las gráficas. Recordar que la clorofila *b* es una componente del contenido de la clorofila de las hojas verdes terrestres que acompaña a la clorofila *a*, las cuales espectroscópicamente se puede distinguir entre ellas, como se explicó en el marco teórico.

Figura 18

Contenido de clorofila b según Blackburn (1998)





Muchos artículos reportan el contenido de clorofila sin mencionar su tipo, entendiendo que en este caso se trata del contenido total de clorofila. Datt (1999b) reporta el contenido de clorofila $a + b$ según la relación dada como

$$\text{Chl } (a + b) (\mu\text{g cm}^{-2}) = 1.88 e^{4.510 \frac{R_{850} - R_{710}}{R_{850} - R_{680}}} \pm 1.74. \quad (8)$$

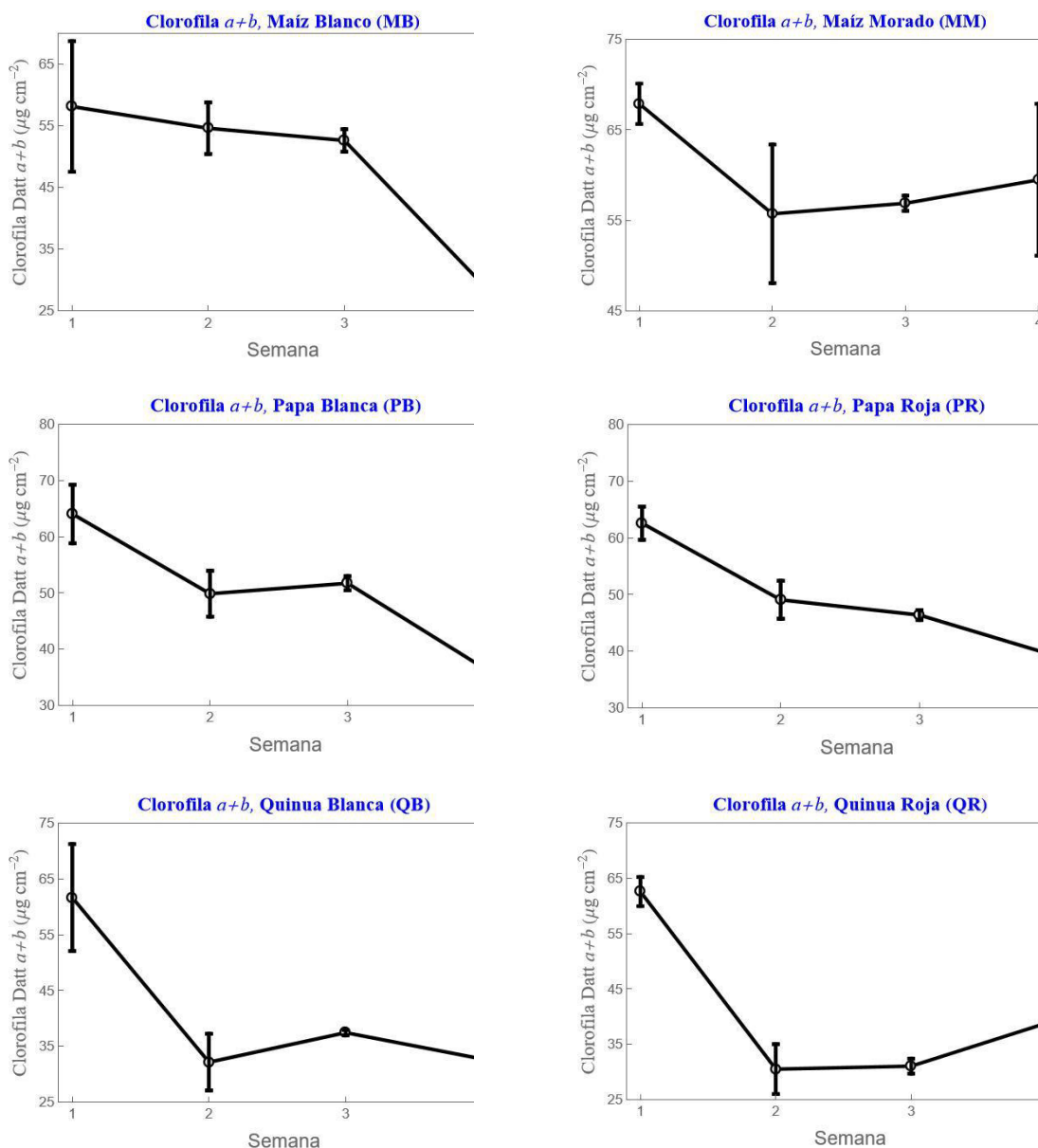
donde puede verificarse que está en términos del índice Datt dado por la Ec. (1). En la Figura 19 se tiene el contenido de clorofila total, conforme a la Ecuación (8), es decir, incluidos los dos tipos de clorofila a y b . Como se observa, hay un decaimiento del contenido de clorofila en todas las hojas de la primera a la segunda semana, continuando en el MB y PR hasta la cuarta semana. En la PB y QB hay una ligera recuperación de la segunda a la tercera semana, decayendo finalmente a la cuarta semana, mientras que en el caso del MM y QR continúa la tendencia al incremento de clorofila en la tercera y cuarta semana.

Observando la Figura 15, cada tipo de cultivo tiene el mismo comportamiento cualitativo para los índices de reflectancias espectrales graficados, en este caso el índice Datt, Gitelson-Solovchenko del borde rojo, el MDRI y el índice Datt modificado según Sun et al. (2021). En principio cualquiera de dichos índices podrían ser utilizados para seguir el comportamiento del contenido de clorofila en el tiempo y relacionarlos con parámetros medibles que condicionan el crecimiento del cultivo, como contenido de nitrógeno, agua, enfermedades de las hojas o parásitos, entre otros; sin embargo, es mejor encontrar una relación

cuantitativa entre el contenido de clorofila y el respectivo índice espectral para cada cultivo, que sería más útil y más preciso para ser relacionados con parámetros externos que afecten la salud de las plantas.

Figura 19

Contenido de clorofila total según Datt (1999b)



Seguidamente se tiene el contenido de clorofila dado por Gitelson y Solovchenko (2017), según la relación

$$\text{Chl } (\mu\text{g cm}^{-2}) = 43.578 \text{ CI}_{\text{RE}} + 0.81, \quad (9)$$

donde CI_{RE} es el índice del borde rojo dado como

$$\text{CI}_{\text{RE}} = \frac{R_{800}}{R_{720}} - 1, \quad (10)$$

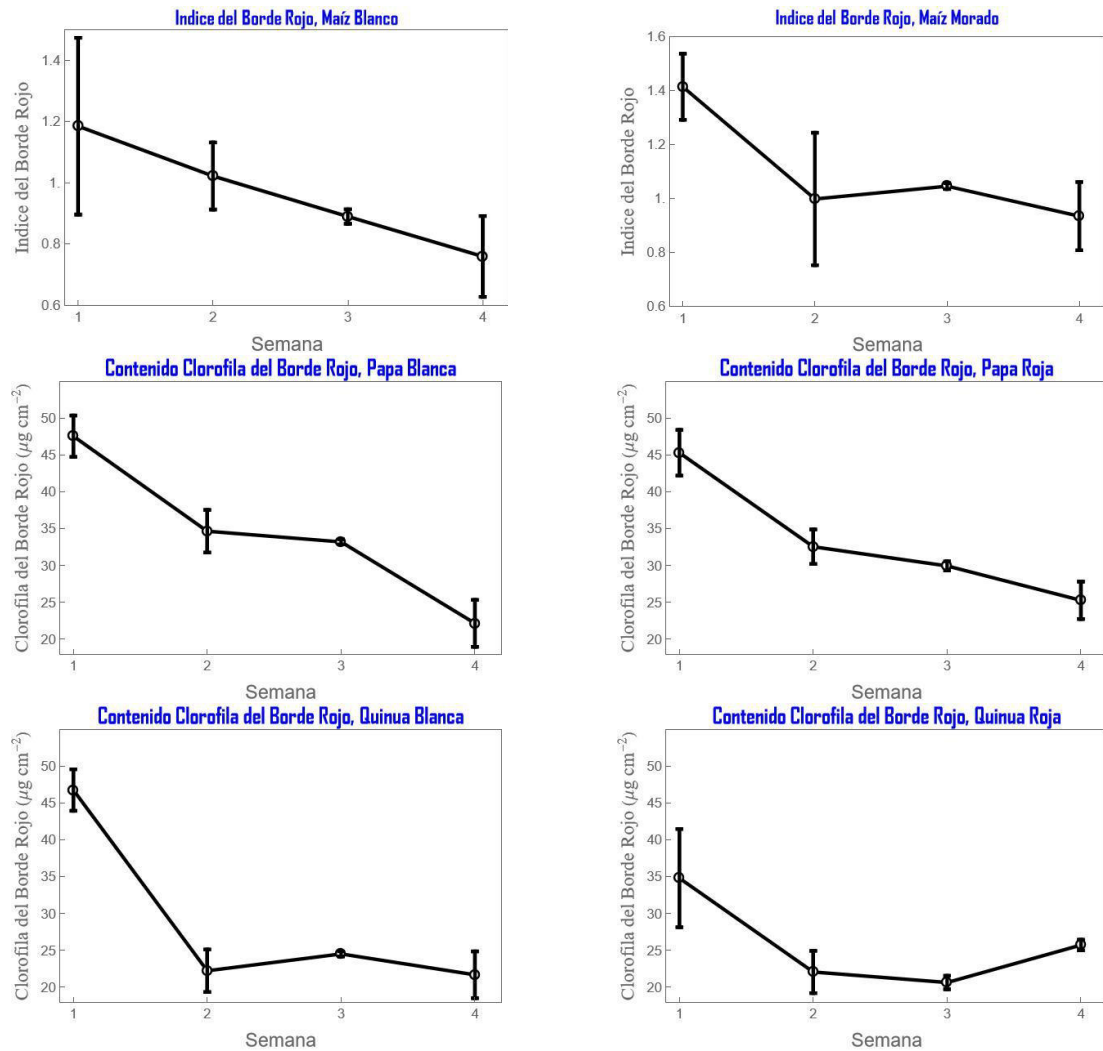
que es la misma relación dada por la Ecuación (3).

Los resultados del contenido de clorofila del borde rojo propuesto por Gitelson y Solovchenko (2017), se muestran en la Figura 20, cuyo comportamiento es cualitativamente similar al contenido de clorofila Datt mostrados en la Figura 19, excepto para el caso del MM, donde hay un ligero incremento de clorofila entre la segunda y tercera semana, decayendo a la tercera semana, a diferencia del contenido de clorofila del MM de la Figura 19, que muestra un incremento de la segunda a la cuarta semana.

Observando los comportamientos de las clorofila *a* y *b* según las relaciones propuestas por Blackburn (1998) y mostradas para los seis cultivos en las Figuras 17 y 18, hay una coincidencia del comportamiento con los resultados del uso de las relaciones de Gitelson y Solovchenko en los cultivos de MB, MM y PB pero con diferencias para la PR, ya que en las Figuras 17 y 18 se observan tendencias a la recuperación, mientras que en la Figura 20 se observa disminución para el mismo cultivo. Para la QB y QR se puede observar la existencia de similitudes, si bien la recuperación mostrada por la QR parece ser más acentuada para el contenido de clorofila calculados con el índice del borde rojo de la Ecuación (9) que por las Ecuaciones (6) y (7) de Blackburn.

Figura 20

Contenido de clorofila utilizando el índice de clorofila del borde rojo (Gitelson y Solovchenko, 2017)



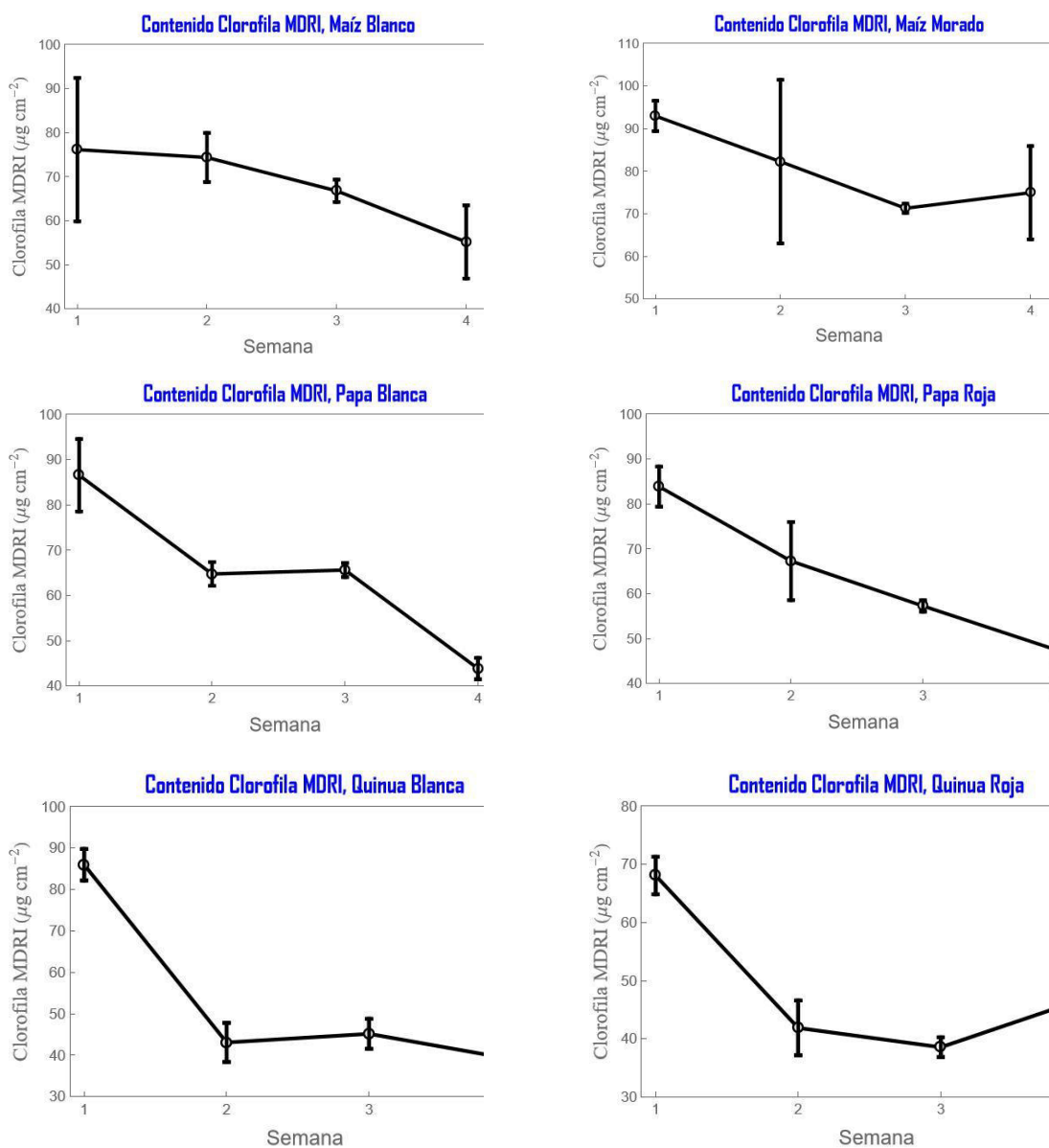
Otra reciente propuesta de un índice y su respectiva relación del contenido de clorofila denotado como LCC, está en términos del índice de la razón de diferencia modificada (MDRI), que fue validado para un gran número de especies (Sun et al., 2021), siendo dado como

$$LCC_{MDRI} = -60.468 MDRI + 0.785, \quad (11)$$

cuyos resultados aplicados a los seis cultivos se muestra en la Figura 21.

Figura 21

Contenido de clorofila utilizando el índice Datt modificado (MDRI) (Sun et al., 2021)



El índice MDRI (Sun et al., 2021) es una modificación del índice Datt, denominado índice de reflectancia Datt modificado, habiéndose propuesto para condiciones de medición que toman en cuenta la direccionalidad de la luz incidente y reflejada en las hojas, algo muy

crítico cuando se toman mediciones de campo como es nuestro caso. Observando la Figura 19 y Figura 21, se comprueba que efectivamente hay bastante semejanza en los resultados.

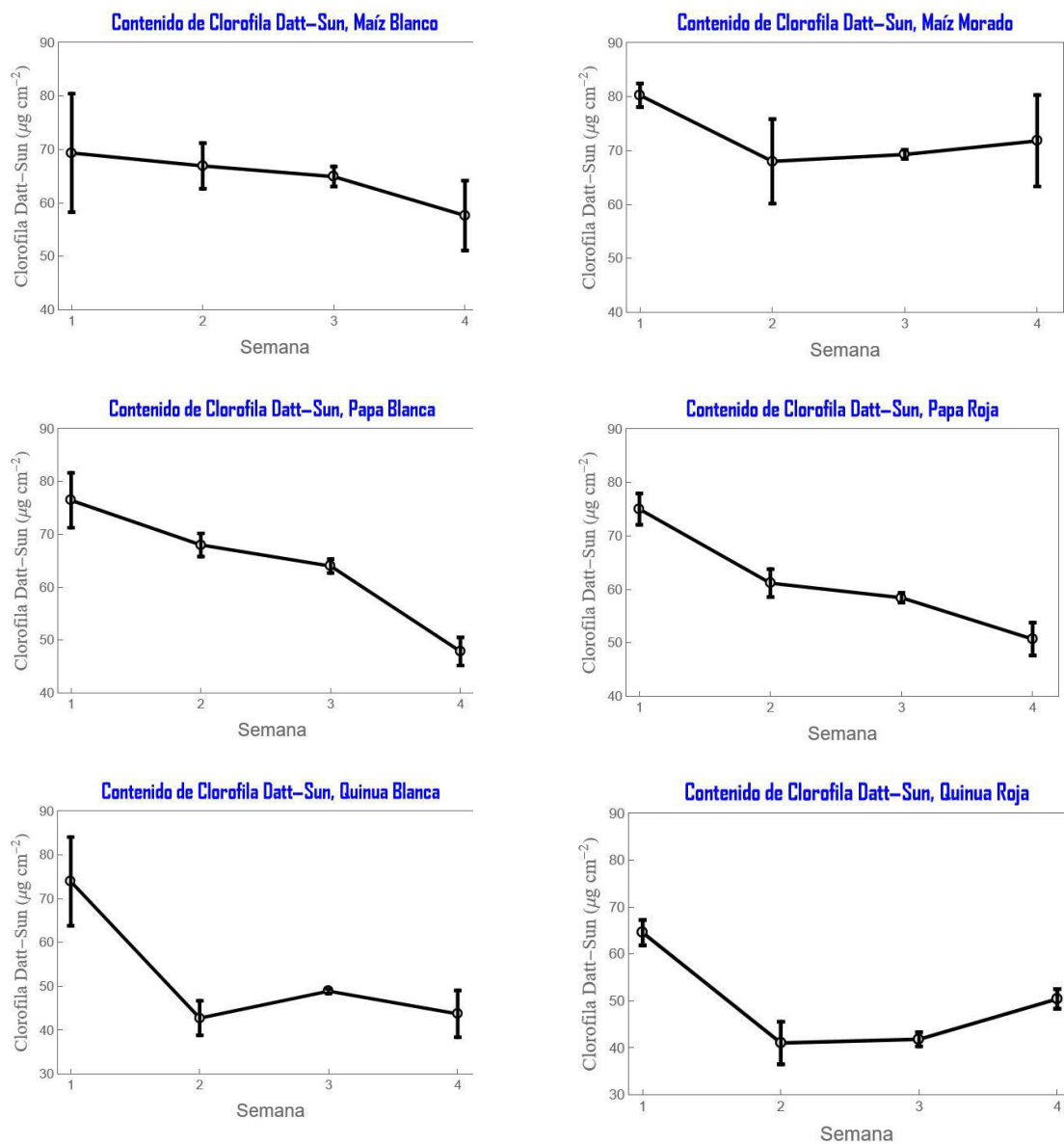
Sun et al. (2021) también proponen otra relación dada como

$$\text{Chl}_{\text{Datt-Sun}} (\mu\text{g cm}^{-2}) = 4.055 e^{3.754 \text{ Datt}}, \quad (12)$$

cuyas gráficas se muestran en la Fig. 22.

Figura 22

Contenido de clorofila según Datt-Sun



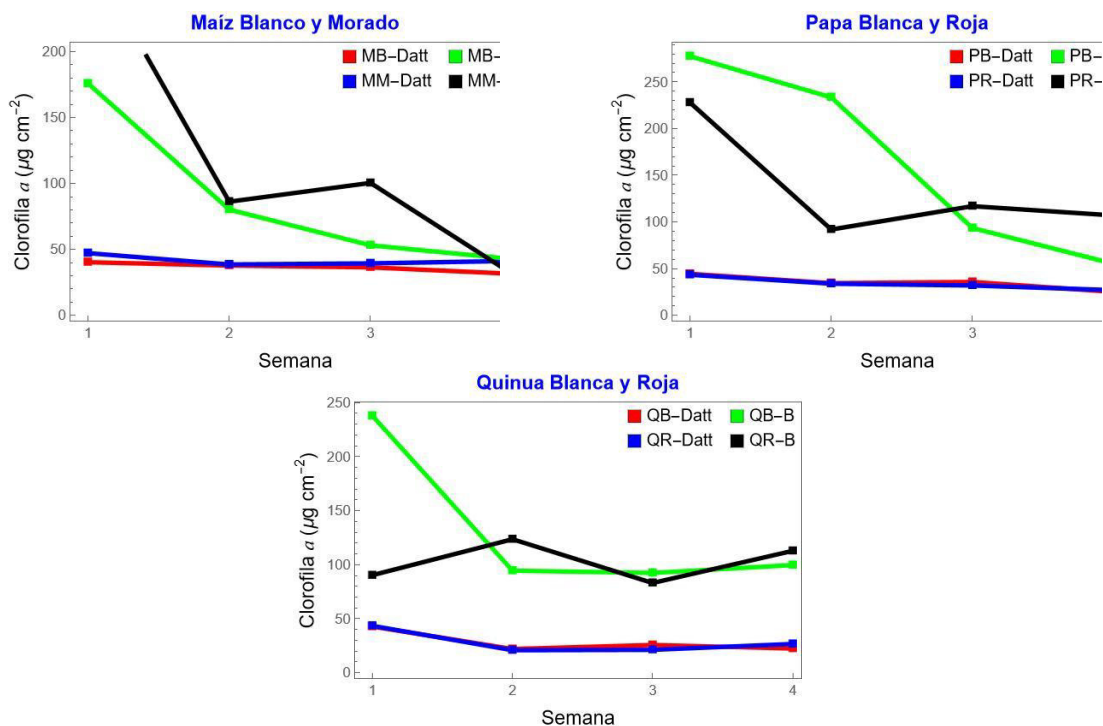
Sun et al. (2021) trabajaron en su artículo el contenido de clorofila usando varios índices, de los cuales se han tomado los que mejor correlacionan, tal como el índice MDRI y Sun-Datt, Es relevante comentar que las mediciones realizadas por Sun et al. (2021) fueron en condiciones especiales, donde se tomó en cuenta la dirección de incidencia de la luz y la variabilidad en la dirección de la detección de la luz reflejada, lo cual tiene importancia para mediciones de campo donde la direccionalidad de la luz reflejada es difícil de controlar. Esto sugiere que las dos propuestas de los índices MDRI y Datt-Sun, son índices adecuados para mediciones de campo, incluyendo el índice Datt. En este sentido, hubieron investigaciones sobre la influencia de las variaciones de la dirección en la detección multiangular de la señal reflejada (Li et al., 2019), concluyendo que el índice de reflectancia dado por Datt es el de mejor comportamiento.

Para un mejor discernimiento de la discusión de los resultados, es bueno mostrar en una sola gráfica los contenidos de clorofila, como se observa en la Figura 23, donde se comparan los contenidos de la clorofila a usando la propuesta de Datt (1999b). denotadas como MB-Datt para el MB y notaciones similares para los otros cultivos (MM-Datt, PB-Datt, PR-Datt, QB-Datt, QR-Datt), mientras que para los índices propuestos por Blackburn se denotan como MB-B, MM-B, PB-B, PR-B, QB-B Y QR-B. Notar que en el caso del MB el decaimiento es de manera similar, siendo diferente para el MM, donde se da el decaimiento para el MM-B en la cuarta semana pero no así en el MM-Datt. Hay una diferencia para la PR, donde según Blackburn no ocurre disminución después de la segunda semana, pero sí continúa la disminución con Datt. En cuanto a la QB en ambos índices, Datt y Blackburn, no hay una disminución evidente después de la segunda semana, notándose la tendencia a permanecer constante. En el caso de la QR no se observa semejanzas entre ambos índices, observándose variaciones entre aumento y disminución en el caso del índice usado por Blackburn, que podría

considerarse estable, mientras que en el índice Datt hay una tendencia al aumento después del decaimiento en la segunda semana.

Figura 23

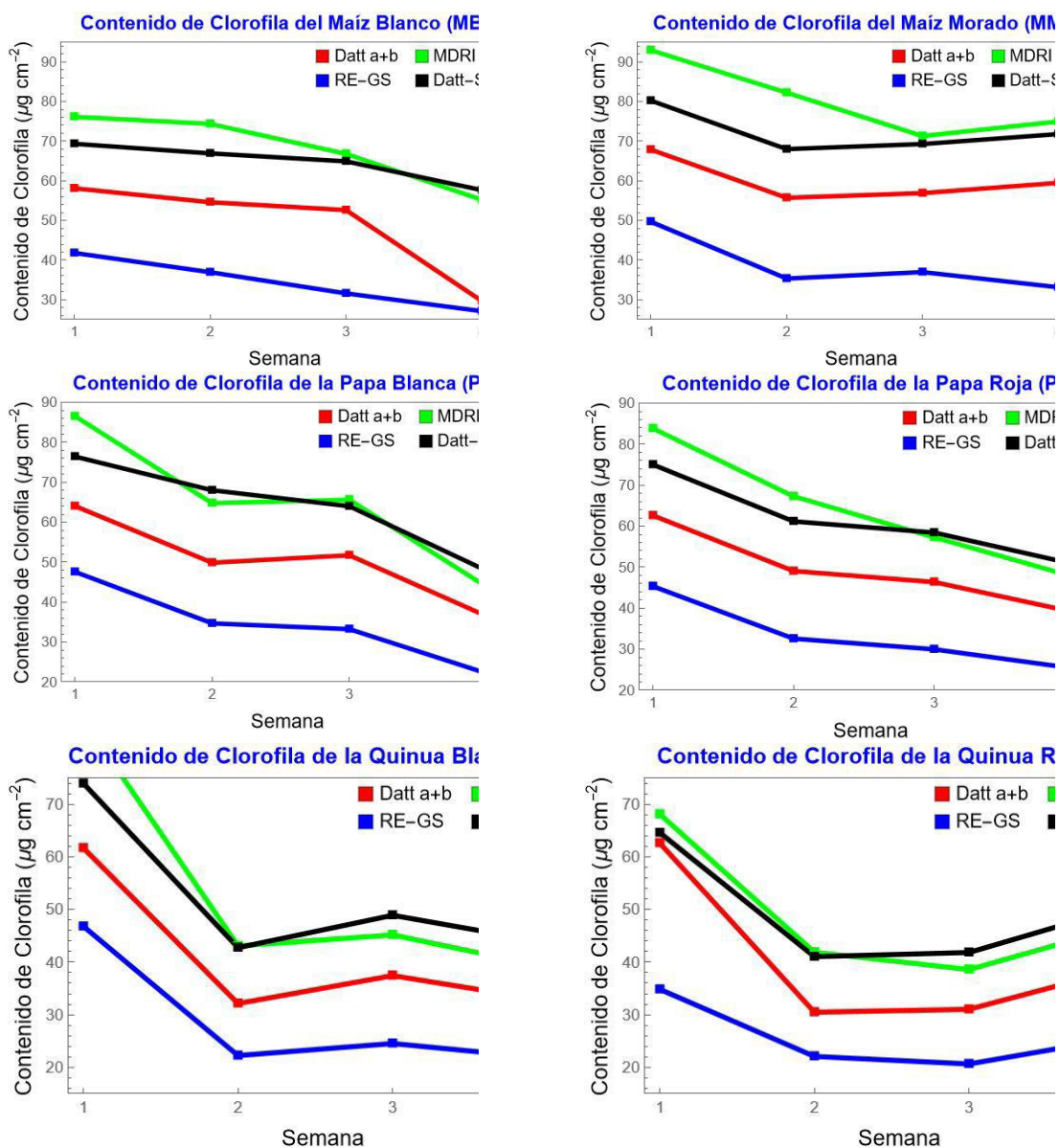
Comparando contenidos de clorofila en términos de índices Datt y Blackburn



En la Figura 24 se comparan los contenidos de clorofila de las hojas en $\mu\text{g cm}^{-2}$, donde si bien los valores numéricos del contenido de clorofila son distintos en la media, el comportamiento cualitativo de los contenidos dados por Datt (1999), Gitelson y Solovchenko (2017) abreviado como RE-GS, MDRI y Datt Sun (Sun et al., 2021), se pueden considerar similares. Desde ya se adelanta que los factores numéricos de las fórmulas fueron encontrados por los autores siguiendo procedimientos estandarizados para su validación; sin embargo, en ningún caso se han utilizado cultivos andinos. Es nuestra responsabilidad trabajar estos detalles en el futuro.

Figura 24

Comparando cuatro propuestas del contenido de clorofila en $\mu\text{g cm}^{-2}$



Por ejemplo, la relación propuesta por Datt (1999, 1999b) se basó en evaluaciones realizadas en varias especies de eucalipto, que son árboles altos de hojas algo gruesas. Las relaciones obtenidas por Sun et al. (2021), al que denominamos MDRI y Datt-Sun, fueron evaluadas en 706 hojas de diez especies de plantas entre arbustos, árboles y lianas. La relación publicada por Gitelson y Solovchenko (2017) se basó en un conjunto de 524 hojas de 45

diferentes especies, tomados de base de datos señalados en el artículo. Blackburn (1998) utiliza árboles senescentes para encontrar las relaciones del contenido de clorofila.

La proximidad numérica de los contenidos de clorofila relacionados a los índices MDRI y Datt-Sun, se puede explicar debido a que ambos fueron validados mediante los mismos procedimientos en la misma publicación (Sun et al., 2021) y son índices de tres bandas. El contenido de clorofila Datt $a + b$ y Datt-Sun están basados en el mismo índice Datt dado por la Ecuación (1), pero las relaciones propuestas son diferentes y, si bien el comportamiento cualitativo es similar, cuantitativamente están alejados, lo que no ocurre con MDRI y Datt-Sun, que tienen buena aproximación pero se basan en índices de tres bandas diferentes. Sin embargo, el índice de clorofila relacionado al borde rojo, basado solamente en dos bandas, son numéricamente menores que los otros índices pero tiene un comportamiento similar.

Comparando las gráficas de la Figura 15 y Figura 24, se observa que el comportamiento de las tendencias de los índices y contenidos se asemejan. Esta semejanza es útil para justificar que usando solamente los datos de los índices espectrales, se pueden conocer las tendencias del comportamiento de los cultivos y ser utilizados en el control para cuidarlos. Varios trabajos se refieren a la utilidad de los índices en el control de cultivos usando observaciones satelitales o, en los últimos años, drones con sensores especializados.

4.3. Resultados de los índices espectrales del contenido de agua

Los índices espectrales y contenidos de agua se definen conforme al tipo de parámetro utilizado para cuantificar el contenido de agua. Según el índice utilizado y la cuantificación del contenido de agua reportado en la publicación, se darán las definiciones de los contenidos de agua de las hojas y los correspondientes índices espectrales validados.

Inoue et al. (1993) realizaron estudios de diferentes índices espectrales relacionados al contenido del agua, varios de ellos con correlaciones mejores que el 80%. Con la finalidad de

comparar con otros índices encontrados en la literatura científica, se han considerado dos índices de la razón dados como

$$SR_{1200-1430} = \frac{R_{1200}}{R_{1430}} \quad (13)$$

y

$$SR_{800-1650} = \frac{R_{800}}{R_{1650}}. \quad (14)$$

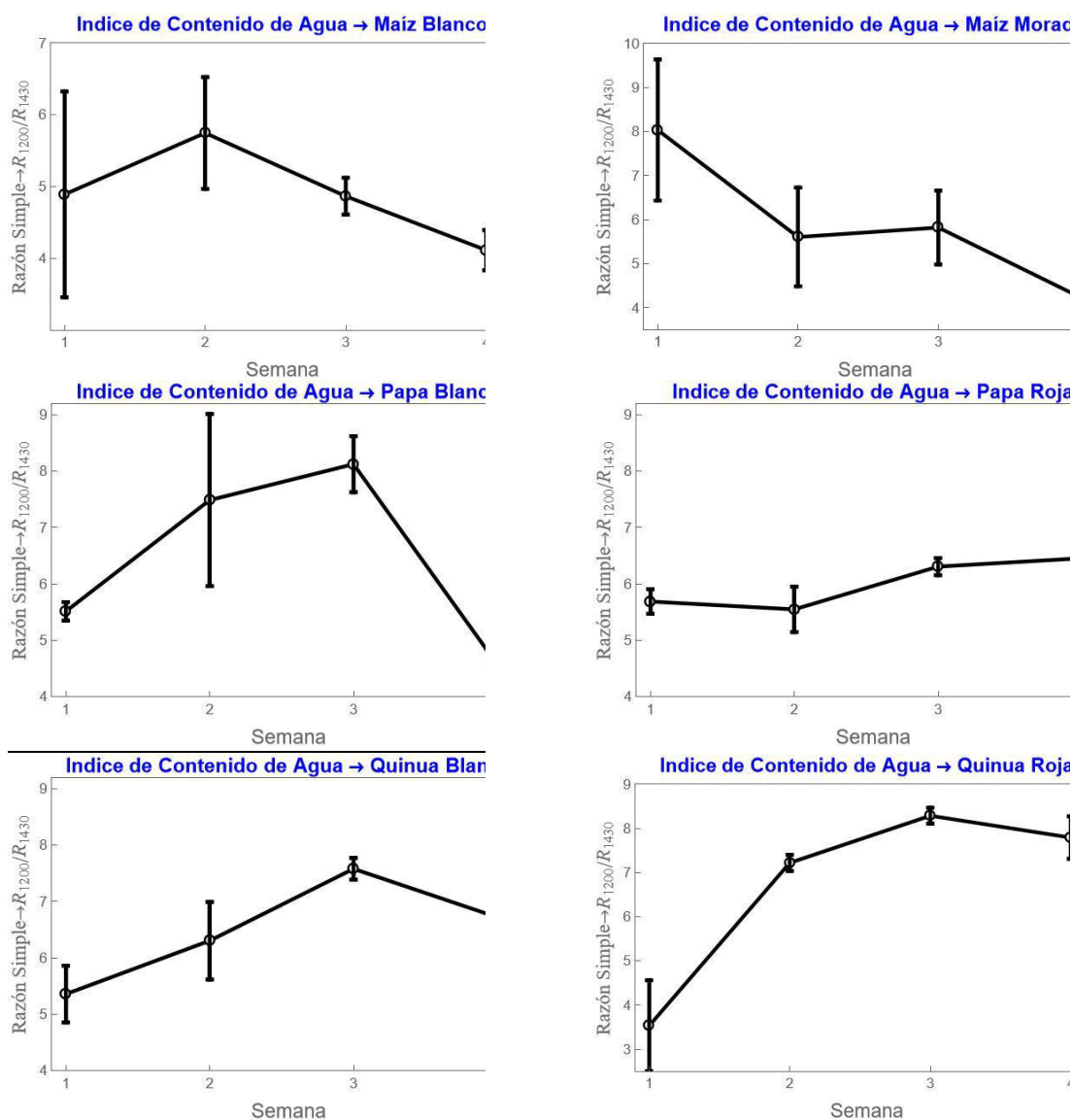
Para visualizar las longitudes de onda elegidas para definir las reflectancias, hay que ir a la Figura 13 (b), donde la tercera banda de absorción está a 1450 nanómetros, y se ha tomado la reflectancia en 1430 nanómetros, cercano al mínimo. El segundo mínimo de absorción del agua se encuentra en 1200 nanómetros, pero su reflectancia R_{1200} debe ser mayor que R_{1430} , como se comprueba visualmente observando la gráfica, es decir, $SR_{1200-1430}$ será mayor que 1. Lo mismo se puede comprobar para $SR_{800-1650}$, pues R_{800} se encuentra en la cima de la reflectancia del infrarrojo cercano y R_{1650} está a la derecha del mínimo R_{1200} . Los resultados de los cálculos de estos índices se muestran en las Figuras 25 y 26, que describen las características de cada tipo de cultivo.

Para el índice $SR_{1200-1430}$ se observa que en el MB hay un incremento del índice de la primera a la segunda semana, mientras que en el MM una disminución. En los otros cuatro cultivos, PB, PR, QB y QR se observa un incremento desde la primera hasta la tercera semana, donde en el caso de la PR el incremento es menos pronunciado que para los otros tres y continúa hasta la cuarta semana, mientras que en la PB, QB y QR, disminuye de la tercera a la cuarta semana. No obstante, notar que en la PB el decaimiento es más pronunciado seguido de la QB y ligero decaimiento en la QR. En términos generales se puede observar que la QR tiende a tener un mayor contenido de agua, por las características del incremento y ligero decaimiento del índice de reflectancia.

Para el índice de la razón $SR_{800-1650}$ (Inoue et al., 1993), los resultados están en las gráficas de la Figura 26, observando las diferencias de los resultados con el índice $SR_{800-1430}$ de la Figura 25. Notar que solamente en la PB y QR se da el incremento entre la primera y segunda semana, disminuyendo en los otros cultivos.

Figura 25

Índice de la razón R_{1200}/R_{1430} utilizado por Inoue et al. (1993)

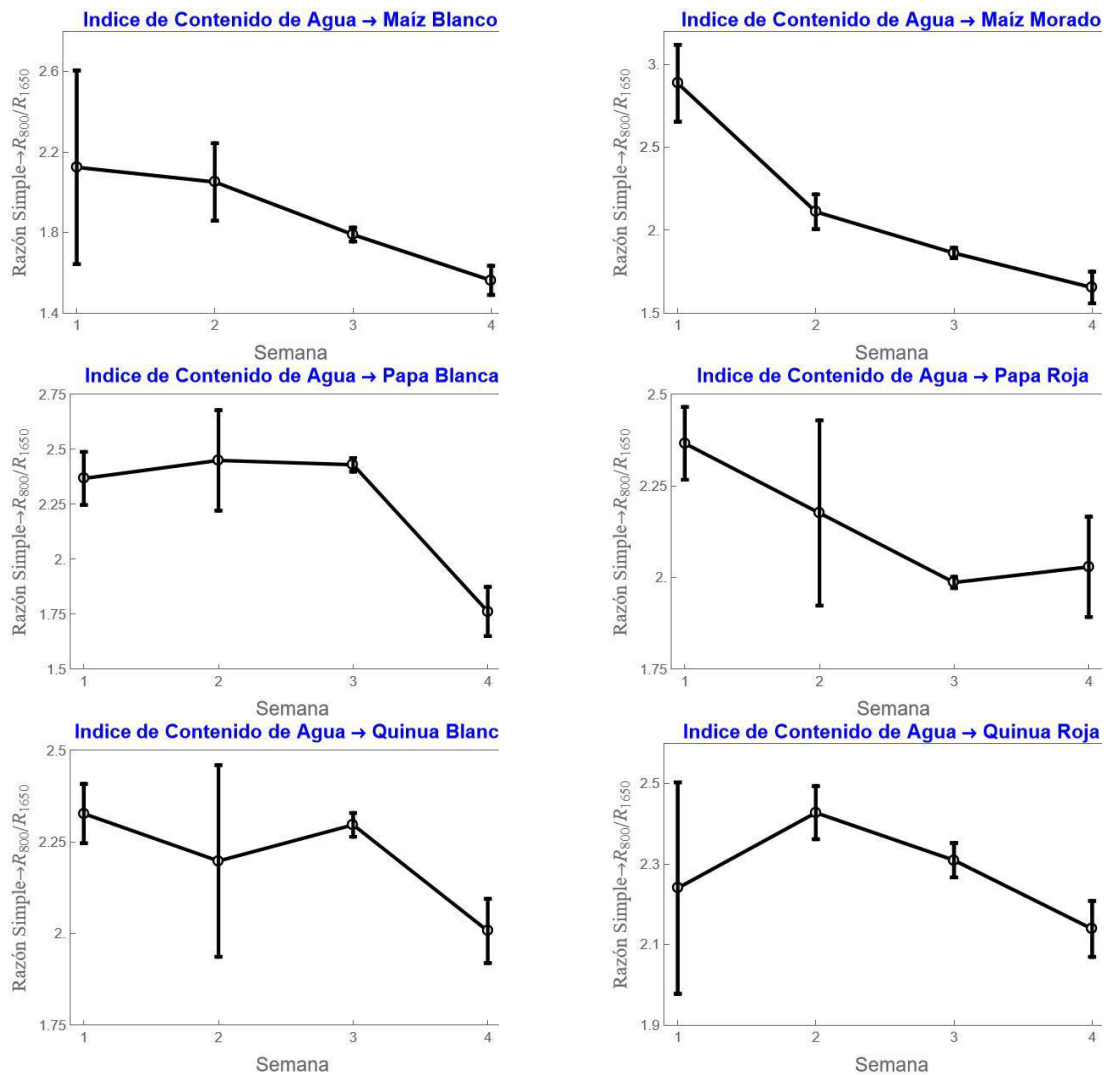


En el MB y MM la disminución se da en todas las semanas sin ningún incremento. En la PB el aumento es hasta la tercera semana con disminución drástica hacia la cuarta semana.

En la PR hay una disminución hasta la tercera semana con ligero incremento hacia la cuarta semana. En la QR al darse el aumento hasta la segunda semana, se observa el decremento continuo hasta la cuarta semana. En la QB se observa aumento de la segunda a la tercera semana y disminución hacia la cuarta semana.

Figura 26

Índice de la razón R_{800}/R_{1650} utilizado por Inoue et al. (1993).



Hay dos índices espectrales propuestos por Datt (1999c) relacionados al contenido de agua. El primero es dado como

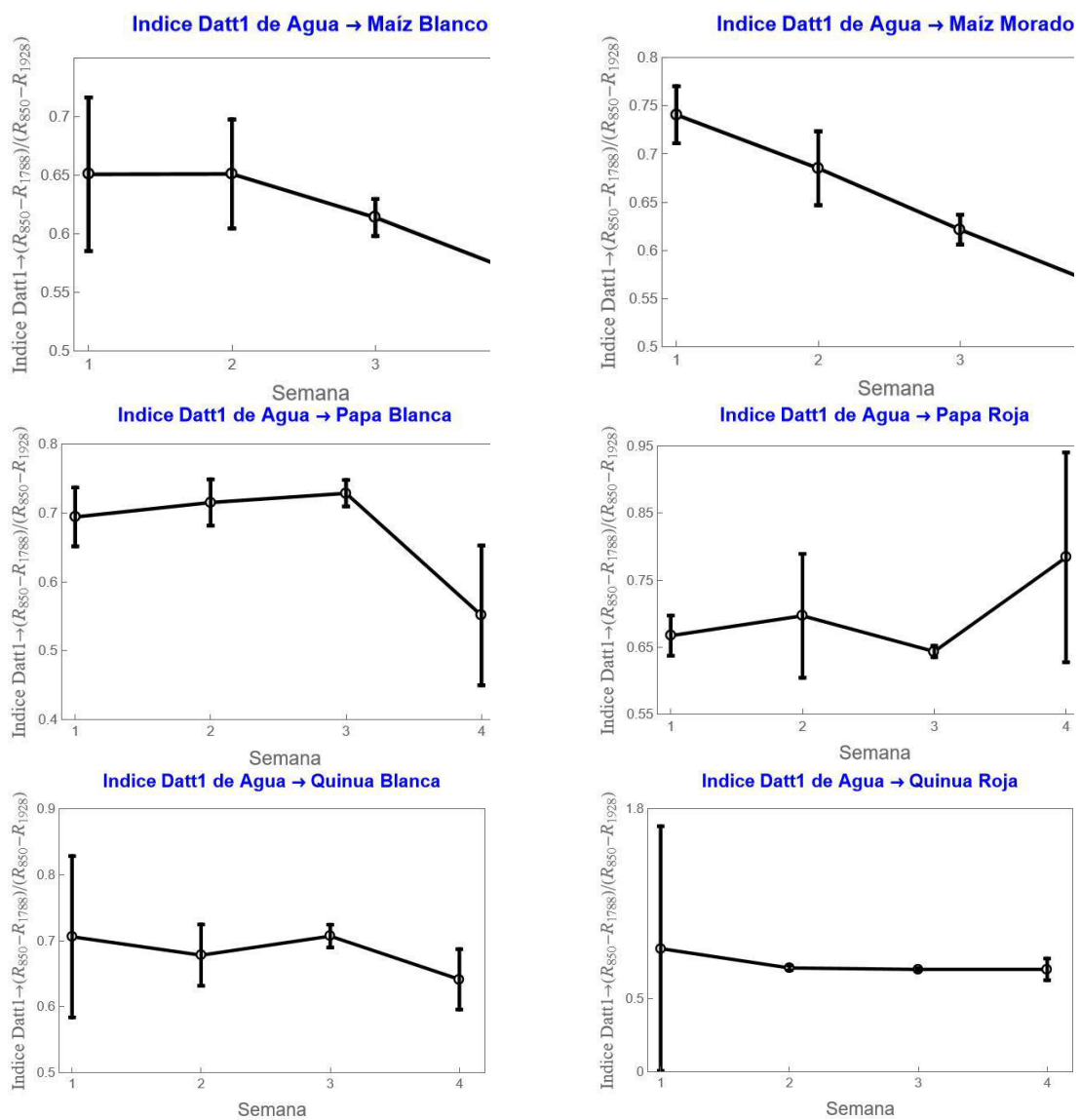
$$\text{Datt1} = \frac{R_{850} - R_{1788}}{R_{850} - R_{1928}} \quad (15)$$

y el segundo como

$$\text{Datt2} = \frac{R_{850} - R_{2218}}{R_{850} - R_{1928}}. \quad (16)$$

Figura 27

Índice del contenido de agua de tres bandas, $(R_{850} - R_{1788})/(R_{850} - R_{1928})$, dado por Datt (1999b), denotado como Datt1



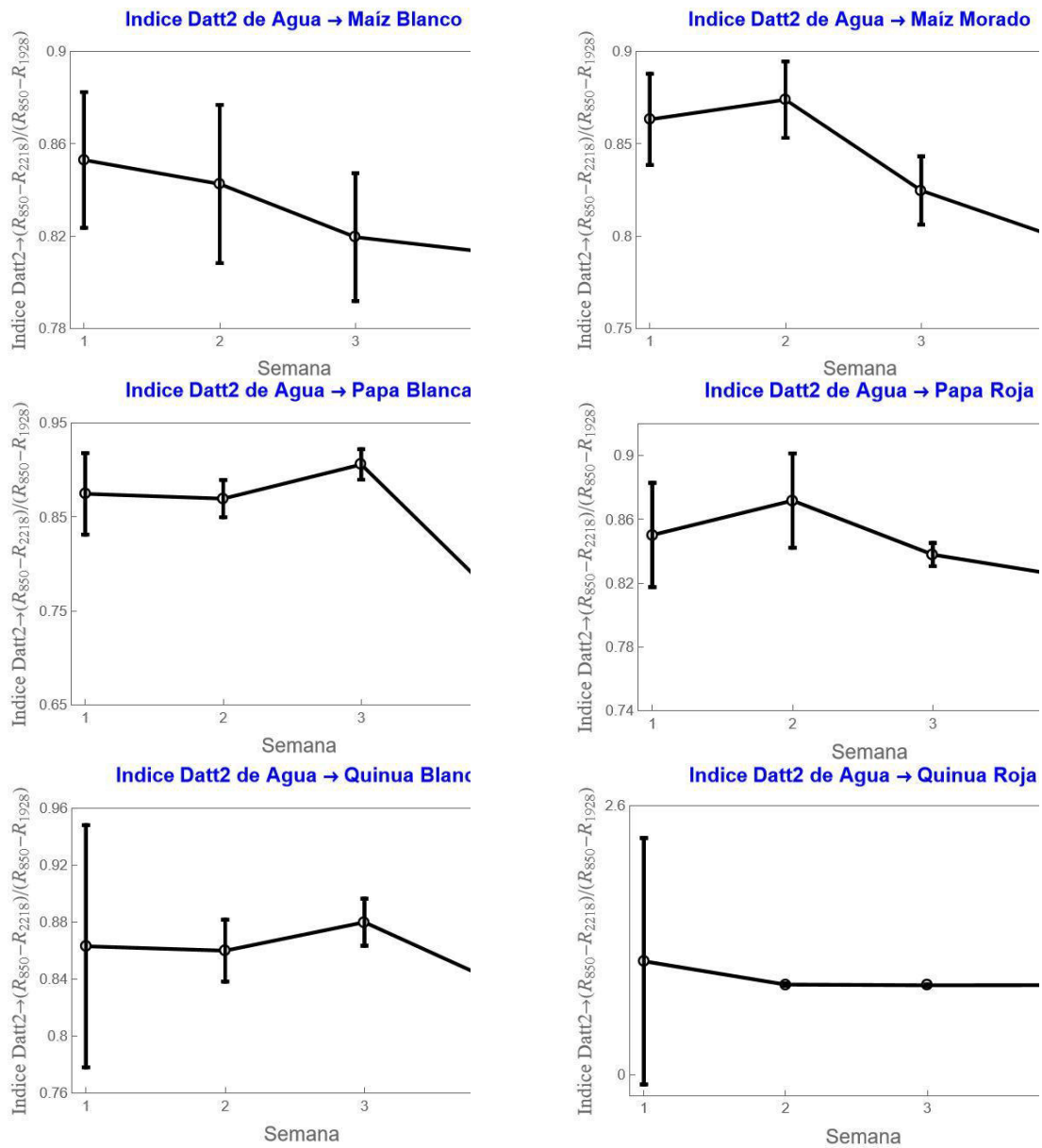
Los resultados de los índices Datt1 y Datt2 se muestran en las Figuras 27 y 28, respectivamente. Para todos los cultivos se observa la disminución del índice hasta la cuarta semana respecto a la primera, excepto la PR que muestra un índice mayor en la cuarta semana respecto a la primera. Para el MB, en ambos índices hay una disminución de los valores desde la primera semana hasta la cuarta. En el MM se da la disminución desde la primera semana a la cuarta tratándose del índice Datt1, mientras que con el índice Datt2 hay un aumento ligero de la primera a la segunda semana y luego disminución hasta la cuarta semana. En la PB se da un incremento directo de la primera a la tercera semana para el índice Datt1 y luego el decremento hacia la cuarta semana, mientras que con índice Datt2 hay una ligera disminución de la primera a la segunda semana y comportamiento similar al índice Datt1 de la tercera a la cuarta semana. En la PR se da un incremento del índice Datt1 de la primera a la segunda semana y luego disminución hasta la cuarta semana, mientras que con el índice Datt2 una disminución de la primera a la segunda semana, incremento de la segunda a la tercera semana, finalizando con la disminución de la tercera a la cuarta semana, indicando un comportamiento diferente de ambos índices para el caso de la PR.

En la QB se observa claramente un comportamiento similar de ambos índices, Datt1 y Datt2, ya que cualitativamente se ve que una disminución ligera de la primera a segunda semana, incremento ligero de la segunda a tercera semana y decremento no pronunciado de la tercera a cuarta semana. Podría considerarse que estadísticamente el contenido de agua en la quinua blanca básicamente no cambia en las cuatro semanas de medición. En la QR sí se observa comportamientos diferenciados entre los índices Datt1 y Datt2, en el primer caso hay una ligera disminución de la primera a la cuarta semana y luego prácticamente no se altera el índice hasta la cuarta semana, en contraparte, para el segundo índice hay un incremento de la primera a la segunda semana decayendo apreciablemente después hasta la cuarta semana.

Los resultados diferenciados observados de los dos índices Datt en algunos cultivos, invita a investigaciones posteriores para dilucidar cuál índice Datt sería el apropiado o tal vez modificaciones de los mismos.

Figura 28

Índice del contenido de agua de tres bandas, $(R_{850} - R_{2218}) / (R_{850} - R_{1928})$, dado por Datt (1999b), denotado como Datt2.



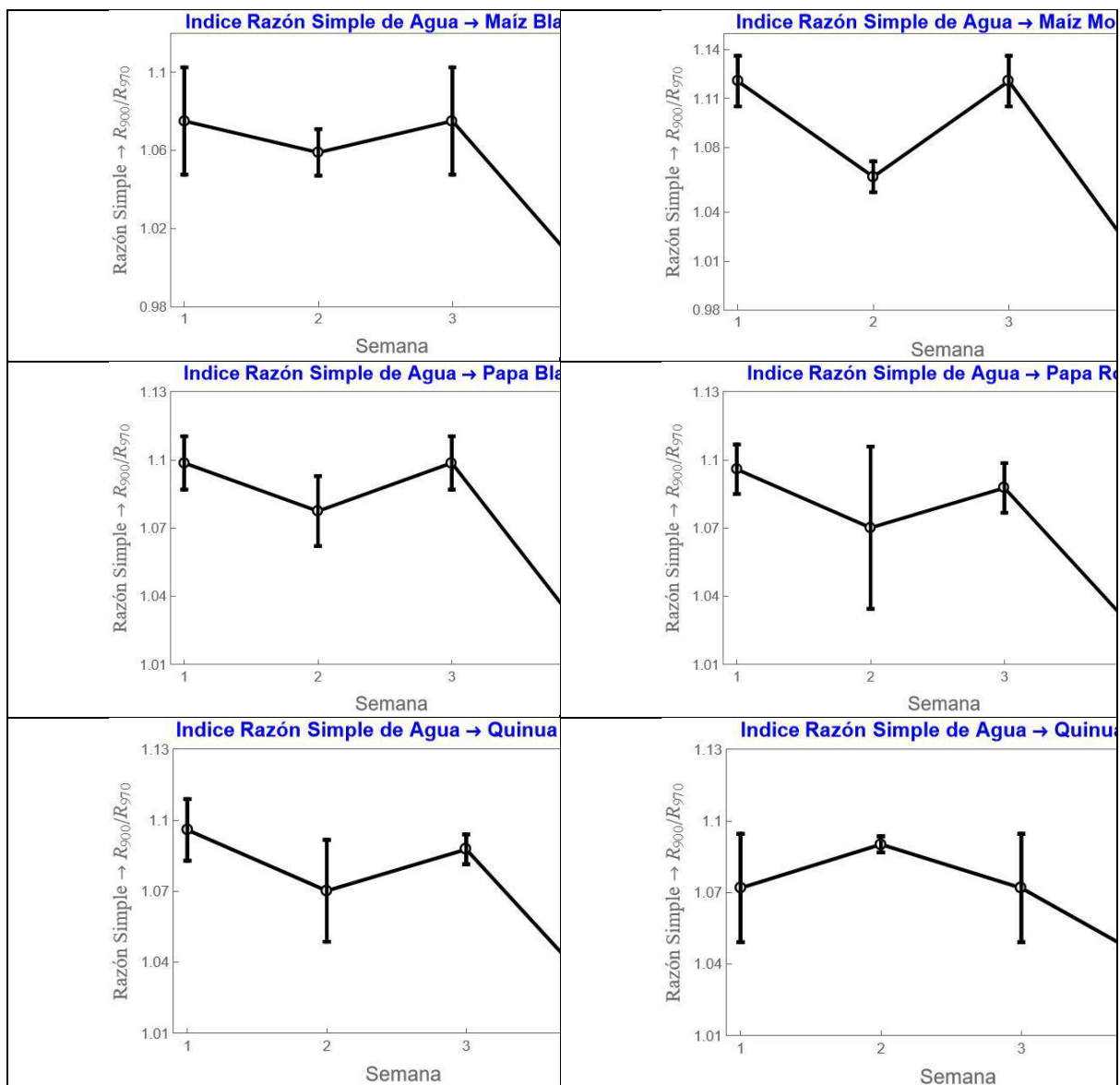
Un índice espectral de agua bastante utilizado y evaluado en varias publicaciones, es el denominado índice de agua (WI, Water Index) que fue usado por Danson y Boywer (2004), dado como

$$WI = \frac{R_{900}}{R_{970}}, \quad (17)$$

que está dentro de la categoría de los índices de la razón de dos bandas.

Figura 29

Índice de la razón simple del contenido de agua R_{900}/R_{970} (1993).



El comportamiento del índice WI es diferenciado de los anteriores, como se observa en la Figura 29, ya que para todos los cultivos, excepto la QR, hay una disminución de la primera a segunda semana, incremento hacia la tercera semana y subsecuente disminución para la cuarta semana. El incremento del índice de la primera a segunda semana se da solamente en la QR, disminuyendo hacia la tercera y cuarta semana.

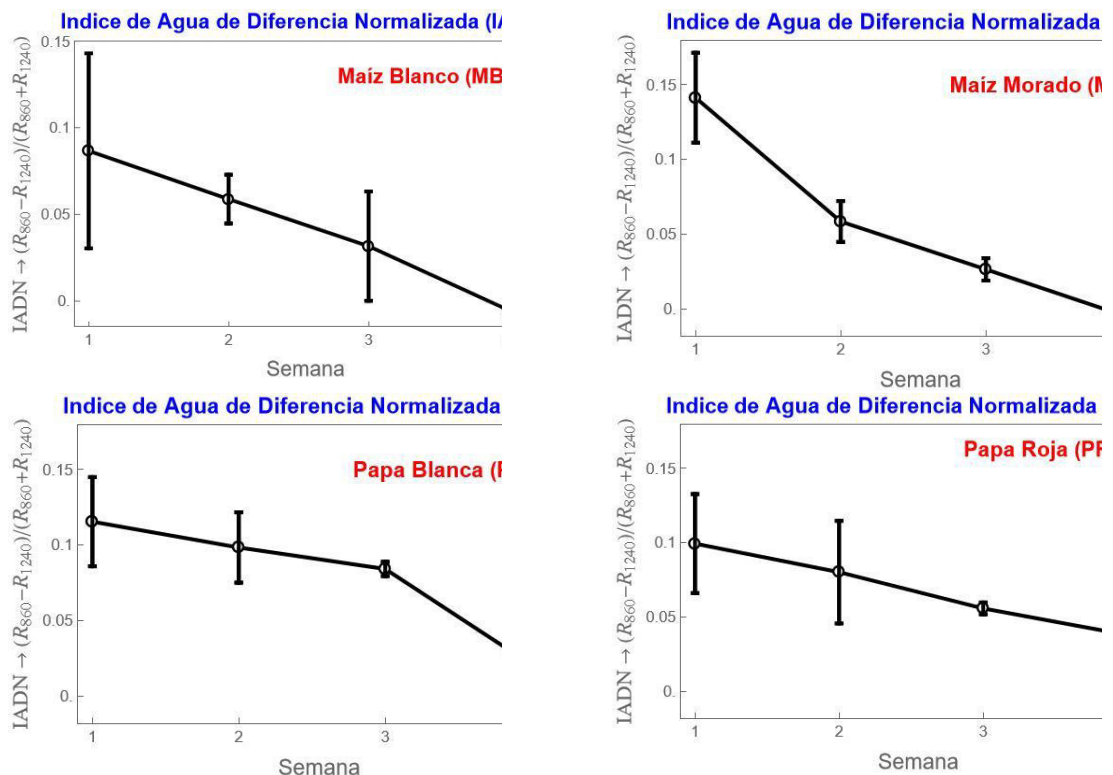
Otro índice también usado y evaluado por Danson y Bowyer (2004), es el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI, Normalized Difference Water Index) dada como

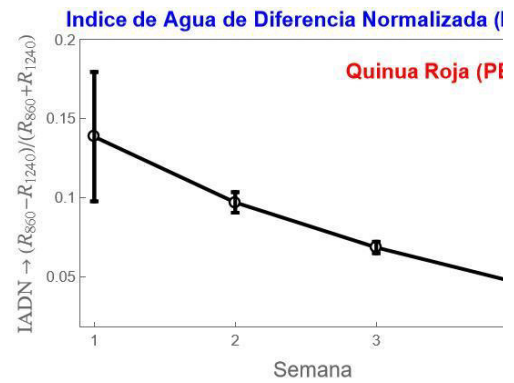
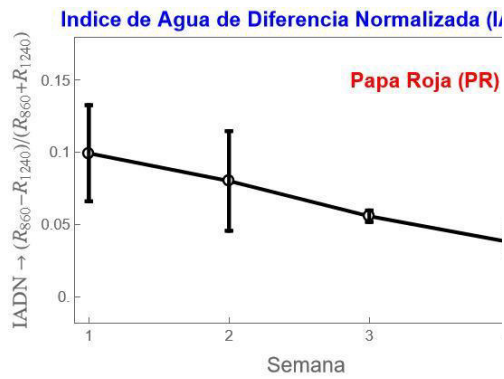
$$\text{NDWI} = \text{IADN} = \frac{R_{860} - R_{1240}}{R_{860} + R_{1240}}, \quad (18)$$

cuyas gráficas se muestran en la Fig. 30.

Figura 30

Índice de agua de diferencia normalizada (IADN), $(R_{860} - R_{1240})/(R_{860} + R_{1240})$ utilizado por Danson y Bowyer (2004).





Se observa que el comportamiento cualitativo de este índice en todos los cultivos es el mismo, la disminución desde la primera a la cuarta semana sin que exista incremento.

Hay otro índice trabajado también por Danson y Boywer (2004), denominado el índice de estrés de humedad (MSI, Moisture Stress Index), cuya peculiaridad fue introducida para obtener información de la magnitud del estrés que la planta padece especialmente la falta de agua. Este índice está definido como

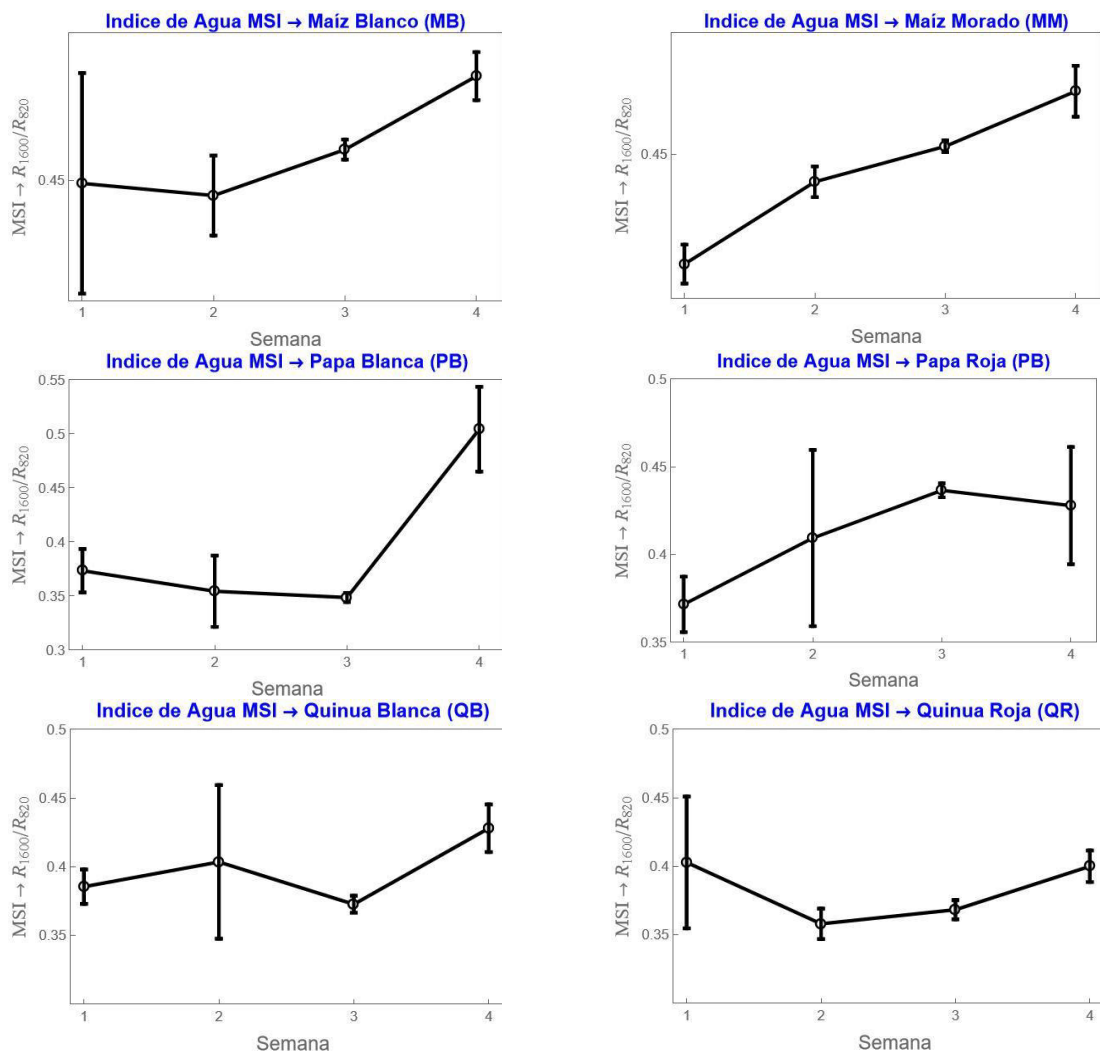
$$MSI = \frac{R_{1600}}{R_{820}}. \quad (19)$$

Notar el comportamiento de este índice que se muestra en las gráficas de la Figura 31, se observa que al final de la cuarta semana el valor del índice es mayor que en la primera medición. Dada las características del índice MSI, se entiende que a mayor valor las hojas están más estresadas. Con esta interpretación, se observa en el MM un incremento del estrés sin ninguna disminución desde la primera hasta la cuarta semana. En el MB hay una disminución ligera del estrés y luego un incremento a través de la tercera hasta la cuarta semana. En la PB se observa la disminución del estrés de la primera hasta la tercera semana y luego el incremento hacia la cuarta semana. En la PR hay un incremento del estrés de la primera a la tercera semana y una ligera disminución ligera hacia la cuarta semana. En la QB el estrés sufre altibajos, sube el estrés de la primera a la segunda semana, luego disminuye hacia la tercera semana para subir algo más apreciablemente hacia la cuarta semana. Lo notable ocurre con la QR, donde hay una

disminución de la primera a segunda semana y crecer ligeramente hacia la cuarta semana pasando por la tercera. Se aprecia en la QR que el estrés disminuido en la segunda semana se recupera cercano al valor inicial hacia la cuarta semana.

Figura 31

Índice de estrés de humedad (MSI, Moisture Stress Index) dado como, R_{1600}/R_{820} , utilizado por Danson y Bowyer (2004).



4.4. Resultados de los contenidos de agua.

En los algoritmos de la evaluación de los contenidos de agua se han definido diferentes criterios, los cuales dependen de la preferencia de los autores y la información que se desea obtener.

Inoue et al. (1993) utilizaron la definición del contenido de agua (WC, Water Content) como

$$WC = \frac{FW - DW}{A}, \quad (20)$$

donde FW es la masa de la hoja fresca (FW, Fresh Weight), DW la masa de la hoja completamente seca (DW, Dry Weight) y A el área de la porción de hoja. Quiere decir que la diferencia FW – DW viene a ser la masa de agua contenida en la porción de área A de la hoja secada. De la relación (9) se deduce

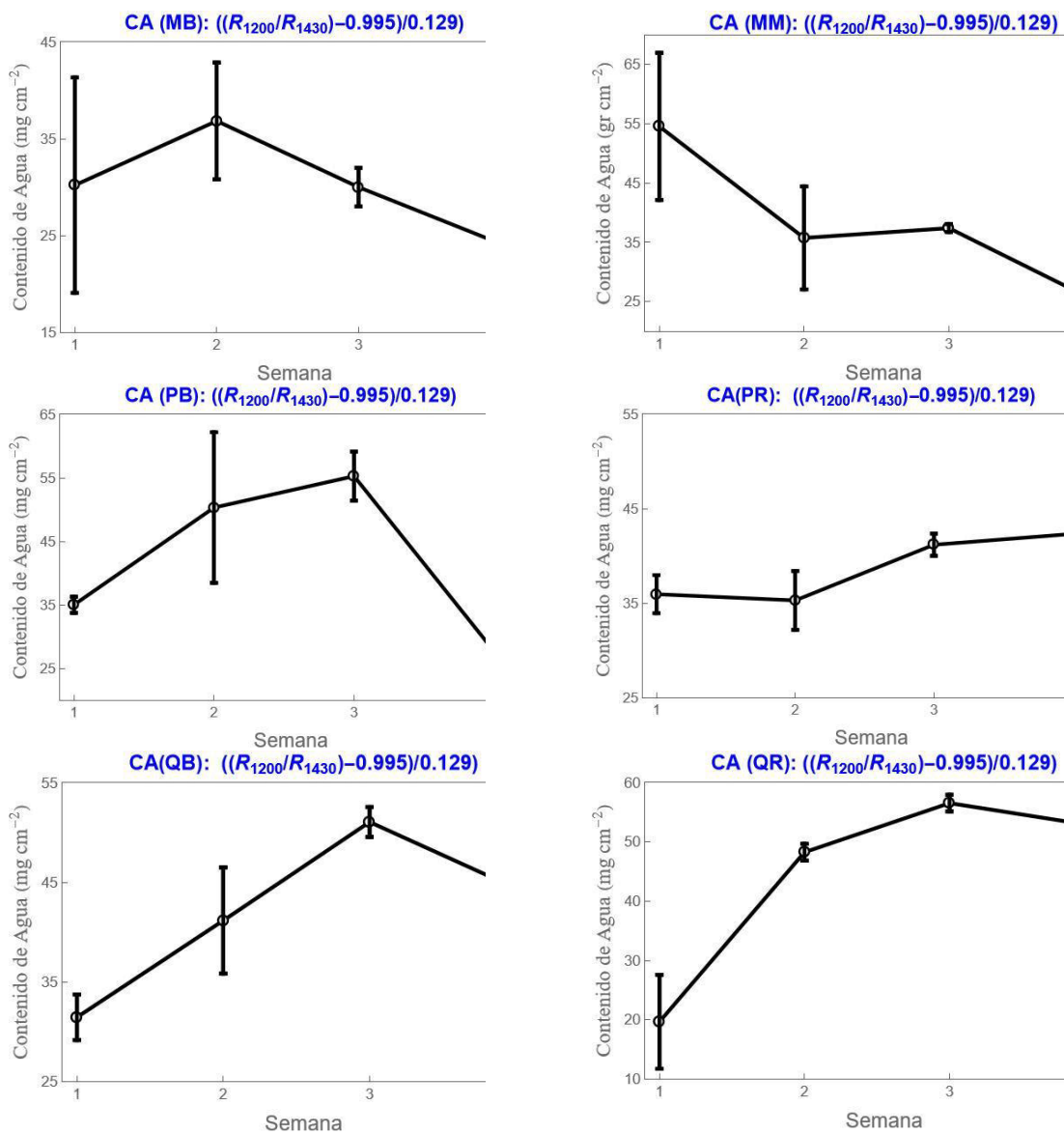
$$\frac{R_{1200}}{R_{1430}} = 0.129 WC + 0.99, \quad (21)$$

$$WC(\text{gr cm}^{-2}) = \frac{\frac{R_{1200}}{R_{1430}} - 0.995}{0.129}. \quad (22)$$

cuyos resultados se muestran en la Figura 32. Observar el comportamiento de los contenidos de agua y comparar con los índices graficados en la Figura 24, los cuales coinciden cualitativamente para los seis cultivos. Era de esperarse que dicho comportamiento ocurra, puesto que la relación entre el contenido de agua WC y el índice de la razón R_{1200}/R_{1420} son lineales, lo cual matemáticamente significa multiplicar el índice por un factor constante y restar por otra constante en todos los casos, por lo tanto, los análisis cualitativos que se hagan sobre el contenido de agua no diferirán con el de los índices espectrales. .

Figura 32

Contenido de agua en términos de la razón $\frac{R_{1200}}{R_{1430}}$ utilizado por Inoue et al. (1993)



Otra relación del contenido de agua dado por Inoue et al. (1993) es expresada como

$$SR_{800-1650} = \frac{R_{800}}{R_{1650}} = 0.0235 WC + 1.076, \quad (23)$$

de donde se deduce el contenido de agua como

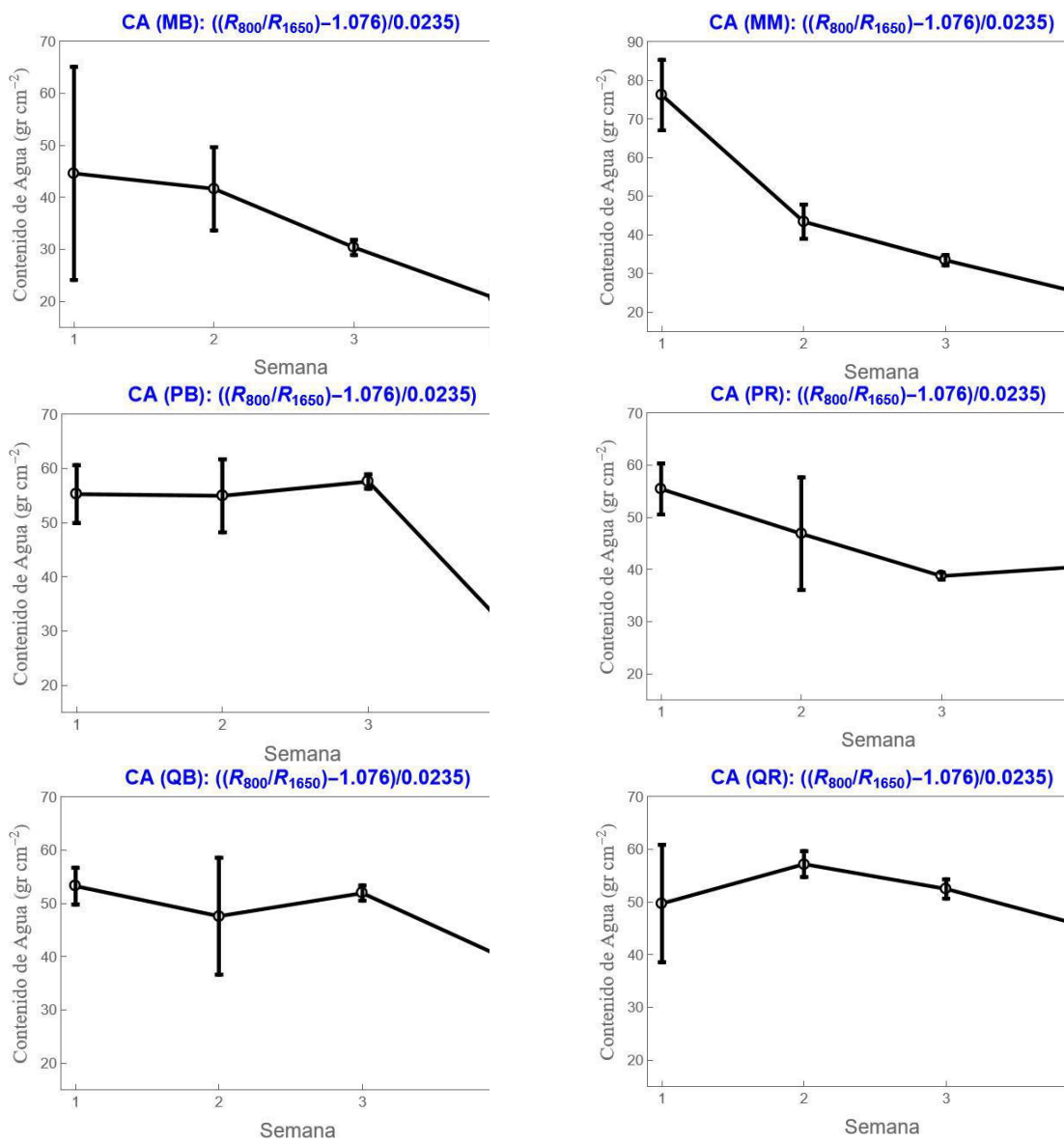
$$WC = \frac{SR_{800-1650} - 1.076}{0.0235}. \quad (24)$$

Los resultados se muestran en la Fig. 33. Comparando las Figuras 33 y 25, se observa comportamientos similares debido a la relación lineal entre el contenido de agua WC y el índice de la razón dado por la Ecuación (24). Sin embargo, no está demás reiterar que el comportamiento de los contenidos de agua de las Figuras 32 y 33 difieren significativamente.

Figura

33

Contenido de agua (WC), Ecuación. (10), para los seis cultivos en términos del índice R_{1200}/R_{1650} , según Inoue et al. (1993)



Datt (1999c) propuso una relación del contenido de agua en términos del espesor equivalente de agua (EWT, Equivalent Water Thickness), dado como

$$EWT = \frac{FM - DW}{\rho_w A}. \quad (25)$$

donde FM (masa fresca) y DW (masa seca) son las mismas cantidades usadas en la Ecuación (19), A es el área tomada de la hoja y ρ_w la densidad del agua pura contenida en la hoja. Haciendo un análisis del concepto del EWT, hay que imaginar como el volumen de agua de cierto espesor, es decir, EWT tiene unidades de longitud y cuantifica el espesor de agua que tendría el agua en un área A de la hoja fresca. Se utilizaron dos índices espectrales que se relacionaron con el EWT, el primero es dado como

$$EWT1(\text{cm}) = 0.045 \frac{R_{850} - R_{1788}}{R_{850} - R_{1928}} - 0.014 = 0.054 \text{ Datt1} - 0.014, \quad (26)$$

donde la notación EWT1 se refiere al índice Datt1 dado por la Ec. (15).

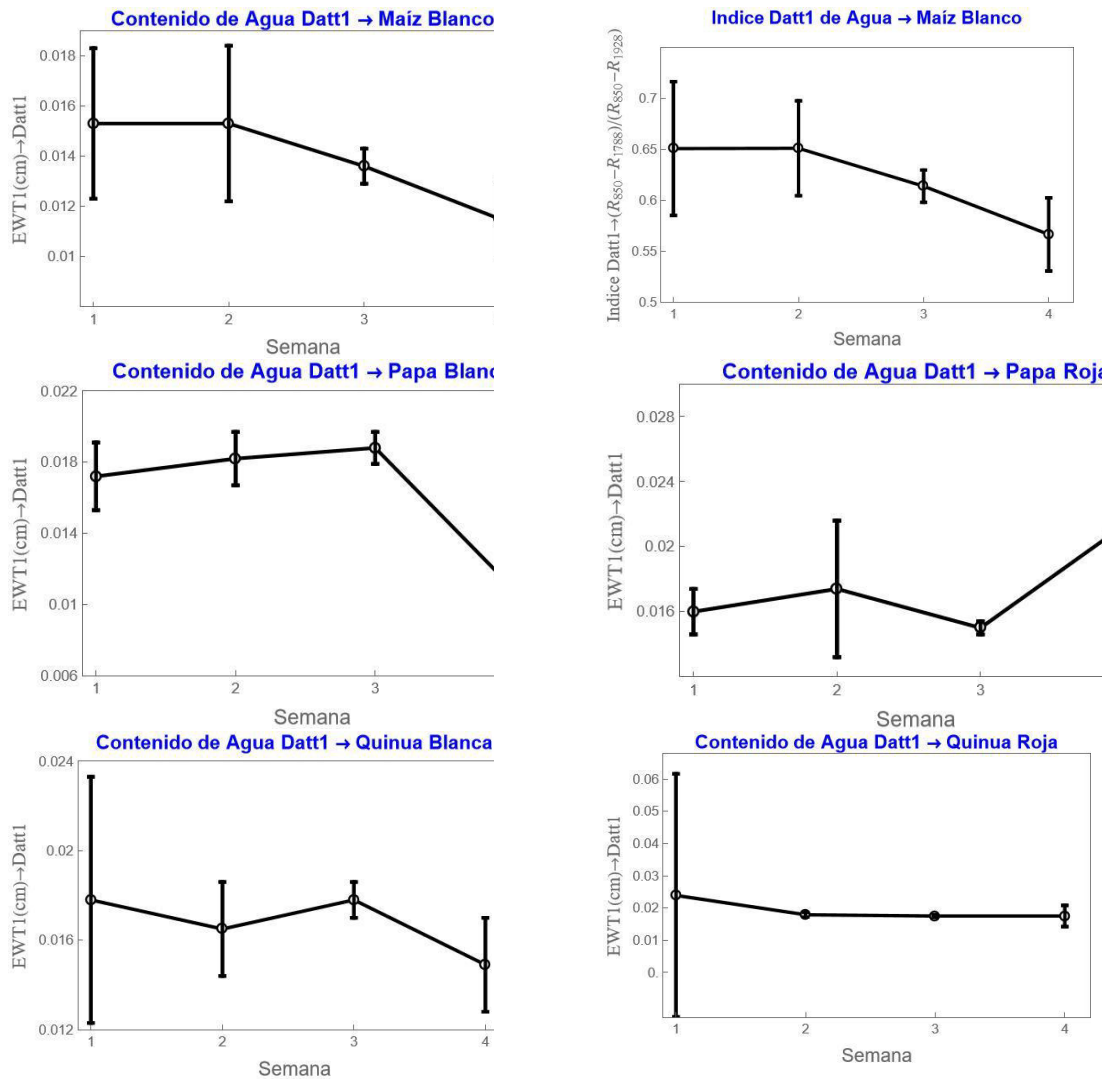
Las gráficas del espesor equivalente de agua EWT1 se muestran en la Figura 34 y, como es de esperarse por la linealidad entre EWT1 y Datt1 en la Ecuación (26), el comportamiento de EWT1 y el índice Datt1 deben ser cualitativamente los mismos, lo cual puede verificarse observando las figuras 34 y 27.

En términos del contenido de agua cuantificado como espesor de agua en la hoja, habría que imaginar que en el MB y MM disminuye el espesor hipotético de agua en la misma área de hoja, lo cual es proporcional a la masa de agua, o sea, se da una disminución de la cantidad de agua en la hoja. Con estas ideas, se observa que en la PB hay un incremento de la cantidad de agua hasta la tercera semana y una disminución apreciable a la cuarta semana. En cuanto a la PR se da un incremento neto de agua en la hoja de la primera a la cuarta semana. En cuanto a la QB y QR se puede observar una disminución no tan apreciable de la primera a la cuarta semana, siendo más significativa para la QB. El agua que llega a las hojas se relaciona de

manera muy importante con la fisiología de la planta, puesto que la planta absorbe el agua a partir de la raíz y no directamente por las hojas, lo cual quiere decir que, en general, las plantas reaccionan de manera diferente a la escasez de agua.

Figura 34

Espesor equivalente del agua (EWT1) relacionado al índice Datt1.



Nota:

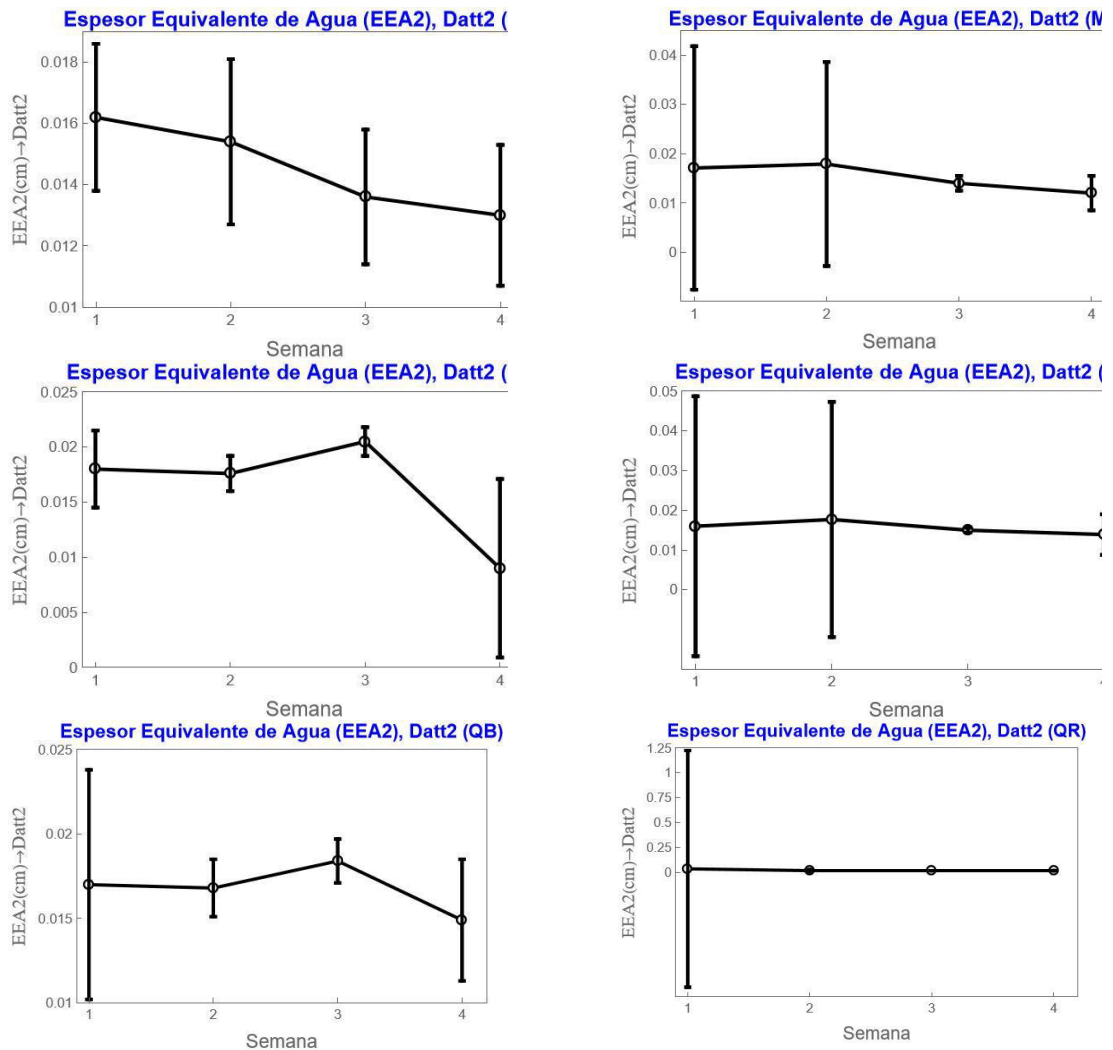
El otro espesor equivalente del agua es el relacionado al índice Datt2 (Datt, 1999b) es dado como

$$EWT2 = 0.080 \frac{R_{850} - R_{2218}}{R_{850} - R_{1928}} - 0.052 = 0.080 \text{ Datt2} - 0.052, \quad (27)$$

donde la notación EWT2 se refiere al índice Datt2 dado por la Ecuación (16). Notando que hay una relación lineal entre EWT2 y Datt2, el comportamiento de EWT2 será similar al índice Datt2, no siendo necesario redundar o abundar en comentarios.

Figura 35

Espesor equivalente del agua (EWT2) relacionado al índice Datt2.



Danson y Bowyer (2004) relacionaron el índice de diferencia normalizada (NDWI, Normalised Difference Water Index), bastante utilizado en las investigaciones y aplicaciones dada por la Ecuación (18), con el espesor equivalente del agua (EWT, Equivalent Water Thickness), mediante la fórmula

$$\text{EWT}(\text{g cm}^{-2}) = \left(\frac{\text{NDWI}}{0.82} \right)^{\frac{1}{0.73}}. \quad (28)$$

Sin embargo, el EWT anterior no es el mismo usado por Datt (1999b) según la Ec. (25), por lo que es necesario escribir este concepto según fue utilizado por Danson y Bowyer, quien usa la definición más estándar dada como

$$\text{EWT} = \frac{FW - FD}{A}. \quad (29)$$

Observar que según esta definición, EWT tiene unidades de $\frac{\text{g}}{\text{cm}^2} = \text{g cm}^{-2}$, entendiéndose que se cuantifica la masa de agua contenida en la hoja por unidad de área.

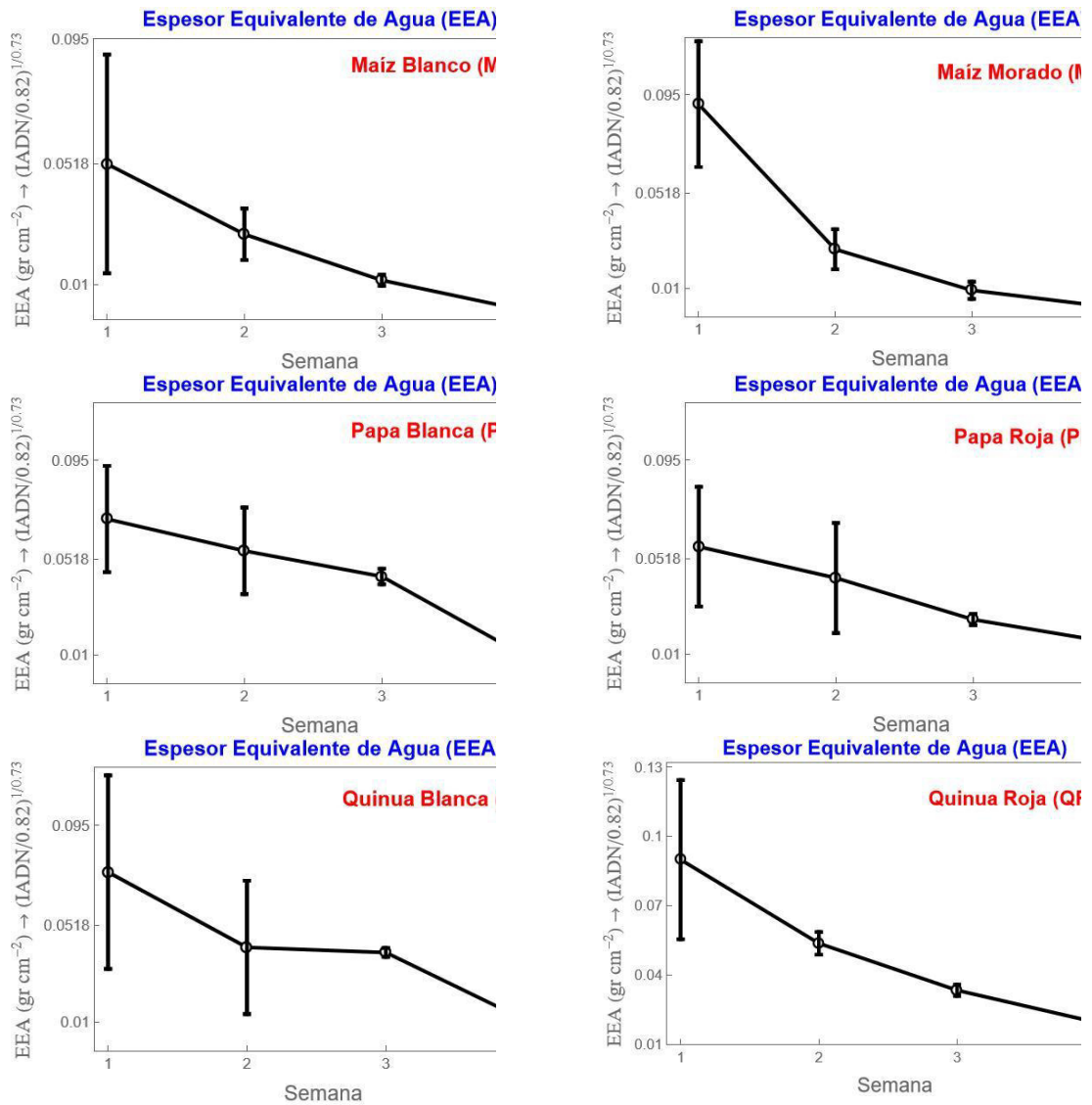
En los resultados mostrados en la Figura 35, se está usando la abreviatura EEA (Espesor Equivalente del Agua) en lugar de las siglas en inglés (EWT). Los resultados observados en la figura claramente reproducen el comportamiento cualitativo del índice NDWI, mostrando el descenso desde la primera a la cuarta semana en los seis cultivos estudiados. Para ilustrar numéricamente los resultados, el MM tiene 0.0909 g cm^{-2} y de la QR es 0.0900 g cm^{-2} tienen los mayores resultados en las mediciones de la primera semana, siendo los resultados en la cuarta semana iguales a 0.0090 g cm^{-2} y 0.0097 g cm^{-2} , respectivamente.

En la práctica se realizan mediciones de campo con aparatos que miden solamente la reflectancia espectral y para cuantificar el contenido de agua como el espesor equivalente del agua, es necesario realizar mediciones de laboratorio con aparatos especializados para ello, lo que incrementa el tiempo de medición y costos adicionales que podrían no estar al alcance de un agricultor medio. Así, se entiende la necesidad de cuantificar índices directamente de los datos de reflectancia, que puede automatizarse con programas especializados para obtener inmediatamente los índices, haciendo posible el seguimiento de los índices para tener una

información más precisa de la salud de los cultivos y tomar oportunamente las medidas adecuadas.

Figura 36

Espesor equivalente del agua (EWT2) relacionado al índice Datt2.



V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Hay que tener en cuenta que utilizar la reflectancia espectral para cuantificar variables, los métodos se relacionan básicamente a la física óptica, cuyas técnicas sean las más simplificados posibles, que en nuestro caso es conocer las condiciones en las que se encuentran los cultivos y la vegetación en general. La idea es hacer el seguimiento de la vegetación mediante mediciones rápidas que den información para conocer su estado de salud y dar soluciones si se detectan alteraciones de su estado normal. En este sentido, los índices y contenidos de clorofila o de agua en el proceso de desarrollo de la planta son parámetros esenciales, ya que la fotosíntesis es el proceso fundamental de los vegetales en captar la energía del Sol para que las síntesis realizadas con el agua y dióxido de carbono se utilicen en las funciones que las plantas necesitan para su desarrollo. Así, dado que en los resultados obtenidos en el proceso de desarrollo de los cultivos hay alteraciones de la reflectancia espectral, comprobados por los cambios de los índices y, consecuentemente, de los contenidos de clorofila y agua, se discutirán el tipo de cambios encontrados en cada cultivo.

Por otro lado, en las gráficas individuales de cada cultivo se han considerado las barras de errores en torno de la media de los datos tomados en intervalos de una semana. Las longitudes de las barras de errores representan las desviaciones cuadráticas medias de las mediciones de las cuatro semanas, resultando que para algunos casos son desproporcionadamente grandes respecto a los valores medios. La principal fuente de error se debe a la aleatoriedad de las mediciones, ya que los datos se han tomado en campo donde las influencias ambientales pueden ser drásticas, como también la posición de las hojas respecto a la dirección de la luz dirigida de la hoja al espejo de entrada de la fibra óptica que conduce la luz a los sensores. A lo mencionado se agrega la posición de las bandas donde se toman los datos, pues por la aleatoriedad de las mediciones, una pequeña variación podría causar cambios apreciables en los índices, influyendo drásticamente en las desviaciones cuadráticas medias.

Sin embargo, como ser, el análisis de las tendencias de los resultados se hacen en torno de los valores medios, realizando la discusión de los resultados en dos partes, la primera relacionada al contenido de clorofila y la segunda al contenido de agua.

5.1. Sobre el contenido de clorofila

Como ya se expusieron en la presentación de los resultados, la reflectancia espectral se determina para una cierta longitud de onda que se utiliza para definir índices y ser relacionados con los contenidos de clorofila. Uno de los índices de tres bandas exitosos relacionadas al contenido de clorofila es la dada por Datt (1999b), pues aun habiendo sido originalmente validada solo con hojas de eucalipto, funciona bien para una gran variedad de cultivos y árboles. Sun et al. (2021) utilizaron exitosamente el índice Datt para obtener una relación del contenido de clorofila mostrados en las Figuras 22 y 24. Los mismos autores (Sun et al., 2021) definieron un nuevo índice de tres bandas abreviado como el MDRI, para encontrar una relación del contenido de clorofila en términos del MDRI, mostrados en las Figuras 21 y 24, observándose en la Figura 24 que estos dos últimos índices son numéricamente próximos entre sí. También se observa en la Figura 24 que el índice Datt aplicado a los cultivos estudiados en el presente trabajo son numéricamente más bajos que los otros dos. Lo notable de estos tres índices es el comportamiento cualitativo similar.

El otro índice y su relación con el contenido de clorofila es el planteado por Gitelson y Solovchenko (2017), denominado el contenido de clorofila del borde rojo (RE, Red Edge) comportándose cualitativamente similar a los contenidos de clorofila de tres bandas mencionados en el párrafo anterior, observándose que numéricamente tiene valores menores a los de tres bandas. Según los estudios realizados desde los años 90 del siglo XX, el borde rojo es uno de los puntos críticos importantes en la absorción de la clorofila. Las relaciones del contenido de clorofila planteadas por Blackburn (1998) no se asemejan a los contenidos anteriores, Según la revisión realizada en varias publicaciones, no es usual utilizar la banda de

reflectancia R_{635} debido a que longitud de onda de 635 nm se encuentra en una region de sobreposición entre el rojo y verde, donde puede haber contribuciones importantes en hojas con apreciable contenido de antocianinas (Gitelson et al., 2001), carotenoides y también clorofila, que se superponen y podría conducir a errores sino hay una evaluación previa de los otros pigmentos antes de aplicar para el contenido de solo clorofila. Por otro lado, la banda centrada en R_{680} está en la región del fondo rojo del espectro de reflectancia que puede ser insensible a las variaciones de clorofila.

Los parámetros numéricos que intervienen en las fórmulas empíricas planteadas para el contenido de clorofila por unidad de área, son obtenidos empíricamente siguiendo un procedimiento que consiste en extraer la clorofila mediante métodos químicos y cuantificar la masa de clorofila por unidad de área de la hoja ayudándose de un espectrofotómetro. Se acostumbra relacionar el contenido de clorofila por unidad de área en función del índice espectral, haciendo un ajuste de mínimos cuadrados se determina el tipo de relación y la desviación cuadrática media. Son estas relaciones tomadas de las publicaciones citadas y utilizadas para determinar el contenido de clorofila en función del índice espectral.

Uno de los resultados más importantes obtenidos en el comportamiento de los cultivos es la tendencia clara en la recuperación de la clorofila que se observa en la quinua roja, lo cual significa que la hoja de la quinua roja responde de manera diferenciada a los efectos ambientales incluido el suelo y recurso hídrico. Por otro lado, la disminución de la primera a la segunda semana en el maíz morado y quinua blanca, tienden a permanecer sin variaciones en el contenido de clorofila de la segunda hasta la tercera semana, lo cual quiere decir que estos dos cultivos tienen comportamientos similares y diferenciados de los otros. Finalmente, el maíz blanco, papa blanca y roja decaen en el contenido de clorofila de la primera hasta la cuarta semana de medición. Así, las mediciones del contenido de clorofila utilizando cuatro índices diferentes, dan tres comportamientos diferenciados en los seis cultivos, lo cual invita a futuras

investigaciones de la fisiología de las plantas estudiadas, cuyo conocimiento puede ser provechoso para mejorar la productividad.

5.2. Sobre el contenido de agua

Como se explicó en el marco teórico y la sección de análisis de datos, existen cinco bandas de absorción del agua de fácil detección por el espectrorradiómetro utilizado, dando la posibilidad de utilizar varias bandas para definir índices. Es menester aclarar que en el caso de las evaluaciones del contenido de agua, el espectro electromagnético donde se produce la absorción del agua abarca desde aproximadamente 900 nm a 2500 nm, mientras que el rango espectral de la absorción de la luz es de solo el rango espectral de 400 nm a 700 nm, es decir, un rango de 300 nm de intervalo, mientras que en la detección del agua se tiene un rango espectral de 1600 nm, teniendo en cuenta que el aparato utilizado mide en el rango de 350 nm a 2500 nm, las mediciones de índices relacionados al contenido de agua se pueden utilizar más bandas.

El otro aspecto a comentar respecto a la cuantificación del contenido de agua de las hojas, tiene que ver con las mediciones experimentales directas del contenido de agua de las hojas, cuyos protocolos se realizan dependiendo del tipo de información que se quiera obtener. El protocolo más directo usado para medir la cantidad de agua de la hoja es pesar la hoja fresca, luego secarla completamente y pesar la hoja seca, obteniendo el contenido de agua por diferencia. Con esta cantidad se determinan varias otras, como el contenido relativo de agua y el espesor equivalente del agua, este último como uno de los más utilizados para ser relacionados con índices espectrales de agua, habiéndose tomado en el presente estudio debido a que se tienen trabajos validados que relacionan el espesor equivalente del agua con índices de reflectancia espectral.

Los dos índices de la razón que usó Inoue et al. (1993) para relacionar con el contenido de agua (WC) dado en gr cm^{-2} muestran resultados diferentes. Por ejemplo, para la razón R_{1200}/R_{1430} en el MB y PB hay aumento y luego disminución del WC hasta la cuarta semana, mientras que en la PR, QB y QR se da un aumento hasta la cuarta semana. Solamente en el MM se da la disminución continua desde la primera hasta la cuarta semana. En contraste, para el WC relacionado a la razón R_{1200}/R_{1650} se observa disminución de la primera hasta la cuarta semana, mostrando disminuciones ligeras en la QB y QR.

En los resultados obtenidos usando los dos índices Datt (199c) que fueron relacionados con el espesor equivalente del agua (EWT) medido en cm, se observan comportamientos similares en algunos cultivos y diferentes en otros. Usando la notación presentada en los resultados como espesor equivalente del agua EWT1 relacionado al índice Datt1 y EWT2 al índice Datt2, se observa disminución de EWT1 y EWT2 en los cultivos MB y MM. Para la PB hay aumento hasta la tercera semana y disminución hacia la cuarta semana tanto en EWT1 y EWT2, mientras que en la PR se da un incremento hasta la cuarta semana con EWT1 y disminución continua muy ligera con EWT2. Para la QB los comportamientos EWT1 y EWT2 son similares con ligeras disminuciones para la segunda semana, aumento hacia la tercera y finalmente disminución hacia la cuarta semana. En la QR el comportamiento de EWT1 es muy similar al EWT2, mostrando una disminución continua ligera de la primera a la cuarta semana. En el caso del EWT usado por Danson y Bowyer (2004) dado en g cm^{-2} , lo relaciona con el índice de agua de diferencia normalizada (DNWI), aplicado a los seis cultivos, se encuentra el mismo comportamiento en todos ellos, como puede observarse en la Fig. 35, donde el EWT disminuye de la primera a la cuarta semana, si bien en grados diferentes.

Un comentario final sobre los resultados obtenidos del contenido de clorofila y de agua de las hojas estudiadas, se verifica que en el MB, PB y PR hay una disminución neta del contenido de clorofila al igual que el contenido de agua. En el MM hay una disminución del

agua, si bien no pronunciada, mientras que en el contenido de clorofila cae de la primera a la segunda semana, tiende a permanecer constante hacia la tercera y cuarta semana. En la QB el contenido de agua tiene tendencia al aumento, aunque podría considerarse sin cambios en la media, el contenido de clorofila disminuye de la primera a la segunda semana, tendiendo a permanecer sin cambios hacia la tercera y cuarta semana. En la QR el contenido de agua tiende a disminuir ligeramente de la primera a la cuarta semana, no obstante, el contenido de clorofila disminuye de la primera a la segunda semana y la clara tendencia al incremento de la clorofila de la segunda a la cuarta semana, de donde el comportamiento diferenciado de la quinua al tratar de relacionar el contenido de agua con el de clorofila en los cultivos estudiados.

VI. CONCLUSIONES

- Se ha encontrado que, en el proceso de desarrollo de los cultivos de maíz, papa y quinua, en sus dos variedades de cada uno, las reflectancias espectrales de las hojas de los cultivos se modifican significativamente, verificando la hipótesis general. Esto se comprueba por los cambios encontrados en los valores medios de los índices y contenidos tanto de la clorofila como del agua.
- Como consecuencia, se han calculado varios índices de reflectancia que permitieron cuantificar los contenidos de clorofila y de agua, observándose modificaciones significativas de dichos contenidos debido al proceso de desarrollo en el intervalo de tiempo de cuatro semanas.
- Puesto que las condiciones de crecimiento de los seis cultivos fueron las mismas, se ha encontrado que las respuestas de los cultivos tuvieron semejanzas y diferencias, dependiendo del índice espectral y las respectivas ecuaciones propuestas para la determinación de los contenidos ya sea de la clorofila o del agua.

VII. RECOMENDACIONES

- A la luz de los resultados obtenidos, se recomienda medir el contenido de clorofila por métodos estandarizados de extracción química de clorofila y relacionar con los índices espectrales que mejor correlacionen y aplicar los resultados para cada tipo de cultivo andino.
- Similarmente, medir experimentalmente el contenido de agua (WC) y el espesor equivalente del agua (EWT) para relacionarlos con índices espectrales y obtener relaciones empíricas que mejor correlacionen con el contenido de agua o espesor equivalente del agua aplicados a cultivos andinos.
- A la luz de los resultados obtenidos, se recomienda realizar investigaciones para entender los mecanismos fisiológicos de cada tipo de cultivo, incluyendo la calidad de los suelos, abonos, falta y exceso de agua, etc., que podrían influir en la mejor salud de los cultivos.

VIII. REFERENCIAS

- Agati, G., Guidi, L., Landi, M., & Tattini, M. (2021). Anthocyanins in photoprotection: knowing the actors in play to solve this complex ecophysiological. *New Phytologist*, 232, 2228-2235. <https://doi.org/10.1111/nph.17648>.
- Blackburn, G.A. (1998). Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: A test using senescent tree leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 19(4), 657–675. <https://doi.org/10.1080/014311698215919>.
- Brinkert, K. (2018). *Energy Conversion in Natural and Artificial Photosynthesis*. Springer.
- Campillo, A. (2019). Filosofía y ecología.
<http://www.ub.edu/prometheus21/articulos/campillo.pdf>.
- Covshoff, S. (Editor). (2018). *Photosynthesis, Methods and Protocols*. Springer Protocols, Humana Press.
- Croce, R., van Grondelle, R., van Amerongen, H. y van Stokkum, I (Editores). (2018). *Light Harvesting in Photosynthesis*. CRC Press.
- Curran, P. J., Dungan, J. L., & Gholz, H. L., (1990). Exploring the relationship between reflectance red Edge and chlorophyll content in slash pine. *Tree Physiology*, 7, 33-48. <https://doi.org/10.1093/treephys/7.1-2-3-4.33>.
- Curran, P. J., Dungan, J. L., Macler, B. A., & Plummer, S. E. (1991). The effect of a red leaf pigment on the relationship between red Edge and chlorophyll concentration. *Remote Sensing of Environment*, 35, 69-76. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90066-F](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90066-F).

- Danson, F.M. & Bowyer, P. (2004). Estimating live fuel moisture content from remotely sensed reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 92(3), 309–321. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.03.017>.
- Datt, B. (1999). A New Reflectance Index for Remote Sensing of Chlorophyll Content in Higher Plants: Tests using Eucalyptus Leaves. *Journal of Plant Physiology*, 154(1), 0–36. [https://doi.org/10.1016/s0176-1617\(99\)80314-9](https://doi.org/10.1016/s0176-1617(99)80314-9).
- Datt, B. (1999b). Visible/near infrared reflectance and chlorophyll content in Eucalyptus leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 20(14), 2741–2759. <https://doi.org/10.1080/014311699211778>.
- Datt, B. (1999c). Remote Sensing of Water Content in Eucalyptus Leaves. *Aust. J. Bot.*, 47, 909-923. <https://doi.org/10.1071/BT98042>.
- Filella, I. y Peñuelas, J. (1994). The red Edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 1459-1470. <https://doi.org/10.1080/01431169408954177>.
- Gao, G., Zhang, L., Wu, L., & Yuan, D. (2024). Estimation of Chlorophyll Content in Wheat Based on Optimal Spectral Index. *Appl. Sci.*, 14, 703. <https://doi.org/10.3390/app14020703>.
- Gitelson, A.A., Gritz, Y. & Merzlyak, M.N. (2003). Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *J. Plant Physiol.*, 160(3), 271-282. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00887>.

- Gitelson, A.A., Chivkunova, O.B., & Merzlyak, M.N. (2009). Nondestructive estimation of anthocyanins and chlorophylls in anthocyanic leaves. *American Journal of Botany*, 96(10), 1861-1868. <https://doi.org/10.3732/ajb.0800395>.
- Gitelson, A. A., Peng, Y., Arkebauer, T. J., & Suyker, A. E. (2015). Productivity, absorbed photosynthetically active radiation, and light use efficiency in crops: Implications for remote sensing of crop primary production. *Journal of Plant Physiology*, 177, 100–109. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.12.015>.
- Gitelson, A.A., Peng, Y., Viña, A., Arkebauer, T., and Schepers, S. (2016). Efficiency of chlorophyll in gross primary productivity: A proof of concept and application in crops. *Journal of Plant Physiology*, 201, 101-110. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2016.05.019>.
- Gitelson, A., & Solovchenko, A. (2017). Generic Algorithms for Estimating Foliar Pigment Content. *Geophysical Research Letters*, 44(18), 9293–9298. <https://doi.org/10.1002/2017gl074799>.
- Golbeck, J. y van der Est, A. (Editores). (2014). *The Biophysics of Photosynthesis*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1148-6>.
- Griffiths, D.J. (2013). *Introduction to Electrodynamics*. (4th Ed.). Pearson,
- Guenter, N.D. (2015). *Modern Optics*. (2nd. Ed.). Oxford University Press.
- Hernández-Sampieri, R. y Mendoza-Torres, C.P. (2018). *Metodología de la Investigación: las Rutas Cuantitativas, Cualitativas y Mixtas*, McGraw Hill.
- Hetch, E. (2017). *Optics*. (5th Ed.). Pearson.

- Horler, D. N. H., Dockray, M. y Barber, J. (1983). The red Edge of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 4, 273-288. <https://doi.org/10.1080/01431168308948546>.
- Inoue, Y., Morinaga, S., and Shibayama, M. (1993). Non-destructive Estimation of Water Status of Intact Crop Leaves Based on Spectral Reflectance Measurements. *Japanese Journal of Crop Science*, 62(3), 462–469. <https://doi.org/10.1626/jcs.62.462>.
- Jacquemoud, S. & Ustin, S. (2019). *Leaf Optical Properties*. Cambridge University Press.
- Jonas, H. (1995). *El Principio de Responsabilidad: ensayo de una ética para la civilización tecnológica*. Herder. www.herder.editorial.com.
- Lescano-Sandoval, J., Valdez-Sena, L.E., Lescano-Valdez, L.E., Reyes-Peña, C.A. y Belaúnde-Suarez, M.F. (2015). *Manual del Desarrollo Sostenible*. Editorial Macro.
- Li, W., Sun, Z, Lu, S., & Omasa, K. (2019). Estimation of the leaf chlorophyll content using multiangular spectral reflectance factor. *Plant Cell Environ.* 42(11), 3152-3165. <https://doi.org/10.1111/pce.13605>.
- Liu, N., Wu, L., Chen, L., Sun, H., Dong, Q., & Wu, J. (2018). Spectral Characteristics Analysis and Water Content Detection of Potato Plants Leaves. *IFAC-PapersOnLine*, 51(17), 541–546. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.152>.
- Li, Y., He, N., Hou, J., Xu, L., Liu, C., Zhang, J., Wang, Q., Zhang, X. & Wu, X. (2018). Factors Influencing Leaf Chlorophyll Content in Natural Forests at the Biome (bioma) Scale. *Front. Ecol. Evol.* 6, 64. <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00064>.

- Li, R., He, Y., Chen, J., Zheng, S., & Zhuang, C. (2023). Research Progress in Improving Photosynthetic Efficiency. *Int. J. Mol. Sci.*, 24, 9286. <https://doi.org/10.3390/ijms24119286>.
- Liu, G., Xiao, X., Qin, Y., Yan, H., Huang, J., Wu, X., Zhang, Y., Zou, Z., & Doughty, R.B. (2022). Large spatial variation and stagnation of cropland gross primary production increases the challenges of sustainable grain production and food security in China. *Sci Total Environ.* 10(811), 151408. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151408>.
- Loayza, H., Calderón R., A., Gutiérrez R., R.O., Céspedes F., E. y Quiroz, R. (2023). Estimación de las concentraciones relativas de clorofila en folíolos de papa (*Solanum tuberosum* L.) utilizando técnicas de reflectancia de la vegetación. *Ecología Aplicada*, 21(2), 91-101. <https://doi.org/10.21704/rea.v21i2.1961>.
- Peñuelas, J., Filella, I., Biel, C., Serrano, L. & Save, R. (1993). The reflectance at the 950–970 nm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 1887–1905. <https://doi.org/10.1080/01431169308954010>.
- Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., & Flannery, B.P. (2007). *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. (3rd Ed.). Cambridge University Press.
- Qiao, B., He, X., Liu, Y., Zhang, H., Zhang, L., Liu, L., Reineke, A.-J., Liu, W., & Müller, J. (2022). Maize Characteristics Estimation and Classification by Spectral Data under Two Soil Phosphorus Levels. *Remote Sens.*, 14, 493. <https://doi.org/10.3390/rs14030493>.
- Roberts, D.A., Roth, K.E., Wetherley, E.B., Meerdink, S.K., and Peroy, R.L. (2019). Hyperspectral Vegetation Indices, 3-23; Edit by Thenkabail, P.S., Lyon, J.G., and Huete,

A., *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation*, Second Edition, Vol. II, *Hyperspectral Indices and Image Classifications for Agriculture and Vegetation*.

Savitzky, A., & Golay, M.J.E. (1964). Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Anal. Chem.* 36(8), 1627-1639. <https://doi.org/10.1021/ac60214a047>.

Solano-Reynoso, W.M., Palomino-Villanoy, A., Soca-Flores, R., Torres-Huaripaucar, N., & Prado-Dávalos, J.Z. (2023). Índices de reflectancia espectral de pigmentos en hojas de cultivos andinos. *Acta Agronómica*, 72-1, 78-87. <https://doi.org/10.15446/acag.v72n1.106493>-

Sonobe, R., & Wang, Q. (2018). Nondestructive assessments of carotenoids content of broadleaved plant species using hyperspectral indices. *Computers and Electronics in Agriculture*, 145, 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.022>.

Sun, P., Grignetti, A., Liu, S., Casacchia, R., Salvatori, R., Pietrini, F., Loreto, F., & Centritto, M. (2008). Associated changes in physiological parameters and spectral reflectance indices in olive (*Olea europaea* L.) leaves in response to different levels of water stress. *International Journal of Remote Sensing*, 29(6), 1725-1743. <https://doi.org/10.1080/01431160701373754>.

Sun, Z., Bu, Z., Lu, S., & Omasa, K. (2021). A General Algorithm of Leaf Chlorophyll Content Estimation for A Wide Range of Plant Species. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60(4406814),1-14. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3123117>.

Velichkova, K. y Krezhova, D. (2019). Extraction of the Red Edge Position from Hyperspectral Reflectance Data for Plant Stress Monitoring. *AIP Conference Proceedings*, 2075(1), 130018. <https://doi.org/10.1063/1.5091303>.

- Wang, H., Prentice, I. C., Keenan, T. F., Davis, T. W., Wright, I. J., Cornwell, W. K., ... Peng, C. (2017). Towards a universal model for carbon dioxide uptake by plants. *Nature Plants*, 3(9), 734–741. <https://doi.org/10.1038/s41477-017-0006-8>.
- Yañez-Segovia, S., Silvestre, L., & Chamorro-Warnken, I. (2023). Ignacio Contenido de clorofila en hojas de papas de altura para estimar la calidad de los tubérculos LA GRANJA. *Revista de Ciencias de la Vida*, 38, 46-58. <https://doi.org/10.17163/lgr.n38.2023.04>.
- Yi, Q., Bao, A., Wang, Q., & Zhao, J. (2013). Estimation of leaf water content in cotton by means of hyperspectral indices. *Computers and Electronics in Agriculture*, 90, 144–151. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.09.011>.
- Zhang, H., Li, J., Liu, Q., Lin, S., Huete, A., Liu, L., Croft, H., Clevers, J. G. P., Zeng, Y., Wang, X., Gu, C., Zhang, Z., Zhao, J., Dong, Y., Mumtaz, F., & Yu, W. (2022). A novel red-edge spectral index for retrieving the leaf chlorophyll content. *Methods in Ecology and Evolution*, 13, 2771–2787. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13994>.
- Zhang, Z., Ju, W., Li, X., Cheng, X., Zhou, Y., Xu, S., Liu, C., & Li, L. (2024). Joint improvement on absorbed photosynthetically active radiation and intrinsic quantum yield efficiency algorithms in the P model better the estimate of terrestrial gross primary productivity. *Agricultural and Forest Meteorology*, 346, 109883. <https://doi.org/10.1016/j.agr.formet.2023.109883>.

Zheng, T., Liu, N., Wu, L., Li, M., Sun, H., Zhang, Q., & Wu, J. (2018). Estimation of Chlorophyll Content in Potato Leaves Based on Spectral Red Edge Position. *IFAC-Papers OnLine*, 51(17), 602–606. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.131>.

IX. ANEXOS

ANEXO A. MATRIZ DE CONSISTENCIA

“PROCESO DE DESARROLLO DE CULTIVOS ANDINOS Y REFLECTANCIAS ESPECTRALES DE LAS HOJAS, PROVINCIA DE HUAMANGA, 2019”

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIÓN	INDICADORES	METODOLOGIA
¿Cómo el proceso de desarrollo de cultivos andinos modifica las reflectancias espectrales de las hojas, Provincia de Huamanga, 2020?	Determinar en el proceso de desarrollo de los cultivos andinos las reflectancias espectrales de las hojas, Provincia de Huamanga, 2020.	El proceso de desarrollo de los cultivos modifican significativamente las reflectancias espectrales de las hojas, Provincia de Huamanga, 2020.	Proceso de desarrollo de cultivos andinos	Crecimiento Madurez	Hojas verdes Hojas amarilladas o rojizas	Nivel: Descriptivo Tipo: Aplicada Diseño: No experimental Longitudinal Inductivo No experimental Población: Cultivos de maíz, papa y quinua, provincia de Huamanga. Muestra: Tres hojas de cada cultivo tomados aleatoriamente.
PROBLEMAS ESPECIFICOS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPOTESIS ESPECIFICAS	VARIABLE DEPENDIENTE			
¿Cómo el proceso de desarrollo de cultivos andinos modifican los índices de clorofila de las hojas de maíz, papa y quinua, Provincia de Huamanga, 20120? ¿Cómo el proceso de desarrollo de cultivos andinos modifica el índice de agua de las hojas de maíz, papa y quinua, Provincia de Huamanga, 2020?	Determinar en el proceso de desarrollo de cultivos andinos los índices de clorofila de las hojas de maíz, papa y quinua, Provincia de Huamanga, 20120. Determinar en el proceso de desarrollo de cultivos andinos el índice de agua de las hojas de maíz, papa y quinua, Provincia de Huamanga, 2020.nl	El proceso de desarrollo de cultivos andinos modifica significativamente el índice de clorofila e las hojas de maíz, papa y quinua, Provincia de Huamanga, 2020. El proceso de desarrollo de cultivos andinos modifica significativamente el índice de agua de las hojas de maíz, papa y quinua, Provincia de Huamanga, 2020.	Reflectancia espectral de las hojas.	Contenido de clorofila de las hojas. Contenido de agua de las hojas.	Índice de Clorofila Índice de agua.	

ANEXO B. RESULTADOS DE LOS ÍNDICES ESPECTRALES Y DEL

CONTENIDO DE CLOROFILA

INDICE DATT DE CLOROFILA (Datt, 1999)

$$\frac{R_{850} - R_{710}}{R_{850} - R_{680}}$$

Cult.	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	0.7526 ± 0.0450	0.7462 ± 0.0169	0.7386 ± 0.0077	0.7053 ± 0.0304
MM	0.7951 ± 0.0072	0.7492 ± 0.0315	0.7560 ± 0.0033	0.7636 ± 0.0320
PB	0.7816 ± 0.0179	0.7260 ± 0.0185	0.7349 ± 0.0054	0.6571 ± 0.0148
PR	0.7770 ± 0.0104	0.7227 ± 0.0154	0.7107 ± 0.0042	0.6724 ± 0.0159
QB	0.7697 ± 0.0486	0.6267 ± 0.0344	0.6632 ± 0.0027	0.6313 ± 0.0330
QR	0.7370 ± 0.0112	0.6150 ± 0.0361	0.6214 ± 0.0094	0.6711 ± 0.0067

CONTENIDO DE CLOROFILA *a* (Datt, 1999)

$$\text{Chl } a \text{ (}\mu\text{g cm}^{-2}\text{)} = 1.22 e^{4.596 \frac{R_{850} - R_{710}}{R_{850} - R_{680}}} \pm 1.22$$

Cult-	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	40.2683 ± 7.4586	37.7734 ± 2.9454	36.3765 ± 1.2824	36.3765 ± 1.2824
MM	47.1658 ± 1.5840	38.5733 ± 5.4012	39.3916 ± 0.5942	39.3916 ± 0.5942
PB	44.4527 ± 3.6877	34.4376 ± 2.8739	35.7503 ± 0.8908	35.7403 ± 0.8908
PR	43.4214 ± 2.0721	33.8752 ± 2.3517	31.9830 ± 0.6169	31.9830 ± 0.6169
QB	42.7700 ± 6.7434	22.0134 ± 3.5456	25.7125 ± 0.3213	25.7125 ± 0.3212
QR	43.4214 ± 2.0721	20.8656 ± 3.1433	21.2404 ± 0.9386	21.2404 ± 0.9386

CONTENIDO DE CLOROFILA *a* y *b* (Datt, 1999):

$$\text{Chl } (a + b) \text{ (}\mu\text{g cm}^{-2}\text{)} = 1.88 e^{4.510 \frac{R_{850} - R_{710}}{R_{850} - R_{680}}} \pm 1.74$$

Cult.	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	58.1033 ± 10.579	54.5838 ± 4.1764	52.6046 ± 1.8199	52.6046 ± 1.8199
MM	67.8766 ± 2.2360	36.1527 ± 4.9712	56.8805 ± 0.8420	56.8805 ± 0.8420
PB	64.0397 ± 5.2126	49.8492 ± 4.0836	55.0906 ± 1.3728	55.0906 ± 1.3728
PR	62.5841 ± 2.9307	49.0511 ± 3.3429	46.3630 ± 1.8199	46.3630 ± 0.8777
QB	61.6600 ± 9.5963	20.8486 ± 3.2942	37.4259 ± 0.4587	37.4259 ± 0.4587
QR	62.5841 ± 2.9307	32.1535 ± 4.8438	31.0237 ± 1.3450	31.0267 ± 1.3450

CONTENIDO DE CLOROFILA *a* (Blackburn, 1998):

$$\text{Chla (mg m}^{-2}\text{)} = 10.928 \left(\frac{R_{800}}{R_{680}} \right)^{1.7691}$$

Cult.	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	1758.44 ± 1189.2	804.126 ± 287.94	530.983 ± 55.7012	427.299 ± 161.71
MM	2768.68 ± 423.39	860.440 ± 788.69	1004.28 ± 79.7707	315.935 ± 81.391
PB	2770.44 ± 284.10	2362.54 ± 1230.9	934.749 ± 135.667	551.984 ± 204.08
PR	2273.42 ± 158.29	923.030 ± 398.61	1168.93 ± 46.4097	1069.54 ± 488.91
QB	2403.34 ± 418.22	947.832 ± 233.64	923.585 ± 37.8432	996.725 ± 365.59
QR	884.211 ± 156.29	1246.36 ± 402.08	830.581 ± 45.7022	1128.02 ± 122.83

CONTENIDO DE CLOROFILA *b* (Blackburn, 1998):

$$\text{Chlb (mg m}^{-2}\text{)} = 9.1047 \left(\frac{R_{800}}{R_{635}} \right)^{1.6099}$$

Cult.	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	454.646 ± 264.05	278.070 ± 81.970	253.857 ± 15.259	164.310 ± 47.658
MM	663.842 ± 56.607	293.623 ± 212.15	333.050 ± 16.113	164.539 ± 45.038
PB	758.898 ± 74.003	594.800 ± 206.13	345.998 ± 40.989	216.003 ± 58.260
PR	634.497 ± 37.890	353.637 ± 130.71	403.484 ± 16.328	353.654 ± 116.21
QB	624.669 ± 59.657	245.324 ± 45.504	274.638 ± 7.4043	264.276 ± 87.642
QR	328.596 ± 30.426	265.814 ± 75.567	214.316 ± 10.424	302.987 ± 22.980

ÍNDICE DE LA RAZÓN SIMPLE DEL BORDE ROJO

$$\frac{R_{800}}{R_{720}}$$

Cult.	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	2.1031 ± 0.3336	2.022 ± 0.1095	1.8900 ± 0.0238	1.7600 ± 0.1321
MM	2.4263 ± 0.0627	1.9981 ± 0.2450	1.9428 ± 0.0805	1.9345 ± 0.1263
PB	2.3270 ± 0.1241	1.9792 ± 0.0598	1.9373 ± 0.0338	1.6175 ± 0.0549
PR	2.2779 ± 0.0721	1.9065 ± 0.0685	1.8430 ± 0.0179	1.7079 ± 0.0734
QB	2.3128 ± 0.0698	1.6198 ± 0.0836	1.6860 ± 0.0100	1.6040 ± 0.0920
QR	1.9818 ± 0.0395	1.6219 ± 0.0741	1.5737 ± 0.0266	1.7207 ± 0.0211

ÍNDICE DE DIFERENCIA NORMALIZADA DEL BORDE ROJO

$$\frac{R_{800} - R_{720}}{R_{800} + R_{720}}$$

Cult.	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	0.3474 ± 0.0749	0.3373 ± 0.0240	0.3079 ± 0.0057	0.2737 ± 0.0245
MM	0.4161 ± 0.0104	0.3283 ± 0.0562	0.3432 ± 0.0023	0.3172 ± 0.0288
PB	0.3980 ± 0.0222	0.3284 ± 0.0131	0.3190 ± 0.0078	0.2356 ± 0.0162
PR	0.3896 ± 0.0134	0.3115 ± 0.0162	0.2965 ± 0.0045	0.2609 ± 0.0197
QB	0.3960 ± 0.0130	0.2358 ± 0.0249	0.2554 ± 0.0027	0.2310 ± 0.0270
QR	0.3291 ± 0.0395	0.2344 ± 0.0245	0.2477 ± 0.0493	0.2649 ± 0.0057

ÍNDICE DE CLOROFILA DEL BORDE ROJO (Gitelson & Solovchenko, 2017)

$$RE = \frac{R_{800}}{R_{720}} - 1$$

Cult.	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	1.1850 ± 0.2888	1.0221 ± 0.1095	0.8900 ± 0.0238	0.7595 ± 0.1320
MM	1.4131 ± 0.1223	0.9981 ± 0.2450	1.0453 ± 0.0108	0.9345 ± 0.1263
PB	1.3522 ± 0.1562	0.9793 ± 0.0598	0.9373 ± 0.0098	0.6175 ± 0.0549
PR	1.2873 ± 0.0897	0.9065 ± 0.0685	0.8430 ± 0.0179	0.6882 ± 0.0831
QB	1.3294 ± 0.0815	0.6198 ± 0.0836	0.6860 ± 0.0098	0.6046 ± 0.0926
QR	0.9395 ± 0.1362	0.6151 ± 0.0831	0.5737 ± 0.0266	0.7207 ± 0.0211

CONTENIDO DE CLOROFILA CON ÍNDICE DE CLOROFILA DEL BORDE ROJO
(Gitelson & Solovchenko, 2017):

$$\text{Chl } (\mu\text{g cm}^{-2}) = 43.578 \text{ CI}_{RE} + 0.81$$

Cult.	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	41.7853 ± 9.9870	36.9262 ± 3.8409	31.5804 ± 0.8215	27.0856 ± 4.5659
MM	49.6734 ± 4.2289	35.3237 ± 8.4700	36.9544 ± 0.3723	33.1214 ± 4.3659
PB	47.5658 ± 5.3994	34.6704 ± 2.0668	33.2209 ± 1.1698	22.1606 ± 1.8968
PR	45.3218 ± 3.1012	32.561 ± 2.3418	29.9597 ± 0.6200	25.2859 ± 2.5380
QB	46.7791 ± 2.8162	22.2397 ± 2.8890	24.5289 ± 0.3378	21.6950 ± 3.1800
QR	34.8167 ± 6.6675	22.0783 ± 2.8729	20.6475 ± 0.9202	25.7307 ± 0.7281

ÍNDICE DEL CONTENIDO DE CLOROFILA MDRI (Sun et al., 2021)

(Modified Difference Ratio Index)

$$\text{MDRI} = \frac{R_{720} - R_{761}}{R_{720} - R_{672}}$$

En la tabla no se ha tomado en cuenta el signo negativo que resulta de la diferencia
($R_{720} - R_{761}$)

Cult.	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	1.2462 ± 0.2692	1.2166 ± 0.0522	1.0915 ± 0.0419	0.8997 ± 0.1373
MM	1.5243 ± 0.0591	1.3471 ± 0.3176	1.1660 ± 0.0179	1.2266 ± 0.1810
PB	1.4183 ± 0.1322	1.0578 ± 0.0435	1.0722 ± 0.0255	0.7122 ± 0.0389
PR	1.3735 ± 0.0738	1.0995 ± 0.1437	1.9242 ± 0.0209	0.7743 ± 0.0567
QB	1.4087 ± 0.0625	0.6993 ± 0.0781	0.7612 ± 0.0091	0.6330 ± 0.0958
QR	1.1127 ± 0.0533	0.6796 ± 0.778	0.6248 ± 0.0281	0.7619 ± 0.0291

}

CONTENIDO DE CLOROFILA RELACIONADO AL ÍNDICE MDRI (Sun et al., 2021)

$$\text{MDRI}(\mu\text{g cm}^{-2}) = -60.468 (-\text{MDRI}) + 0.785, \text{ RMSE} = 6.72(\mu\text{g cm}^{-2})$$

(El signo negativo en MDRI se debe el haber tomado la diferencia del numerador como

$$(R_{761} - R_{720})$$

Cult.	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	76.1411 ± 16.278	74.3524 ± 5.5720	66.7859 ± 2.5319	55.1894 ± 8.3012
MM	92.9552 ± 3.5710	82.2435 ± 19.204	71.2926 ± 1.0823	74.9572 ± 10.945
PB	86.5453 ± 7.9966	64.7472 ± 2.6296	65.6172 ± 1.5425	43.8501 ± 2.3525
PR	83.8396 ± 4.4612	67.2708 ± 8,6873	57.2711 ± 1.2655	47.6028 ± 3.4294
QB	85.9647 ± 3.7803	43.0713 ± 4.7241	45.1617 ± 3.6157	39.0603 ± 5.7942
QR	68.0690 ± 3.2206	41.8780 ± 4.7027	38.5644 ± 1.7006	46.8556 ± 1.7592

ÍNDICE DEL CONTENIDO DE CLOROFILA SunDatt (Sun et al., 2021)

$$\text{Datt} = \frac{R_{850} - R_{710}}{R_{850} - R_{680}}$$

Cult.	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	1.2462 ± 0.2692	1.2166 ± 0.0522	1.0915 ± 0.0419	0.8997 ± 0.1373
MM	1.5243 ± 0.0591	1.3471 ± 0.3176	1.1660 ± 0.0179	1.2266 ± 0.1810
PB	1.4183 ± 0.1322	1.0578 ± 0.0435	1.0722 ± 0.0255	0.7122 ± 0.0389
PR	1.3735 ± 0.0738	1.0995 ± 0.1437	1.9242 ± 0.0209	0.7743 ± 0.0567
QB	1.4087 ± 0.0625	0.6993 ± 0.0781	0.7612 ± 0.0091	0.6330 ± 0.0958
QR	1.1127 ± 0.0533	0.6796 ± 0.778	0.6248 ± 0.0281	0.7619 ± 0.0291

CONTENIDO DE CLOROFILA RELACIONADO AL ÍNDICE SunDatt (Sun et al., 2021)

$$\text{SunDatt}(\mu\text{g cm}^{-2}) = 4.055e^{3.754 \text{ Datt}}$$

Cult.	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	69.3342 ± 11.080	66.9108 ± 4.2591	64.9062 ± 1.8704	57.6324 ± 6.5315
MM	80.2473 ± 2.1931	67.9945 ± 7.8308	69.2733 ± 0.8539	71.7948 ± 8.4709
PB	76.4238 ± 5.1728	67.9945 ± 2.1888	63.9951 ± 1.3019	47.8545 ± 2.6690
PR	74.9982 ± 2.9230	61.1637 ± 2.6055	58.4324 ± 0.9224	50.7033 ± 3.0682
QB	73.9262 ± 10.114	42.7390 ± 3.9299	48.8934 ± 0.4987	43.7090 ± 5.3374
QR	64.5510 ± 2.7052	41.0321 ± 4.5230	41.8228 ± 1.5043	50.4197 ± 2.1035

ANEXO C.

RESULTADOS DE LOS ÍNDICES ESPECTRALES DEL CONTENIDO DE AGUA

INDICE ESPECTRALES DE CONTENIDO DE AGUA Y LA RELACIÓN CON PARÁMETROS DE DIVERSOS MEDIDAS DE CONTENIDO DE AGUA

INDICE ESPECTRAL DE RAZÓN SIMPLE DE CONTENIDO DE AGUA DE HOJAS FRESCAS, (Inoue et al., 1993)

$$\text{Inoue}_{1200-1430} = \text{SR}_{1200-1430} = \frac{R_{1200}}{R_{1430}}$$

Cult.	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	4.8918 ± 1.4333	5.7473 ± 0.7783	4.8662 ± 0.2569	4.1142 ± 0.2793
MM	8.0335 ± 1.6018	5.6052 ± 1.1211	5.8196 ± 0.0839	4.2549 ± 0.5168
PP	5.5148 ± 0.1647	7.4869 ± 1.5273	8.1247 ± 0.4968	4.5723 ± 0.5091
PR	5.6887 ± 0.2192	5.5494 ± 0.4013	6.3080 ± 0.1517	6.4557 ± 0.1788
QB	5.3592 ± 0.5042	6.3055 ± 0.6872	7.5810 ± 0.1936	6.7223 ± 0.1700
QR	3.5314 ± 1.0270	7.2183 ± 0.1828	8.2854 ± 0.1797	7.7910 ± 0.4791

CONTENIDO DE AGUA (WC) USANDO EL ÍNDICE ESPECTRAL (Inoue et al., 1993)

$$\text{SR}_{1200-1430} = \frac{R_{1200}}{R_{1430}} = 0.129 \text{ WC} + 0.995, \quad \text{WC} = (\text{SR}_{1200-1430} - 0.995)/0.129$$

Cult.	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	30.2078 ± 11.1108	36.8392 ± 6.0331	30.0095 ± 1.9915	24.1801 ± 2.1654
MM	54.5622 ± 12.4172	35.7380 ± 8.6909	37.4000 ± 0.6500	25.2704 ± 4.0063
PB	35.0373 ± 1.27663	50.3247 ± 11.840	55.2689 ± 3.8510	27.7302 ± 3.9468
PR	35.9650 ± 2.01426	35.3054 ± 3.1107	41.1858 ± 1.1756	42.3309 ± 9.1376
QB	31.4588 ± 2.28724	41.1666 ± 5.3270	51.0540 ± 1.5009	44.3977 ± 1.3178
QR	19.6621 ± 7.92126	48.2427 ± 1.4172	56.5151 ± 1.3930	52.6822 ± 3.713067

INDICE DE LA RAZÓN SIMPLE DE CONTENIDO DE AGUA , (INOUE et al., 1993)

$$SR_{800-1650} = \frac{R_{800}}{R_{1650}}$$

Cult.	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	2.1244 ± 0.4813	2.0512 ± 0.1923	1.7899 ± 0.0343	1.5622 ± 0.0724
MM	2.8865 ± 0.2319	2.1110 ± 0.1049	1.8622 ± 0.0310	1.6537 ± 0.0958
PB	2.3676 ± 0.1207	2.4495 ± 0.2283	2.4298 ± 0.0311	1.7621 ± 0.1119
PR	2.3661 ± 0.0993	2.1762 ± 0.2527	1.9866 ± 0.0154	2.0293 ± 0.1367
QB	2.3273 ± 0.0809	2.1981 ± 0.2614	2.2966 ± 0.0334	2.0072 ± 0.0877
QR	2.2403 ± 0.2628	2.4276 ± 0.0660	2.3095 ± 0.0428	2.1389 ± 0.0694

CONTENIDO DE AGUA (WC) USANDO EL ÍNDICE ESPECTRAL (Inoue et al., 1993)

$$WC = \frac{FM - DM}{A} \quad (\text{gr cm}^{-2})$$

$$SR_{800-1650} = \frac{R_{800}}{R_{1650}} = 0.0235 WC + 1.076, \quad WC = (SR_{800-1650} - 1.076)/0.0235$$

Cult.	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	44.6136 ± 20.4826	41.6605 ± 8.0139	30.3794 ± 1.4579	20.6907 ± 3.0795
MM	76.1907 ± 9.11645	43.4354 ± 4.4578	33.4558 ± 1.3210	24.5815 ± 4.0773
PB	55.2614 ± 5.33373	54.9624 ± 6.7441	57.6062 ± 1.3229	29.1970 ± 4.7619
PR	55.4470 ± 4.90038	46.8635 ± 10.799	38.7470 ± 0.6567	40.5672 ± 5.8148
QB	53.2599 ± 3.44377	47.6120 ± 10.977	51.9418 ± 1.4196	39.6266 ± 3.7334
QR	49.7229 ± 11.1495	57.1941 ± 2.4474	52.4905 ± 1.8189	45.2296 ± 5.8148

ÍNDICE ESPECTRAL DEL CONTENIDO DE AGUA (Datt., 1999)

$$Datt1 = \frac{R_{850} - R_{1788}}{R_{850} - R_{1928}}$$

Cult.	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	0.6508 ± 0.0656	0.6511 ± 0.0465	0.6139 ± 0.0158	0.5666 ± 0.0359
MM	0.7406 ± 0.0296	0.6851 ± 0.0383	0.6215 ± 0.0155	0.5631 ± 0.0446
PB	0.6941 ± 0.0427	0.7151 ± 0.0336	0.7285 ± 0.0192	0.5512 ± 0.1015
PR	0.6671 ± 0.0300	0.6968 ± 0.0924	0.6435 ± 0.0084	0.7840 ± 0.1565
QB	0.7060 ± 0.1223	0.6780 ± 0.0465	0.7069 ± 0.0173	0.6413 ± 0.0457
QR	0.8425 ± 0.8371	0.7100 ± 0.0159	0.7000 ± 0.0095	0.7005 ± 0.0742

ESPESOR EQUIVALENTE DE AGUA (EWT) RELACIONADO AL ÍNDICE ESPECTRAL DEL CONTENIDO DE (Datt., 1999)

$$EWT1 = 0.045 \frac{R_{850} - R_{1788}}{R_{850} - R_{1928}} - 0.014 = \frac{FM - DW}{\rho_w A}$$

Cult.	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	0.0153 ± 0.0030	0.0153 ± 0.0031	0.0136 ± 0.0007	0.0115 ± 0.0016
MM	0.0193 ± 0.0013	0.0168 ± 0.0017	0.0140 ± 0.0007	0.0113 ± 0.0020
PB	0.0172 ± 0.0019	0.0182 ± 0.0015	0.0188 ± 0.0009	0.0108 ± 0.0046
PR	0.0160 ± 0.0014	0.0174 ± 0.0042	0.0150 ± 0.0004	0.0213 ± 0.0070
QB	0.0178 ± 0.0055	0.0165 ± 0.0021	0.0178 ± 0.0008	0.0149 ± 0.0021
QR	0.0239 ± 0.0377	0.0179 ± 0.0007	0.0175 ± 0.0004	0.0175 ± 0.0033

ÍNDICE ESPECTRAL DEL CONTENIDO DE AGUA (Datt., 1999)

$$Datt2 = \frac{R_{850} - R_{2218}}{R_{850} - R_{1928}}$$

Cult.	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	0.8530 ± 0.0294	0.8426 ± 0.0343	0.8196 ± 0.0277	0.8129 ± 0.0293
MM	0.8632 ± 0.0247	0.8739 ± 0.0207	0.8247 ± 0.0185	0.7994 ± 0.0438
PB	0.8746 ± 0.0433	0.8695 ± 0.0198	0.9058 ± 0.0162	0.7619 ± 0.1036
PR	0.8502 ± 0.0327	0.8718 ± 0.0296	0.8379 ± 0.0073	0.8237 ± 0.0634
QB	0.8631 ± 0.0850	0.8600 ± 0.0217	0.8800 ± 0.0165	0.8356 ± 0.0446
QR	1.0990 ± 1.1896	0.8738 ± 0.0120	0.8669 ± 0.0086	0.8686 ± 0.0264

CONTENIDO DE AGUA CON INDICE Datt (Datt., 1999)

$$EWT2 = 0.080 \frac{R_{850} - R_{2218}}{R_{850} - R_{1928}} - 0.052 = \frac{FM - DW}{\rho_w A}$$

Cult.	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	0.0162 ± 0.0024	0.0154 ± 0.0027	0.0136 ± 0.0022	0.0130 ± 0.0023
MM	0.0171 ± 0.0247	0.0179 ± 0.0207	0.0140 ± 0.0015	0.0120 ± 0.0035
PB	0.0180 ± 0.0035	0.0176 ± 0.0016	0.0205 ± 0.0013	0.0090 ± 0.0081
PR	0.0160 ± 0.0327	0.0177 ± 0.0296	0.0150 ± 0.0006	0.0139 ± 0.0051
QB	0.0170 ± 0.0068	0.0168 ± 0.0017	0.0184 ± 0.0013	0.0149 ± 0.0036
QR	0.0359 ± 1.1896	0.0179 ± 0.0120	0.0174 ± 0.0007	0.0175 ± 0.0021

INDICE ESPECTRAL DE RAZÓN SIMPLE DE CONTENIDO DE AGUA DE
HOJAS FRESCAS

$$WI = \frac{R_{900}}{R_{970}}$$

Cult.	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	1.0751 ± 0.0274	1.0590 ± 0.0119	1.0751 ± 0.0274	0.9967 ± 0.0044
MM	1.1207 ± 0.0155	1.0619 ± 0.0095	1.1207 ± 0.0155	1.0062 ± 0.0079
PB	1.0987 ± 0.0117	1.0775 ± 0.0154	1.0987 ± 0.0117	1.0230 ± 0.0067
PR	1.0985 ± 0.0109	1.0760 ± 0.0357	1.0985 ± 0.0109	1.0285 ± 0.0096
QB	1.0959 ± 0.0130	1.0702 ± 0.0215	1.0877 ± 0.0063	1.0237 ± 0.0099
QR	1.0719 ± 0.0227	1.0902 ± 0.0034	1.0719 ± 0.0227	1.0389 ± 0.0063

CONTENIDO DE AGUA FMC DE HOJAS FRESCAS USANDO EL ÍNDICE DE
AGUA WI (Danson y Bowyer, 2004)

$$WI = \frac{R_{900}}{R_{970}} = 0.93(\text{FMC}\%)^2, \text{ FMC} = \sqrt{\frac{WI}{0.93}}$$

Cult.	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	1.0751 ± 0.0138	1.0671 ± 0.0060	1.0459 ± 0.0029	1.0352 ± 0.0023
MM	1.0977 ± 0.0076	1.0686 ± 0.0048	1.0441 ± 0.0006	1.0402 ± 0.0041
PB	1.0869 ± 0.0058	1.0698 ± 0.0036	1.0732 ± 0.0006	1.0488 ± 0.0034
PR	1.0868 ± 0.0054	1.0755 ± 0.0178	1.0585 ± 0.0016	1.0516 ± 0.0049
QB	1.0855 ± 0.0064	1.0727 ± 0.0108	1.0681 ± 0.0010	1.0492 ± 0.0051
QR	1.0735 ± 0.0113	1.0827 ± 0.0018	1.0687 ± 0.0022	1.0569 ± 0.0032

INDICE ESPECTRAL DE LA RAZÓN MSI DE CONTENIDO DE AGUA DE
HOJAS FRESCAS, (MSI = $\frac{R_{1600}}{R_{820}}$)

Cult.	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	0.4469 ± 0.1267	0.4469 ± 0.1267	0.4857 ± 0.0115	0.5700 ± 0.0276
MM	0.2975 ± 0.0271	0.2975 ± 0.0271	0.4615 ± 0.0081	0.5381 ± 0.0355
PB	0.3734 ± 0.0201	0.3734 ± 0.0201	0.3486 ± 0.0042	0.5043 ± 0.0392
PR	0.3716 ± 0.0158	0.3712 ± 0.0158	0.4366 ± 0.0040	0.4279 ± 0.0334
QB	0.3855 ± 0.0125	0.3855 ± 0.0125	0.3727 ± 0.0062	0.4280 ± 0.0173
QR	0.4028 ± 0.0481	0.4028 ± 0.0481	0.3683 ± 0.0071	0.4000 ± 0.0115

CONTENIDO DE AGUA EWT CON LA RAZÓN MSI

$$EWT = \left(\frac{MSI}{0.22} \right)^{1/0.24}$$

Cult.	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	31.0528 ± 0.0138	19.5311 ± 0.0060	27.2004 ± 2.6329	53.8103 ± 10.037
MM	3.5702 ± 0.0076	13.7761 ± 0.0048	21.9618 ± 1.5523	43.2242 ± 11.953
PB	9.6559 ± 0.0058	7.6263 ± 0.0036	6.8109 ± 0.3407	29.4090 ± 4.0673
PR	8.7198 ± 0.0054	13.4694 ± 0.0178	17.3999 ± 0.6550	17.6026 ± 5.5830
QB	9.6158 ± 0.0064	10.8445 ± 0.0108	9.0117 ± 0.6131	16.6409 ± 1.3908
QR	14.6154 ± 0.0113	7.5367 ± 0.0018	8.5786 ± 0.6528	12.4629 ± 1.4207

INDICE DE AGUA DE DIFERENCIA NORMALIZADA

$$NDWI = \frac{R_{860} - R_{12400}}{R_{860} + R_{1240}}$$

Cult.	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	0.0867 ± 0.0564	0.0588 ± 0.0141	0.0316 ± 0.0038	-0.0054 ± 0.0060
MM	0.1413 ± 0.0301	0.0585 ± 0.0137	0.0265 ± 0.0075	-0.0060 ± 0.0083
PB	0.1155 ± 0.0295	0.0984 ± 0.0233	0.0842 ± 0.0047	0.0207 ± 0.0246
PR	0.0994 ± 0.0333	0.0802 ± 0.0345	0.0558 ± 0.0040	0.0379 ± 0.0113
QB	0.1207 ± 0.0459	0.0777 ± 0.0401	0.0783 ± 0.0027	0.0294 ± 0.0133
QR	0.1386 ± 0.0409	0.0970 ± 0.0065	0.0685 ± 0.0036	0.0463 ± 0.0102

CONTENIDO DE AGUA EWT CON EL ÍNDICE DE AGUA DE DIFERENCIA NORMALIZADA

$$EWT = \left(\frac{NDWI}{0.82} \right)^{1/0.73}$$

Cult.	17-02-2020	24-02-2020	02-03-2020	09-03-2020
MB	0.0518 ± 0.0378	0.0275 ± 0.0089	0.0116 ± 0.0019	0.0016 ± 0.0011
MM	0.0909 ± 0.0276	0.0272 ± 0.0088	0.0092 ± 0.0038	0.0019 ± 0.0023
PB	0.0694 ± 0.0232	0.0555 ± 0.0189	0.0443 ± 0.0034	0.0110 ± 0.0067
PR	0.0571 ± 0.0262	0.0434 ± 0.0241	0.0252 ± 0.0025	0.0152 ± 0.0058
QB	0.0748 ± 0.0418	0.0423 ± 0.0288	0.0401 ± 0.0019	0.0110 ± 0.0074
QR	0.0900 ± 0.0344	0.0538 ± 0.0049	0.0335 ± 0.0024	0.0197 ± 0.0059