



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
Departamento de Ingeniería Comercial

**EVALUACIÓN DE FERTILIZACIÓN SITIO-
ESPECIFICA PARA CULTIVOS DE KIWI MEDIANTE
IMÁGENES SATELITALES**

José Manuel Lillo Prieto
INGENIERIA COMERCIAL

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
Departamento de Ingeniería Comercial



EVALUACIÓN DE FERTILIZACIÓN SITIO- ESPECIFICA PARA CULTIVO DE KIWI MEDIANTE IMAGENES SATELITALES

Tesis presentada por

Jose Manuel Lillo Prieto

Como requisito para optar al Título de

INGENIERO COMERCIAL

Profesor Guía: Rodrigo Ortega Blu

Profesor correferente interno: Luis Acosta

Profesor correferente externo: Hugo Poblete Herrera

Agradecimientos

Quisiera agradecer a las personas que me han apoyado durante el proceso de realización de esta memoria. Aquí se busca plasmar parte de todo lo que he aprendido en mi corta vida universitaria y eso es solo gracias a mi familia, especialmente mis padres, también amigos y profesores. Mención especial a mi mamá Carolina y mi papá Rodrigo. Al profesor Rodrigo Ortega por su disposición a colaborar en todo momento, sin él jamás podría haber realizado este trabajo, y a mi prima Valentina por prestarme su computador. Todas las personas que me rodean y me entregan su cariño día a día son importantes para mí, sin ellos jamás podría haber logrado nada de lo que he hecho hasta ahora.

Resumen Ejecutivo

La agricultura de precisión es una rama de la agricultura que busca la optimización y eficiencia de los procesos productivos mediante diversos métodos, tales como el manejo sitio-específico de los cultivos. En este estudio se analizó la factibilidad de llevar a cabo un manejo de fertilización sitio-específica para el cultivo de kiwi a través de información obtenida mediante imágenes satelitales, específicamente con información del índice vegetacional NDVI. Para cumplir con los objetivos se llevó a cabo una metodología específica desde la obtención de la información, el análisis de los datos de suelo y el análisis económico. Para ello se utilizaron distintos programas de software. El beneficio económico de la aplicación variable de fertilizantes en base a un NDVI satelital dependió del cuartel estudiado. Esto se debe a la variabilidad de las propiedades de cada cuartel o a que el NDVI no es un buen estimador de la variabilidad en la fertilidad de los suelos. La optimización en el uso de fertilizantes podrían implicar una mayor eficiencia productiva y ambiental, además de una mayor utilidad para la empresa que gestiona dichos cultivos utilizados para el presente estudio. El estudio servirá como base para mayores estudios en el uso de imágenes satelitales para el manejo sitio-específico de la fertilización.

Índice

1.Introducción.....	6
1.1Introducción	
1.2Estado del arte.....	7
1.3Hipótesis y objetivos	8
2.Materiales y métodos	8
2.1 Obtención de las imágenes NDVI y capa ráster con datos del suelo	9
2.2 Interpolación de la capa NDVI	11
2.3 Clasificación y medición del área de las zonas.....	13
2.4 Cruzamiento de los datos del suelo con la capa NDVI interpolada	14
2.5 Calculo dosis de fertilizantes.....	15
2.6 Producción en zonas clasificadas.....	16
2.7 Flujo de caja y beneficio de la zonificación	17
3.Resultados.....	20
3.1 Clasificación y medición del área de las zonas	20
3.2 Cruzamiento de los datos del suelo con la capa NDVI interpolada	21
3.3 Calculo dosis de fertilizantes	24
3.4 Producción en zonas clasificadas	25
3.5 Flujo de caja y beneficio de la zonificación	26
3.6 Indicadores de eficiencia.....	30
3.7 Análisis variable	32
4. Conclusiones	33
5.Bibliografía	35

INTRODUCCIÓN

Desde los inicios la agricultura se ha reconocido que existe variabilidad en los factores que determinan los rendimientos y la calidad de la cosecha dentro de un cuartel, ya sean los nutrientes del suelo, la humedad, la temperatura, elevación, entre otros. Sin embargo hasta mediados de la década de los noventa, si bien se sabía que existía la variabilidad dentro de un cuartel productivo esta no se tomaba en cuenta a la hora de administrar los recursos ya que no había forma una forma eficiente de medir esta, por lo que un cuartel era considerado una sola unidad productiva donde los manejos utilizados para gestionar los recursos corresponden a los promedios o la mediana de las cantidades de los elementos cuantificables simulando que existe una distribución normal en las cantidades de dichos factores. Hoy en día gracias a las tecnologías de información es posible medir la variabilidad gracias a la agricultura de precisión.

La agricultura de precisión consiste en el uso de los datos y la información para gestionar de manera óptima los recursos en un cuartel productivo gracias a que se puede medir la variabilidad de los factores, de manera que es posible utilizar los recursos en cantidad, momento y en el lugar exacto (García y Flego, 2008).

Una de las aplicaciones de la agricultura de precisión es el manejo sitio-específico de los cuarteles de cultivo a partir de la clasificación de zonas dentro de este para atender los requerimientos de cada una de estas como si fueran cuarteles individuales. De esta manera se busca mejorar la producción de los cultivos, ya que al recibir las cantidades necesarias de insumos se asegura que cada zona obtenga las dosis demandadas para aprovechar al máximo el potencial de rendimiento del cultivo. En cambio, si se usa la misma cantidad de insumos en todo el cuartel, algunas zonas quedan en déficit respecto a lo requerido para maximizar la producción. Por otro lado, en el manejo uniforme de los cuarteles también puede que algunas zonas reciban más insumos de los necesarios en relación a las características de ese sitio, entonces se genera un excedente para esas zonas, lo que al final es un desperdicio y afecta de manera negativa a la eficiencia de los cultivos, ya sea económicamente, por el desperdicio de un insumo, técnicamente por no disminuir la calidad del producto, y por último ambientalmente, por un mayor riesgo de contaminación del agua con, particularmente con nitrógeno y fósforo.

Existen muchos estudios que respaldan el uso del manejo sitio-específico por sobre el uniforme, sin embargo, es un desafío para la agricultura encontrar aún más aplicaciones para este método y seguir optimizando la producción de los cultivos. La adecuada estimación de manera simple y efectiva de la variabilidad espacial es clave para realizar manejo sitio-específico. El uso de índices vegetacionales como el NDVI permiten definir las zonas de

manejo, pero existe poca información respecto de la utilidad de esta tecnología para realizar un manejo variable de la fertilización.

Estado del arte

En Chile la agricultura de precisión se hizo presente en la industria en la década de los 90, principalmente en la producción de frutales y cultivos vitivinícolas. La consideración de la variabilidad espacial mostró resultados positivos lo que generó que con el paso del tiempo y gracias a la constante investigación por parte de distintas instituciones el uso de las tecnologías de la información se expandiera a otras áreas de la agricultura como los cultivos industriales de cereales. En general la aparición de la agricultura de precisión generó un aumento en la eficiencia (Odepa, 2009).

Existen distintas herramientas para poder medir la variabilidad en un cuartel productivo. Entre estas herramientas se encuentra el uso de imágenes satelitales y el muestreo del suelo. El uso de imágenes satelitales y su manejo dentro de los sistemas de información geográfica (GIS), permite, por ejemplo, conocer los rendimientos, la humedad y el vigor de los cultivos en cada zona del cuartel. Por otro lado, el muestreo del suelo con datos obtenidos a través de sensores nos permite conocer la composición física-química del suelo en cada sector del cuartel.

Estas herramientas permiten trabajar los cultivos de manera sitio-específica, esto es dividir el cuartel en varias zonas y trabajar cada una de éstas de manera distinta según indique la variabilidad, para así optimizar los recursos. Esto se hará siempre y cuando un estudio que avale que gestionar de forma sitio-específica tiene un impacto positivo tanto técnica, económica y ambientalmente superior al de una gestión por promedios.

Existen estudios que demuestran a través de estas herramientas se puede lograr gestionar de manera más eficiente los recursos (Ortega y Flores, 1999). Sin embargo, no existe mucha evidencia del impacto económico de esta metodología para todos los tipos de cultivos y su uso permanente, para ello habría que calcular los costos y beneficios y utilizar una gran cantidad de cuarteles hasta establecer que existe una significancia relevante entre el manejo sitio-específico en la fertilización de los cultivos y la eficiencia de ésta. Generalmente el manejo sitio-específico de los cuarteles en cuanto a la fertilización se asocia a una clasificación tomando como atributos la composición del suelo y los nutrientes que se encuentran en cada sector de este, lo que ha mostrado los resultados más aceptados en cuanto al aumento de la eficiencia. Como consecuencia esto ha llevado a que tanto en los estudios y en la industria relacionada lo más común es zonificar los cuarteles según los muestreos del suelo realizados a través de sensores. Si bien se han estudiado casos donde se respalda la consideración de la variabilidad como un promotor de la eficiencia en cultivo, esto no necesariamente se da en

todos los casos y siempre va a depender de las características del suelo y el cultivo evaluado. Sumado a lo anterior son desconocidos los resultados en cuanto a si existe una relación directa entre la clasificación de los suelos mediante otros atributos y la eficiencia en los cultivos, ya que tomando en consideración otros factores que afectan al rendimiento de los cultivos a la hora de fertilizar se podría llegar a establecer una relación entre la zonificación y la optimización de los lotes productivos (García y Flego,2008).

Hipótesis y objetivos

La hipótesis que se busca probar en este estudio es que una fertilización de corrección sitio-específica clasificando el cuartel a partir del NDVI estimado a través de imágenes satelitales es más eficiente técnica y económicamente que la fertilización uniforme en el cultivo de kiwi.

El objetivo principal del estudio fue evaluar técnica y económicamente el uso de información obtenida desde imágenes satelitales para realizar manejo sitio específico de la fertilización de corrección en huertos de kiwi.

Los objetivos específicos fueron los siguientes:

- Generar zonas de manejo utilizando distintos algoritmos
- Evaluar el efecto del algoritmo de clasificación aplicado a las imágenes NDVI sobre los resultados técnico-económicos de la evaluación.

MATERIALES Y METODOS

Se utilizaron imágenes satelitales Sentinel del programa Copernicus, disponibles gratuitamente (Copernicus,2024). Se estudiaron dos cuarteles pertenecientes a la “Sociedad agrícola la rosa Sofruco S.A”, que se dedica al cultivo de frutales, a la elaboración y venta de alimentos. Ambos cuarteles corresponden a cultivos de kiwi y están ubicados en la comuna de Peumo, región de O’Higgins. Uno de estos cuarteles es llamado “Corte Thompson” que cubre una superficie de 7,72 hectáreas, por otro lado, el cuartel “Lagunillas” utiliza un espacio de 21,9 hectáreas. Junto a las imágenes se utilizaron datos del suelo recolectados a través del sensor de emisión de radiación gamma SoilOptix (SoilOptix,2024).

Se realizó un flujo de caja para la evaluación económica de la aplicación variable de fertilizantes.

La metodología para alcanzar los objetivos del estudio consistió en las siguientes etapas.

1. Obtención de las imágenes NDVI y capa ráster con datos del suelo
2. Interpolación de la capa NDVI
3. Clasificación y medición del área de las zonas
4. Cruzamiento de los datos del suelo con la capa NDVI interpolada
5. Calculo dosis de fertilizantes
6. Producción en zonas clasificadas
7. Flujo de caja y beneficio de la zonificación

1. Obtención de las imágenes NDVI y datos del suelo

Las imágenes satelitales fueron obtenidas a través de el sitio web Copernicus (2024). En este sitio se puede elegir la fecha de las imágenes que se desea obtener y la nubosidad de estas. Las fechas deben ser entre el 15 de enero y 15 de febrero, época de máxima acumulación de biomasa aérea en los cultivos frutales. Cada imagen descargada posee diferentes bandas. Las bandas corresponden a la reflectancia de los objetos en las distintas bandas electromagnéticas. Con estas bandas es posible construir distintos índices de vegetación. Para efectos del estudio se utilizó el índice denominado “índice de vegetación de la diferencia normalizada” (“NDVI”), que se relaciona de manera directa con la biomasa de un cultivo. Para esto se descargaron las bandas 4 y 8, donde la banda 4 corresponde a la banda roja (665 nm) y la banda 8 muestra un espectro cercano al infrarrojo (842 nm). Luego estas imágenes fueron procesadas en el software QGIS v.3.36.1(2024) y se utilizó una herramienta que aplica un algoritmo sobre la imagen que permite obtener la información del NDVI mediante ambas bandas. De esta manera se obtuvo el NDVI sobre el cual se trabajó posteriormente.

El algoritmo utilizado para obtener el NDVI con las bandas mencionadas se explica de la siguiente forma:

$$NDVI = \frac{(Banda8 - Banda4)}{(Banda4 + Banda8)}$$

En la imagen 1 se visualizan los valores de NDVI en bruto, que posteriormente serán utilizados en el análisis

Imagen 1. Imágenes de los cuarteles con NDVI



Corte Thompson



Lagunillas

En cuanto a los datos del suelo, estos fueron obtenidos a través del sensor SoilOptix. Los sensores permiten conocer los niveles de cada nutriente del suelo en cada parte del cultivo. En este caso los datos se procesaron en “QGIS” a través de la herramienta llamada “centroides”, que genera una capa vectorial muestra los datos del suelo en la ubicación correspondiente a través de puntos llamados centroides. Cada centroide representa un área de $9m^2$ y tiene como atributos las concentraciones de nutrientes. Esta herramienta es de mucha utilidad ya que se acerca a la variabilidad exacta del suelo al mostrar una gran cantidad de puntos específicos y sus características, de esta manera será más preciso el manejo sitio-específico de un cuartel. En el cuartel “Corte Thompson” se procesaron 8860 centroides, y en “Lagunillas” 16000 centroides. En la imagen 2 se pueden observar las capas vectoriales de cada cuartel y los respectivos centroides. Para efectos de este estudio, los datos contienen información sobre la presencia de diversos nutrientes, pero solo se utilizaron materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio, ya que son los necesarios para el estudio de la fertilización por zonas.

Imagen 2. Centroides que contienen datos del suelo.



2. Interpolación

La interpolación es una herramienta normalmente sirve para asignar datos a zonas del mapa donde estos no fueron medidos. También se utiliza para hacer coincidir capas de información colectadas en distintas mallas o intensidades de muestreo. Otro uso de la interpolación es cambiar la resolución de una imagen.

En este caso se interpoló el NDVI, a una grilla de 3 x3 m previo a su clasificación en zonas de manejo.

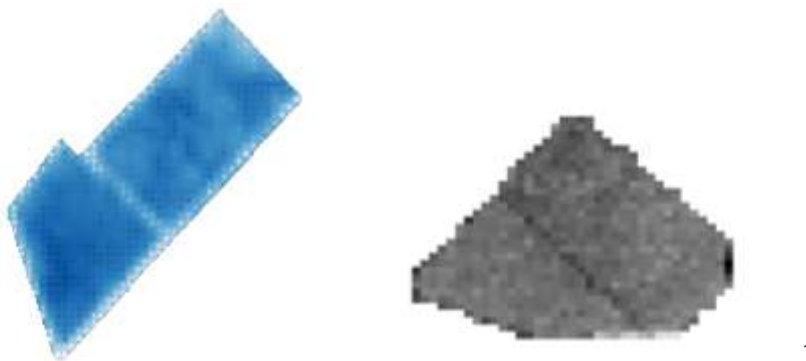
La interpolación se llevó a cabo mediante la herramienta de QGIS “Interpolación IDW”. esta herramienta “genera una interpolación de Distancia Inversa Ponderada (DIP) desde una capa vectorial puntual. Los puntos correspondientes al centroide de cada pixel de la imagen NDVI. Los puntos muestreados son ponderados durante la interpolación de tal manera que la influencia de un punto relativo a otro disminuye con la distancia hacia el punto desconocido que se desea crear”. Entonces a través de esta herramienta y los puntos conocidos se puede estimar el NDVI de todas las zonas de cada cuartel. Por lo tanto, si la imagen sin interpolar nos mostraba un punto con un alto NDVI, se generarán más puntos con un índice alto a las cercanías de este e irá disminuyendo a medida que se encuentras más cerca de un punto con un menor índice.

A continuación, se presenta la base matemática de la interpolación, donde Z es la cantidad de puntos que vamos a sumar a la imagen que contengan valor de NDVI, y “ d ” corresponde a la distancia entre estos puntos. El índice “ p ” corresponde al grado que tendrá el peso obtenido por el inverso de la distancia, utilizándose un grado 2 (distancia inversa al cuadrado)

$$z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{z_i}{d_i^2} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^2} \right)}$$

Una vez interpolada la imagen se clasificó el NDVI de cada cuartel en el software SMS de Ag leader (AGLeader, Techonology,2024). En la imagen 3 se puede apreciar cómo se ven las capas con información NDVI ya interpoladas.

Imagen 3. Imágenes con NDVI interpolados



1

3. Clasificación de las zonas

La clasificación de las zonas es un procedimiento fundamental para el estudio, ya que según como se clasifiquen las zonas en el cuartel, se obtendrán distintos resultados, la concentración de nutrientes promedio dentro de cada zona varía según la clasificación, lo mismo para el promedio de NDVI por zonas. Para este estudio se clasificaron ambos cuarteles bajo 3 distintos algoritmos de clasificación: 1) Puntos iguales, 2) Cortes naturales y 3) espacios iguales. Dicha clasificación fue procesada en el software “SMS” de la empresa “Ag leader”.

Cada uno de estos algoritmos funciona de manera distinta y se ve reflejado en cómo se ven las zonas después de ser aplicados.

Puntos iguales: Este algoritmo genera zonas a partir del conteo de pixeles e interpolación de la imagen según el NDVI y las clasifica según el valor de los puntos y la distancia que hay entre estos. De esta manera obtenemos zonas clasificadas donde en cada una los valores dentro de

¹ Las imágenes han sido procesadas utilizando QGIS 3.32, desarrollado por el QGIS Development Team (2024). 8 de agosto 2024, Santiago de Chile

un rango son similares. De esta forma se puede observar fácilmente cuales son las zonas con un mayor y menor NDVI, lo que beneficia al óptimo manejo sitio-específico del cuartel.

Cortes naturales: Este algoritmo los que busca es que dentro de cada zona exista la menor varianza posible entre los datos mientras que la varianza entre zonas es máxima. En este caso, cada zona posee la menor varianza posibles entre los NDVI de estas. La diferencia con otros algoritmos es que da igual la cantidad de pixeles tenga cada zona y la extensión de los rangos de las zonas. Este algoritmo sirve para resaltar diferencias significativas entre las zonas.

Espacios Iguales: En este algoritmo los rangos de las clases tienen la misma extensión, sin importar la cantidad de espacio que usen dentro del cuartel y la distancia que hay entre los puntos con mayor NDVI. sirve para clasificar datos de manera uniforme, sin embargo, cuando los datos son significativamente variables entre ellos puede que las zonas no expliquen información relevante sobre el atributo que se está estudiando, esto también puede ocurrir si la diferencia entre el valor máximo y el mínimo son muy grandes.

4. Cruzamiento de los datos del suelo con la capa NDVI interpolada

Una vez conseguidos los datos del suelo necesarios para esta evaluación, que en este caso son la disponibilidad de nitrógeno, materia orgánica, fósforo y potasio en el cuartel, obtenido gracias a los centroides procesados en QGIS, fue posible conocer las cantidades promedio de los nutrientes en kg/ha por cada zona clasificada según los distintos métodos de clasificación utilizados. Utilizando el Software QGIS y la herramienta “intersección” se procedió a estimar la fertilidad de los suelos dentro de cada zona obtenida por los distintos algoritmos de interpolación. Conocer los promedios de las concentraciones de nutrientes nos permitió estimar los requerimientos de fertilización de cada zona y así aplicar un manejo sitio-específico de la fertilización. Esto último es posible mediante la función llamada “intersección” de “QGIS”, donde se superpusieron los centroides en la capa vectorial con las zonas definidas importadas de SMS Ag leader. De esta forma se pudo determinar a qué zona le corresponde cada centroide según la clasificación. Con estos datos fue posible conocer los promedios en cuanto a las concentraciones de cada nutriente por cada zona y así posteriormente calcular las dosis requeridas por cada una de estas. Además, mediante esta información es posible conocer que porcentaje de cada lote requiere ser fertilizada, lo que nos podría ser un indicativo de los futuros resultados de la evaluación económica, por ejemplo, si en el cuartel “Lagunillas”, un 90% de esta zona requiere nitrógeno, entonces es probable que la diferencia de costos entre esta clasificación y en el cuartel “Corte Thompson” solo se requiere un 50% sea significativa. Entonces esto debe ser tomado en cuenta a la hora de formular una conclusión de evaluación. El porcentaje del cuartel que requiere de la aplicación de uno de los nutrientes se puede conocer, pues si la cantidad de un nutriente por centroide es mayor al que indica el algoritmo o fórmula para cada nutriente, no se debería aplicar fertilizante en ese punto. En el caso de la fertilización uniforme, el método que se utiliza usualmente es hacer un muestreo aleatorio en distintas partes del cuartel y obtener un

promedio. Generalmente la muestra es tomada físicamente por una persona encargada. En este caso se aprovechó la información de los centroides y se hizo un muestreo aleatorio de 10 puntos, en QGIS, dentro de ambos cuarteles. A dichos puntos se les dio un buffer de aproximadamente 16 m² (diámetro de aproximadamente 4m o 0,00004 grados). Estimaron los promedios de los nutrientes dentro de cada área buffer en cada uno de estos 10 puntos, obteniéndose además un promedio general para el cuartel. Este promedio fue utilizado para estimar cuanto fertilizante se requiere de cada nutriente para llevar a cabo el método de fertilización uniforme.

No se debe aplicar los respectivos fertilizantes si:

K > 250 kg/ha

P > 30 kg/ha

Demanda N ≤ N disponible

.

5. Cálculo de la dosis de fertilizantes

Las dosis de cada fertilizante a ser aplicada en cada una de las zonas clasificadas afectan directamente en los costos del manejo sitio-específico y por esto es determinante a la hora de comparar con el manejo uniforme de los cuarteles. Para conocer dichas dosis es necesario saber cuánto fertilizante se requiere en cada zona, además es necesario conocer las concentraciones de nutrientes en cada producto fertilizante. En la tabla 1 se presenta la composición de los fertilizantes utilizados para este estudio.

Tabla 1. Composición de nutrientes de los fertilizantes utilizados

Fertilizante	Nitrógeno (N)	Fósforo (P ₂ O ₅)	Potasio (K ₂ O)
Urea	46%	0%	0%
Fosfato monoamónico	12%	61%	0%
Cloruro de potasio	0	0	60%

Conocer la composición de los fertilizantes es importante ya que así podemos saber la cantidad exacta que será utilizada de cada uno de estos para suplir las necesidades del suelo.

Para calcular la cantidad nutrientes necesaria, se consideraron los siguientes algoritmos:

Para fósforo:

$$\text{Si } P < 30 \text{ kg/ha, } \frac{(30 - \bar{X}_{zona}) \times 10 \times 2,29}{3} \text{ kg/ha}$$

Para Potasio:

$$\text{Si } K < 250 \text{ kg/ha, } \frac{(250 - \bar{X}_{zona}) \times 1,2 \times 3}{2} \text{ kg/ha}$$

Para Nitrógeno:

$$N = \frac{\text{demanda} - \text{suministro}}{EF} \text{ kg/ha}$$

Para el nitrógeno, la demanda depende de la producción del cultivo, la producción promedio de kiwi por hectárea es de 35 toneladas, sin embargo, para efectos de este estudio se hizo una estimación de la producción por cada zona obtenida de la clasificación basándose en el NDVI de las zonas, en donde a mayor NDVI mayor será la producción. Este rendimiento (ton/ha) debe ser multiplicado por 3 kg N/ton, que corresponde a la demanda de nitrógeno por tonelada de kiwi. Por otro lado, el suministro este compuesto por el nitrógeno disponible en el suelo y el nitrógeno mineralizado por la materia orgánica. Por último, el EF es un coeficiente de eficiencia del nitrógeno, en este caso será de 0,65.

Entonces tenemos que

$$\text{demanda} = \text{producción} \times 3$$

$$\text{suministro} = \text{Nitrogeno disponible} + \text{Nitrogeno mineralizado}$$

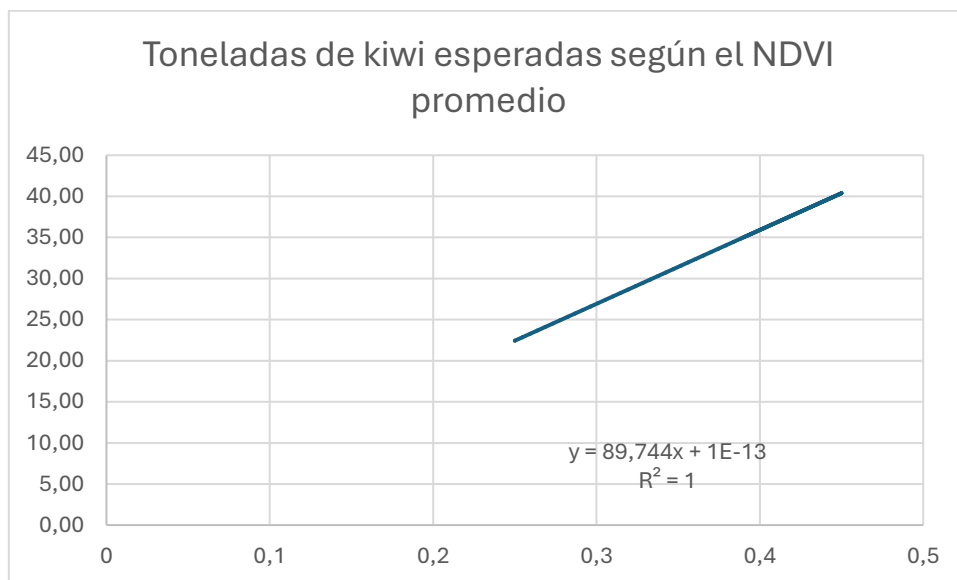
$$EF = 0,65$$

$$\text{Nitrogeno mineralizado} = \frac{\bar{X}_{MO} \times 30}{2} \text{ kg/ha}$$

6. Producción en zonas clasificadas

Como se mencionó anteriormente, la producción promedio de kiwi por hectárea es de 35 toneladas. La cantidad de kiwi producida (rendimiento), además de influir en la cantidad de nitrógeno requerida, también influye en los ingresos dentro del flujo de caja del proyecto relacionado a la exportación de kiwi. Es por ello que se estimó el rendimiento de kiwi en función del NDVI de las zonas anteriormente clasificadas en los cuarteles. La producción en base al NDVI se puede explicar como una función donde el NDVI es la variable independiente y el rendimiento de kiwi es la variable dependiente. Se consideró que el con el NDVI promedio de un cuartel la producción sería también promedio, es decir 35 toneladas/hectárea. Sobre o bajo ese promedio la producción aumenta o disminuye linealmente con el cuartel.

El siguiente gráfico explica la relación establecida para estimar la producción del cultivo tomando como variable independiente el NDVI de las zonas. En el gráfico también se encuentra la expresión matemática que explica dicha relación.



Ya establecida dicha relación entre el rendimiento del cultivo y el NDVI se estimó la producción de cada zona clasificada en ambos cuarteles. Esta información es relevante a la hora de llevar a cabo una evaluación económica del proyecto y además sirve para estimar la demanda de nitrógeno de cada una de las zonas clasificadas para el manejo sitio-específico de ambos cuarteles. Si el promedio de NDVI en las zonas que ocupan más espacio, coincide con que estas zonas tengan un NDVI más alto que el promedio del cuartel, la producción del cultivo será mayor, de lo contrario, si las zonas con menor NDVI que el promedio son las que ocupan

una mayor área, entonces se producirá una menor cantidad respecto al manejo uniforme de los cuarteles.

7. Flujo de caja y beneficio económico del proyecto

Para determinar si la clasificación de zonas a partir de imágenes satelitales es viable económicamente para la fertilización variable de los cuarteles es necesario realizar un flujo de caja y posteriormente medir el beneficio que la inversión genera. La comparación entre los flujos de caja entre el manejo sitio-específico con imágenes y el manejo uniforme únicamente con datos del suelo de los promedios de los cuarteles nos permitiría obtener una conclusión acerca de la factibilidad de llevar a cabo el proyecto. Deben considerarse Ingresos, costos, intereses e impuestos relacionados exclusivamente a la inversión de la fertilización sitio-específica. Se debe tomar en cuenta que el cultivo de kiwis demora entre 11 y 12 meses para poder ser cosechado y estar listo para la exportación, por lo que se consideró el inicial y el 1, que es un año después de iniciar el proyecto. Para el análisis de los ingresos se consideró que el precio de exportación del kiwi durante 2023 fue de \$1311/kg pesos chilenos, según el estudio de mercado de iQonsulting (2023).

El flujo de caja tuvo la siguiente estructura:

$$Utilidad = Ingresos - Costos$$

En donde los ingresos son representados por la exportación de kiwis. Además, en este caso se consideró solicitar un préstamo bancario para financiar los costos en el periodo inicial. Este préstamo tiene una tasa de interés del 9,9%, correspondiente a la tasa de interés de créditos comerciales publicada por el Banco central en julio de 2024 (Banco Central de Chile, 2024). Mientras que los costos fueron separados en costos fijos y variables, donde los costos fijos representan principalmente costos asociados al procesamiento de las imágenes en el software QGIS, toma de muestras y la clasificación de las zonas en el software “SMS” de “Ag leader”, que para cada algoritmo de clasificación, ya sea puntos iguales, cortes naturales o espacios son los mismos costos, solo va a variar para cada cuartel dado el costo de la toma de muestras ya que varía según el tamaño del cuartel. Por otro lado, los costos variables representan la cantidad de cada fertilizante que necesita cada cuartel en las diferentes zonas, este costo varía según los requerimientos de nutrientes en cada zona, la disponibilidad de nutrientes en cada zona y el área de las zonas.

Los costos fijos mencionados consideraron los siguientes valores en sus respectivas unidades de medida

Costos fijos		
ítem	Valor	Unidad
Toma de muestras	\$250.000	Por 4 muestras
Obtención imágenes	\$40.000	Por extracción imagen NDVI
Análisis y clasificación	\$200.000	Por lote

Por otro lado, la descripción de los costos variables:

Costos variables		
Identificación del costo	Valor	Unidad
Urea	\$37.200	25 kg
Fosfato monoamónico	\$109.800	25 kg
Cloruro de potasio	\$82.900	25 kg

La estructura del flujo de caja más detallado finalmente es:

$$Utilidad = (Exportaciones + Financiamiento) - (Costos variables + Costos fijos + Financiamiento)$$

Además del flujo de caja, para poder concluir si efectivamente es económicamente favorable en el cultivo aplicar un manejo sitio-específico a partir de imágenes con NDVI en vez de un manejo uniforme solo a partir de los datos del suelo, debe hacerse una comparación y medir el beneficio de este tomando como base la utilidad que se obtiene fertilizando de manera uniforme. De esta forma será más fácil visualizar los beneficios que se pueden obtener al usar la fertilización por zonas y del tipo de clasificación que implica un mayor beneficio o en su defecto, un mayor costo de oportunidad. El costo de oportunidad estaría explicado por las estimaciones de producción por zona donde se genera una pérdida en el ingreso en comparación al que se alcanza con el manejo uniforme del cultivo.

El beneficio obtenido en el manejo sitio específico con las distintas zonas en comparación al uniforme se puede expresar de la siguiente forma:

$$Beneficio\ obtenido = Utilidad_x - Utilidad_u$$

Donde “ $Utilidad_x$ ” representa la utilidad obtenida en las zonas clasificadas y “ $Utilidad_u$ ” es la utilidad obtenida por el trabajo de manera uniforme en ambos cuarteles.

Con este indicador podemos analizar de una forma más práctica si es factible económicamente o no realizar la inversión asociada al manejo sitio-específico del cultivo, ya que al ver solo en unidades monetarias no sabemos si la cifra es realmente o no significativa para quien ejecuta la inversión.

Una vez obtenidos los indicadores económicos se pudo establecer conclusiones sobre la evaluación del método sitio-específico para la fertilización de cultivos de kiwis mediante imágenes satelitales.

Es importante aclarar que los elementos que forman parte de la evaluación económica, específicamente en el flujo de caja, están relacionados a fertilización sitio-específica, por lo que no se consideran otros de manejo del cultivo de kiwi. Es decir, por ejemplo, costos como el transporte, mano de obra en los cultivos, herramientas, etc., los cultivos se verían constantes en ambos métodos de fertilización, ya que estos son similares en ambos casos (SE o uniforme), por lo que no se consideró relevante para este análisis. Dicho esto, la finalidad de la evaluación económica fue medir exclusivamente el beneficio económico en comparación a la fertilización uniforme y no un resultado sobre la producción de kiwi en general. Es por ello que los indicadores y los beneficios se analizan en base a lo que sería si el cuartel se manejara de manera uniforme, donde el objetivo de la evaluación es conocer “Cuanto se está ahorrando o perdiendo por manejar de manera sitio-especifica la fertilización y no de manera uniforme”.

8. Indicadores de eficiencia

Si bien, el flujo de caja basada en la producción estimada y en los costos de la fertilización nos muestra el beneficio económico de la clasificación de los cuarteles, no sabemos si este beneficio se debe a que la producción estimada es muy alta y no necesariamente por que se esté optimizando el uso de fertilizantes. Dicho esto, se elaboró un indicador que nos muestra el costo de fertilización asociado a la unidad productiva, en este caso kilogramos de kiwi.

Para esto debemos transformar las toneladas de kiwi estimadas por cuartel según su clasificación a kilogramos, y luego dividir esto en el costo total de fertilización, ya sea utilizando la clasificación en cortes naturales, espacios iguales, puntos iguales y también de la fertilización uniforme en el lote.

El indicador entonces se explica de la siguiente forma, donde la letra “c” en el subíndice indica que el costo de la fertilización y la cantidad de kiwi estimados debe ser del mismo algoritmo de clasificación del cuartel (cortes naturales, espacios iguales, puntos iguales, uniforme):

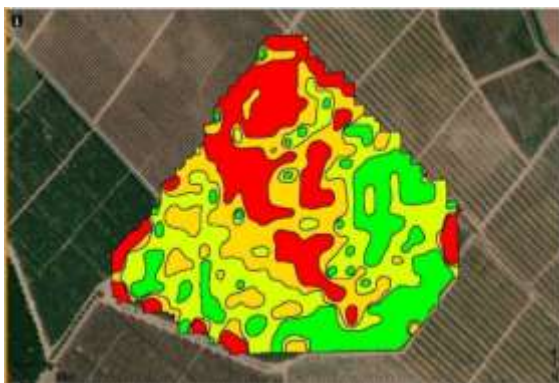
$$\frac{\text{Costo total fertilización}_c}{\text{Kilogramos de kiwi estimados}_c}$$

RESULTADOS

1. Clasificación de las zonas

En las figuras 1,2,3,4,5, y 6 que se muestran a continuación podemos ver los resultados de la clasificación de las zonas para los cuarteles “Corte Thompson y “Lagunillas” bajo los algoritmos de clasificación definidos en la metodología. Estas figuras están acompañadas de una tabla que muestra el área correspondiente de cada zona y el rango de NDVI que representa cada una.

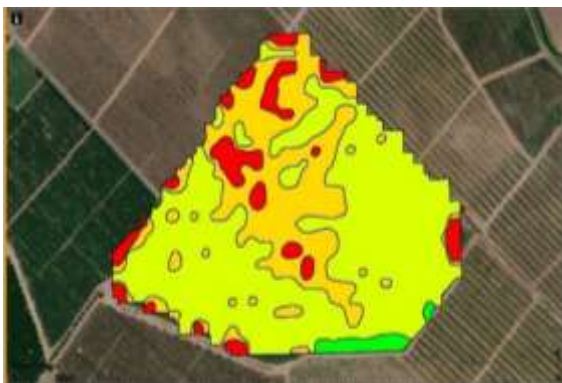
Puntos iguales Lagunillas



Puntos iguales Lagunillas

Color	Enumeración	Rango NDVI	Área
Verde	Zona 1	0,29 - 0,48	4,679 ha
Amarillo	Zona 2	0,28-0,29	6,370 ha
Naranja	Zona 3	0,26-0,28	5,569 ha
Rojo	Zona 4	0,13-0,26	5,259 ha

Figura 1. Clasificación del NDVI por puntos iguales Lagunillas



Cortes naturales Lagunillas

Color	Enumeración	Rango NDVI	Área
Verde	Zona 1	0,34-0,48	0,46 ha
Amarillo	Zona 2	0,27-0,34	13,397 ha
Naranja	Zona 3	0,25-0,27	6,281 ha
Rojo	Zona 4	0,13-0,25	1,829 ha

Figura 2. Clasificación del NDVI por cortes naturales Lagunillas

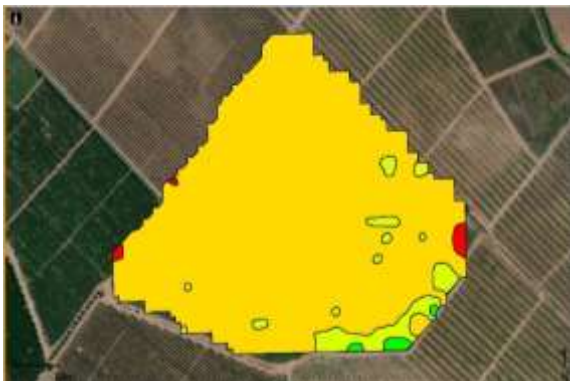
Espacios iguales Lagunillas

Figura 3. Clasificación del NDVI por Espacios iguales Lagunillas

Puntos iguales Corte Thompson

Figura 4. Clasificación del NDVI por Puntos iguales Corte Thompson

Cortes naturales Corte Thompson

Figura 5. Clasificación del NDVI por cortes naturales Corte Thompson

Espacios iguales Lagunillas

Color	Enumeración	Rango NDVI	Área
	Zona 1	0,39-0,48	0,15 ha
	Zona 2	0,30-0,39	1,169 ha
	Zona 3	0,21-0,30	20,482 ha
	Zona 4	0,13-0,21	0,166 ha

Puntos iguales Corte Thompson

Color	Enumeración	Rango NDVI	Área
	Zona 1	0,42-0,49	2,241 ha
	Zona 2	0,35-0,42	4,442 ha
	Zona 3	0,31-0,35	0,748 ha
	Zona 4	0,22-0,31	0,320 ha

Cortes Naturales Corte Thompson

Color	Enumeración	Rango NDVI	Área
	Zona 1	0,42-0,5	5,291 ha
	Zona 2	0,34-0,42	1,626 ha
	Zona 3	0,29-0,34	0,688 ha
	Zona 4	0,22-0,29	0,120 ha

Espacios iguales Corte Thompson



<i>Espacios Iguales Corte Thompson</i>			
Color	Enumeración	Rango NDVI	Área
	Zona 1	0,42-0,5	2,679 ha
	Zona 2	0,35-0,42	3.738 ha
	Zona 3	0,28-0,35	1,144 ha
	Zona 4	0,22-0,28	0,073 ha

Figura 6 Clasificación del NDVI por espacios iguales Corte Thompson

2. Cruzamiento de los datos de fertilidad del suelo con la capa NDVI interpolada

En las tablas 2.1 a 2.6 se muestran las cantidades de cada nutriente en cada zona para cada clasificación y su respectivo cuartel.

Tabla 2. 1. Niveles de fertilidad de suelos por zona para la clasificación de puntos iguales en cuartel Lagunillas.

<i>Puntos iguales Lagunillas</i>				
Color	Enumeración	Nitrógeno	Potasio	Fósforo
	1	64,82	196,28	6,14
	2	66,64	195,88	5,89
	3	67,51	198,26	5,94
	4	69,58	194,99	5,97
	Uniforme	66,90	192,17	5,79

Los valores muestran el promedio en kg/ha

Tabla 2.2. Niveles de fertilidad de suelos por zona para la clasificación de cortes naturales en cuartel Lagunillas

Cortes Naturales lagunillas				
Color	Zona	Nitrógeno	Potasio	Fósforo
	1	65,49	197,25	5,89
	2	66,12	196,50	5,99
	3	68,36	197,43	6,01
	4	71,28	190,68	5,66
	Uniforme	66,90	192,17	5,79

Los valores muestran el promedio en kg/ha

Tabla 2.2. Niveles de fertilidad de suelos por zona para la clasificación de Espacios iguales en cuartel Lagunillas

Espacios iguales Lagunillas				
Color	Enumeración	Nitrógeno	Potasio	Fósforo
	1	67,11	195,11	5,66
	2	63,17	199,26	6,34
	3	67,29	196,27	5,96
	4	67,50	182,31	5,73
	Uniforme	66,90	192,17	5,79

Los valores muestran el promedio en kg/ha

Tabla 2. 3. Niveles de fertilidad de suelos por zona para la clasificación de puntos iguales en cuartel Corte Thompson.

Puntos Iguales Corte Thompson				
Color	Enumeración	Nitrógeno	Potasio	Fósforo
	1	79,55	250,33	23,97
	2	72,31	248,38	24,53
	3	70,00	248,88	27,71
	4	70,12	248,35	29,79
	Uniforme	74,07	247,82	23,02

Los valores muestran el promedio en kg/ha

Tabla 2. 4. Niveles de fertilidad de suelos por zona para la clasificación de Cortes naturales en cuartel Corte Thompson.

Cortes naturales Corte Thompson					
Color	Enumeración	Nitrógeno	Potasio	Fósforo	
	1	75,59	249,38	23,97	
	2	71,13	247,84	24,53	
	3	70,32	249,07	27,71	
	4	68,66	247,10	29,79	
	Uniforme	74,07	247,82	23,02	

Los valores muestran el promedio en kg/ha

Tabla 2.5 Niveles de fertilidad de suelos por zona para la clasificación de Espacios iguales en cuartel Corte Thompson.

Espacios Iguales Corte Thompson					
Color	Enumeración	Nitrógeno	Potasio	Fósforo	
	1	78,40	250,19	23,94	
	2	72,25	248,22	24,48	
	3	70,12	248,68	28,12	
	4	66,97	247,92	31,01	
	Uniforme	74,07	247,82	23,02	

Los valores muestran el promedio en kg/ha

3.Cálculo de las dosis de fertilizantes

Se calculó la cantidad requerida de cada nutriente y fertilizante por clasificación asociado al fertilizante correspondiente usando los algoritmos y composición de los fertilizantes descritos en la metodología (Tabla 3.1).

Tabla 3.1: Requerimiento de fertilizantes según cuartel y clasificación

Cuartel	Clasificación	Nitrógeno	Urea	Fósforo	Fosfato monoamónico	Potasio	Cloruro de potasio
Corte Thompson	Cortes naturales	77,23	167,90	453,23	743,00	13,97	23,28
Corte Thompson	Puntos iguales	161,85	351,84	451,29	739,82	15,40	25,67
Corte Thompson	Espacios iguales	141,10	306,74	453,12	742,81	14,98	24,97
Corte Thompson	Uniforme	246,24	535,30	617,03	1011,52	30,20	50,33
Lagunillas	Cortes naturales	110,94	241,17	6044,21	9908,54	2123,35	3538,92
Lagunillas	Puntos iguales	76,84	167,03	5751,79	9429,16	2000,20	3333,67
Lagunillas	Espacios iguales	0,00	0,00	6043,33	9907,10	2122,68	3537,81
Lagunillas	Uniforme	89,32	194,18	6087,09	9978,84	2286,63	3811,05

Como se mencionó en la metodología, la dosis de nitrógeno se calcula en base a la demanda de este, que se relaciona directamente con el rendimiento de kiwi por hectárea que hay por cada hectárea. Este dato se puede obtener calculando la cantidad producida por zona. Dicha información se muestra en el siguiente punto.

4. Producción en zonas clasificadas

En las tablas 4.1 a 4.6 se muestran los resultados del estudio de la producción de los cultivos de kiwi por cada clasificación en su respectivo cuartel, basándose en la relación NDVI-producción explicada en la metodología.

Tabla 4.1 Promedio del NDVI, rendimiento por hectárea y producción para la clasificación por puntos iguales Corte Thompson.

Zona	Promedio NDVI	Rendimiento ton/ha	Producción zona (ton)
Zona 1	0,447	40,12	89,22
Zona 2	0,397	35,63	158,26
Zona 3	0,320	28,72	21,48
Zona 4	0,265	23,78	7,61
Total			276,57
Uniforme	0,39	35	270,69

Producción total estimada fertilización sitio-específica = 276,57

Tabla 4.2. Promedio del NDVI, rendimiento por hectárea y producción para la clasificación por cortes naturales Corte Thompson.

Zona	Promedio NDVI	Rendimiento ton/ha	Producción zona (ton)
Zona 1	0,250	22,44	2,69
Zona 2	0,310	27,82	19,14
Zona 3	0,390	35,00	56,91
Zona 4	0,450	40,38	213,68
Total			292,42
Uniforme	0,39	35	270,69

Producción total estimada fertilización sitio-específica = 292,42

Tabla 4.3. Promedio del NDVI, rendimiento por hectárea y producción para la clasificación por espacios iguales Corte Thompson.

Zona	Promedio NDVI	Rendimiento ton/ha	Producción zona (ton)
Zona 1	0,250	22,44	1,64
Zona 2	0,316	28,36	32,44
Zona 3	0,390	35,00	118,23
Zona 4	0,445	39,94	106,99
Total			259,30
Uniforme	0,39	35	270,69

Producción total estimada fertilización sitio-específica = 259,29

Tabla 4.4. Promedio del NDVI, rendimiento por hectárea y producción para la clasificación por puntos iguales Lagunillas.

Zona	Promedio NDVI	Rendimiento ton/ha	Producción zona (ton)
Zona 1	0,385	48,13	229,51
Zona 2	0,285	35,63	226,93
Zona 3	0,270	33,75	187,95
Zona 4	0,195	24,38	128,19
Total			772,58
Uniforme	0,28	35	759,40

Producción total estimada fertilización sitio-específica = 772,58

Tabla 4.5. Promedio del NDVI, rendimiento por hectárea y producción para la clasificación por cortes naturales Lagunillas.

Zona	Promedio NDVI	Rendimiento ton/ha	Producción zona (ton)
Zona 1	0,410	51,25	23,58
Zona 2	0,300	37,50	502,39
Zona 3	0,260	32,50	204,13
Zona 4	0,190	23,75	43,44
Total			773,53
Uniforme	0,28	35	759,40

Producción total estimada fertilización sitio-específica = 773,53

Tabla 4.6. Promedio del NDVI, rendimiento por hectárea y producción para la clasificación por espacios iguales Lagunillas.

Zona	Promedio NDVI	Rendimiento ton/ha	Producción zona (ton)
Zona 1	0,430	53,75	8,06
Zona 2	0,345	43,13	50,41
Zona 3	0,255	31,88	652,86
Zona 4	0,170	21,25	3,53
Total			714,87
Uniforme	0,28	35	759,40

Producción total estimada fertilización sitio-específica = 714,86

5. Flujo de caja y beneficio económico del proyecto

El flujo de caja del proyecto, como se mencionó anteriormente en la metodología, este sujeto al supuesto de un préstamo de crédito comercial con una tasa del 9,9% y un impuesto a la utilidad del 19%. Primero se realizó un flujo correspondiente al periodo inicial, donde principalmente se incluyeron los costos y el financiamiento, y luego al periodo 1 donde se llevó a cabo la exportación del producto y pago de los intereses (Tabla 5.1).

Tabla 5.1: Flujo de caja Lagunillas periodo inicial

Clasificación	Puntos iguales	Cortes naturales	Espacios iguales	Uniforme
Ingresos	\$0	\$0	\$0	\$0
<i>Exportaciones</i>	\$0	\$0	\$0	\$0
<i>Préstamo bancario</i>	\$55.976.513	\$56.102.213	\$55.733.362	\$56.865.921
Total ingresos	\$55.976.513	\$56.102.213	\$55.733.362	\$56.865.921
Costos				
Costos fijos				
<i>Muestra</i>	\$250.000	\$250.000	\$250.000	\$62.500
<i>Imágenes</i>	\$40.000	\$40.000	\$40.000	\$0
<i>análisis</i>	\$200.000	\$200.000	\$200.000	\$50.000
Total costos fijos	\$490.000	\$490.000	\$490.000	\$112.500
Costos variables				
<i>Urea</i>	\$254.120	\$358.856	\$0	\$288.945
<i>Fosfato monoamónico</i>	\$43.509.613	\$43.518.308	\$43.511.993	\$43.827.049
<i>Cloruro de potasio</i>	\$11.722.779	\$11.735.049	\$11.731.369	\$12.637.427
Total costos variables	\$55.486.513	\$55.612.213	\$55.243.362	\$56.753.421
Total costos	\$55.976.513	\$56.102.213	\$55.733.362	\$56.865.921
Financiamiento				
<i>Intereses</i>	\$0	\$0	\$0	\$0
Utilidad				
<i>Utilidad antes de impuestos</i>	\$0	\$0	\$0	\$0
<i>Utilidad después de impuestos</i>	\$0	\$0	\$0	\$0

Tabla 5.1: Flujo de caja Lagunillas periodo 1

Clasificación	Puntos iguales	Cortes naturales	Espacios iguales	Uniforme
Ingresos				
<i>Exportaciones</i>	\$1.012.852.380	\$1.014.097.830	\$937.194.570	\$995.573.400
<i>Préstamo bancario</i>	\$0	\$0	\$0	\$0
Total ingresos	\$1.012.852.380	\$1.014.097.830	\$937.194.570	\$995.573.400
Costos				
<i>Costos fijos</i>	\$0	\$0	\$0	\$0
<i>Costos variables</i>	\$0	\$0	\$0	\$0
Total costos	\$0	\$0	\$0	\$0
Financiamiento	\$0	\$0	\$0	\$0
<i>Intereses</i>	\$61.518.188	\$61.656.332	\$61.250.965	\$62.495.647
Utilidad				
<i>Utilidad Antes de impuestos</i>	\$951.334.192	\$952.441.498	\$875.943.605	\$933.077.753
<i>Utilidad después de impuestos</i>	\$770.580.696	\$771.477.613	\$709.514.320	\$755.792.980

Tabla 5.3: Flujo de caja Corte Thompson periodo inicial

Clasificación	Puntos iguales	Cortes naturales	Espacios iguales	Uniforme
Ingresos				
Exportaciones				
Préstamo bancario	\$4.405.188	\$4.136.946	\$4.348.387	\$5.461.050
Total ingresos	\$4.405.188	\$4.136.946	\$4.348.387	\$5.461.050
Costos				
Costos fijos				
Muestra	\$250.000	\$250.000	\$250.000	\$62.500
Imágenes	\$40.000	\$40.000	\$40.000	\$0
Análisis	\$200.000	\$200.000	\$200.000	\$50.000
Total costos fijos	\$679.340	\$679.340	\$679.340	\$55.000
Costos variables				
Urea	\$391.437	\$117.167	\$323.794	\$796.524
Fosfato monoamónico	\$3.249.284	\$3.263.239	\$3.262.441	\$4.442.616
Cloruro de potasio	\$85.127	\$77.199	\$82.813	\$166.910
Total costos variables	\$3.725.848	\$3.457.606	\$3.669.047	\$5.406.050
Total costos	\$4.405.188	\$4.136.946	\$4.348.387	\$5.461.050
Financiamiento				
Intereses	\$0	\$0	\$0	\$0
Utilidad				
Utilidad antes de impuestos	\$0	\$0	\$0	\$0
Utilidad después de impuestos	\$0	\$0	\$0	\$0

Tabla 5.4: Flujo de caja Corte Thompson periodo 1

Columna1	Puntos iguales	Cortes naturales	Espacios iguales	Uniforme
Ingresos				
Exportaciones	\$362.669.007	\$340.022.683	\$383.440.157	\$354.958.504
Préstamo bancario	\$0	\$0	\$0	\$0
Total ingresos	\$362.669.007	\$340.022.683	\$383.440.157	\$354.958.504
Costos				
Costos fijos	\$0	\$0	\$0	\$0
Costos variables	\$0	\$0	\$0	\$0
Total costos	\$0	\$0	\$0	\$0
Financiamiento				
Intereses	\$4.841.302	\$4.546.503	\$4.778.877	\$6.001.694
Utilidad				
Utilidad Antes impuestos	\$357.827.705	\$335.476.180	\$378.661.280	\$348.956.810
Utilidad después impuetos	\$289.840.441	\$271.735.706	\$306.715.637	\$282.655.016

Para los cultivos de ambos cuarteles, los costos se ejecutan en el periodo inicial y los ingresos por exportación en el periodo 1, esto se explica por la naturaleza de la fruta en cuestión cuyo proceso para poder ser cosechados es de 11-12 meses. En el periodo 1 también se realiza el pago de los intereses correspondientes al préstamo correspondiente con la tasa de interés mencionada. Ambos cuarteles poseen la misma estructura de flujo de caja.

El beneficio calculado según la metodología explicada es para cada uno de los cuarteles y sus respectivas clasificaciones, por otro lado, el ahorro muestra la diferencia a favor de la fertilización sitio-especifica en comparación a la fertilización uniforme, solo considerando los : costos (Tabla 5.6):

Tabla 5.6: Beneficio económico fertilización sitio-especifica Lagunillas

Clasificación	Puntos iguales	Cortes naturales	Espacios iguales
Beneficio	\$14.787.716	\$15.684.633	-\$46.278.660

Tabla 5.7: Ahorro fertilización sitio-especifica Lagunillas

Clasificación	Puntos iguales	Cortes naturales	Espacios iguales
Aporte S-E	\$889.408	\$763.708	\$1.132.559

Tabla 5.8: Beneficio económico fertilización sitio-especifica Corte Thompson

Clasificación	Puntos iguales	Cortes naturales	Espacios iguales
Beneficio	\$7.185.425	-\$10.919.310	\$24.060.621

Tabla 5.9: Ahorro fertilización sitio-especifica Corte Thompson

Clasificación	Puntos iguales	Cortes naturales	Espacios iguales
Aporte S-E	\$1.055.862	\$1.324.105	\$1.112.663

6. Indicadores de eficiencia

En las tablas 6.1 y 6.2 y figuras 7 y 8 se presentan los indicadores de eficiencia, en donde en el cuartel lagunillas se ve que el método sitio-especifico clasificando por cortes naturales y puntos iguales se obtiene resultados más eficientes, mientras que en el cuartel Corte-Thompson el resultado mas eficiente se obtiene al clasificar en cortes naturales.

Tabla 6.1 costo de fertilización por kg de kiwi Lagunillas

Clasificación	toneladas estimadas	Kilogramos	Costo total	costo x kilo
Cortes naturales	773,53	773530	\$56.102.213	\$73
Espacios iguales	714,87	714870	\$55.733.362	\$78
puntos iguales	772,58	772580	\$55.976.513	\$72
promedio	759,40	759400	\$56.865.921	\$75

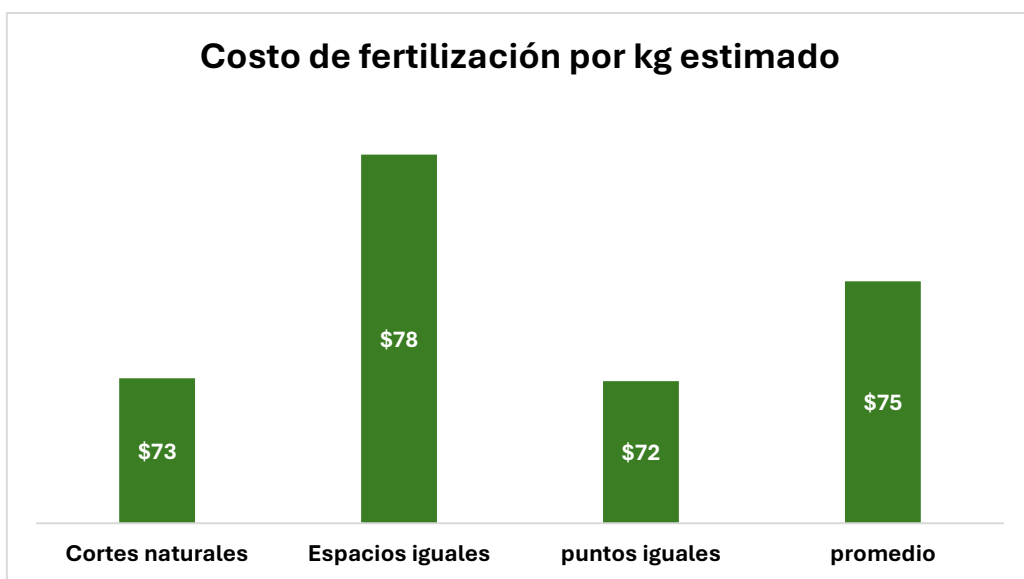


Figura 7

Tabla 6.2 costo de fertilización por kg de kiwi Corte-Thompson

Clasificación	toneladas estimadas	Kilogramos	Costo total	costo x kilo
Cortes naturales	292,42	292418	\$4.136.946	\$14
Espacios iguales	259,30	259299	\$4.348.387	\$17
puntos iguales	276,57	276572	\$4.405.188	\$16
promedio	270,69	270694	\$5.461.050	\$20

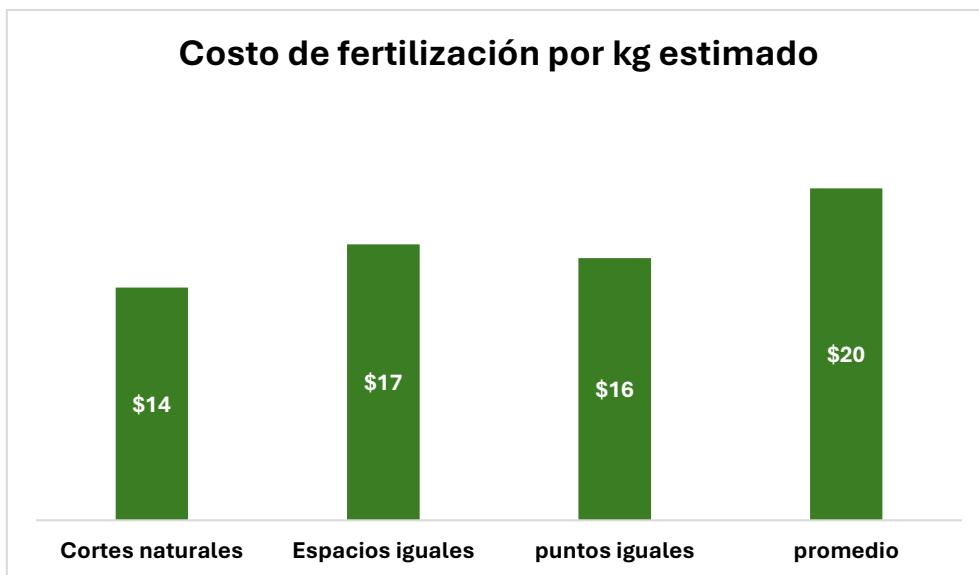


Figura 8

7. Análisis variable

El ultimo objetivo planteado consiste en analizar la significancia de las zonas clasificadas en los resultados obtenidos para cada una de estas que están expuestos en los flujos de caja. Para esto se realizó un análisis de varianza con el método de comparación LSD de Fisher que compara las medias de diferentes grupos para determinar si la variable dependiente es significativa o no. El resultado indica que las medias con un método de zonificación en común (puntos iguales, cortes naturales, espacios iguales) no son significativas, ya que:

$$P - \text{value} = 0,998 > 0,05$$

Esto se debe a que son muy pocas variables para poder determinarlo y no se visualiza resultados que evidencien que un de los métodos de clasificación es exclusivamente mas eficiente que los demás, sin embargo, se puede establecer en ambos que el método de fertilización uniforme es el menos eficiente.

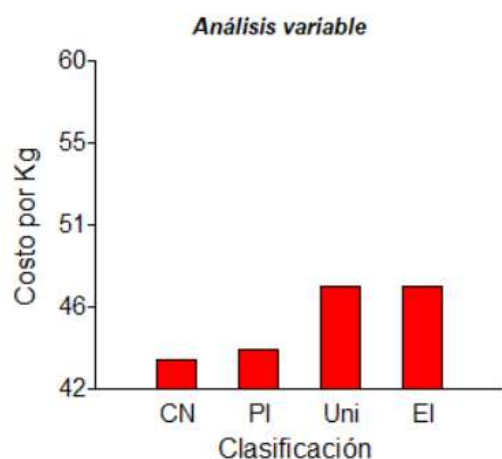


Figura 9

Como se ve en el gráfico, el costo de fertilización por kilogramo de kiwi es menor en cortes naturales y puntos iguales, mientras que es el mismo para el método uniforme y en clasificación de espacios iguales según el NDVI. En base a esto se pueden extraer las conclusiones del estudio.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos es posible establecer las conclusiones respectivas a la hipótesis y los objetivos planteados en la introducción del estudio. Como hipótesis se planteó que una fertilización sitio-específica clasificando el cuartel a partir del NDVI calculado con imágenes satelitales es más eficiente técnica y económicamente que la fertilización uniforme para los cuarteles de estudio, que corresponden a cultivos de kiwi. Es posible concluir que, en los cuarteles estudiados efectivamente es más eficiente fertilizar de manera sitio-específica los cultivos de kiwi considerando los costos de fertilización, el ingreso estimado según la cantidad de toneladas cosechadas si es que se alcanza el potencial máximo por NDVI calculado, y tomando en consideración el costo de fertilización por kilogramo de kiwi. Respecto al objetivo principal del estudio que es evaluar técnica y económicamente el proyecto a través del uso de información obtenida por parte de imágenes satelitales, podemos decir que se cumplió ya que se llevó a cabo la evaluación y podemos saber para estos cuarteles que método de clasificación para la fertilización sitio-específica le significa un mayor beneficio económico y técnico, sin poder establecer una relación que se pueda traspasar la generalidad de los cultivos de kiwi existentes, ya que las clasificaciones muestran diferentes resultados para ambos cuarteles utilizando los mismos métodos. Cabe recalcar que la diferencia en dichos resultados se puede explicar debido a diferencias y la variabilidad en ciertos aspectos de los cuarteles, como por ejemplo la extensión de estos, donde el cuartel “Lagunillas” usa

casi tres veces el espacio que utiliza el “Corte Thompson”. También la diferencia en los NDVI y en la disponibilidad de nutrientes en el suelo de cada uno de los cuartel, lo que indica que para llegar a una relación más significativa entre un método de clasificación de los suelos mediante NDVI captado en imágenes satelitales para la fertilización y la eficiencia de los cultivos de kiwi es necesario estudiar más cuarteles. También se debe considerar la cantidad de toneladas estimadas de kiwi por cuartel que afectan al cálculo del beneficio por cada método de clasificación, que es independiente del costo de fertilización y afecta a la decisión final. Otro factor a considerar es el porcentaje de cada parte del terreno del cuartel que requería nutrientes, que puede explicar por qué existen diferencias en los resultados de las clasificaciones entre ambos cuarteles, en donde para el cuartel lagunillas, en la clasificación por el algoritmo de espacios iguales resulta ser menos eficiente que la fertilización uniforme, no así para el cuartel Corte Thompson. A continuación, podemos ver una tabla que explica esta diferencia con información captada por los centroides de “QGIS”. Esta tabla explica el por qué en general los resultados de la fertilización sitio-específica en el cuartel Corte Thompson son más eficientes que para el cuartel Lagunillas.

Porcentaje del área que requiere fertilización

Cuartel	Nitrógeno	Fósforo	Potasio
<i>Corte Thompson</i>	99%	85%	54%
<i>Lagunillas</i>	70%	100%	100%

A modo de conclusión, podemos decir que si bien no se pudo establecer que la fertilización sitio-específica para el cultivo de kiwi mediante imágenes satelitales es siempre más eficiente, ya que para esto habría que validarlo con el estudio de más cuarteles hasta llegar a crear un modelo de análisis variable significativo, si se puede rescatar que independiente o no de que esto sea así, es necesario para la gestión de un cultivo evaluar este tipo de proyectos ya que podrían obtener un beneficio, por ejemplo en este caso, a excepción de la clasificación de espacios iguales, en todos los demás casos existe un beneficio por fertilizar a partir de la zonificación de los cuarteles. Al haber sido estudiado tan solo dos lotes es imposible obtener un análisis estadístico que favorezca el uso de este método de fertilización de manera automática en el futuro para lograr la optimización de los cultivos, sin embargo, esto se podría lograr eventualmente tras aplicar esta metodología en muchos casos, donde si se incluyen incluso más o distintas variables que las tomadas en cuenta para este estudio, se podría mejorar cada vez más la eficiencia llevando la agricultura de precisión a un nivel en el que se consideren la mayor cantidad de factores posibles, lo que traería no tan solo beneficios económicos para las empresas que gestionan la operación, sino también para la calidad de los cultivos y un mayor cuidado del medio ambiente.

Bibliografía

1. García E, Flego F. Revista Ciencia y Tecnología. Universidad de Palermo. 2008; <https://www.palermo.edu/ingenieria/investigacion-desarrollo/revista-ciencia-tecnologia/edicion-8.html> (consultado 22-01-2025).
2. Oficia de Estudio y Políticas Agrarias. ODEPA (2009) “Estudio, Alcance de la agricultura de precisión en Chile: Estado del arte, ámbito y aplicación y perspectivas”. <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2009/07/AgriculturaDePrecision.pdf> (consultado 22-01-2025)
3. Ortega, Rodrigo y Flores, Luis (1999). “Agricultura de Precisión: Introducción al manejo sitio-específico”. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2000/09/AgricPrecisionOrtega.pdf> (consultado 22-01-2025).

Softwares utilizados

1. QGIS Development Team. (2024). *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation Project. Recuperado de <https://qgis.org>
2. Ag Leader. (2024). *SMS Ag Leader Technology*. Recuperado de <https://www.agleader.com>
3. Microsoft Corporation. (Año). *Microsoft Excel*. Disponible en <https://www.microsoft.com>
4. InfoStat. (2024). *InfoStat Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina*. Recuperado de <https://www.infostat.com.ar>.

Comunicación personal

1. Profesor Rodrigo Ortega Blue (2024). Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, Chile.