

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Ciencias de la Tierra
con orientación en Geociencias Ambientales**

**Variación de la edafología y estrés hídrico en *Vitis vinifera* L.
con relación al relieve en un viñedo del Valle de Guadalupe,
B.C., México**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Yadira Romero Toledo

Ensenada, Baja California, México
2017

Tesis defendida por

Yadira Romero Toledo

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Rodrigo Méndez Alonzo

Codirector de tesis

Dr. Jorge Torres Rodríguez

Codirector de tesis

Dr. Stephen Holmes Bullock Runquist

Dr. Enrique Gómez Treviño

Dra. Rufina Hernández Martínez

M.C. Francisco Suárez Vidal †



Dr. Juan García Abdeslem

Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra

Dra. Rufina Hernández Martínez

Directora de Estudios de Posgrado

Yadira Romero Toledo © 2016

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis

Resumen de la tesis que presenta **Yadira Romero Toledo** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geociencias Ambientales.

Variación de la edafología y estrés hídrico en *Vitis vinifera* L. con relación al relieve en un viñedo del Valle de Guadalupe, B.C., México

Resumen aprobado por:

Dr. Rodrigo Méndez Alonzo
Codirector de tesis

Dr. Jorge Torres Rodríguez
Codirector de tesis

El agua dulce para las actividades humanas se destina principalmente a la agricultura, prácticamente en todos los países del mundo. La uva (*Vitis vinifera* L.) es uno de los principales cultivos de las regiones semiáridas con clima tipo Mediterráneo en el mundo y, debido a su importancia comercial, es importante maximizar la eficiencia del riego en este cultivo. Ante este escenario es primordial conocer las condiciones bajo las cuales se lleva a cabo la agricultura en el Valle de Guadalupe, Baja California, ya que por su ubicación geográfica, tecnología y competitividad internacional, ésta es la región vitivinícola de mayor importancia en el país. En este estudio se evaluó la relación entre el estado hídrico de un cultivar de uva respecto a la microtopografía y edafología local a partir de la generación de mapas topográficos de alta resolución usando vehículos aéreos no tripulados, del análisis de textura por el método de Bouyoucos, pH y conductividad eléctrica de suelos con un potenciómetro y del estudio del potencial hídrico y conductancia estomática, por medio del uso de una cámara de presión y porómetro foliar, respectivamente. Se generaron mapas para cada variable por intrapolación espacial, lo que permitió conocer los patrones de variación para cada variable en cada espacio del área de estudio. Se encontró que la topografía determina la variación en edafología y fisiología, donde sitios con menor pendiente tienen suelos más aptos para la agricultura, con mayor contenido de materia orgánica, menor pH, menos conductividad eléctrica, potenciales hídricos y conductancias estomáticas más altos, que los sitios con mayor pendiente. Esto permitirá poder generar estrategias de manejo e irrigación específicas a cada porción del terreno, expandiendo la utilidad de los métodos de agricultura de precisión a terrenos inferiores a una hectárea.

Palabras clave: agricultura de precisión, estadística bayesiana, percepción remota, textura de suelo, topografía.

Abstract of the thesis presented by **Yadira Romero Toledo** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth Sciences with orientation in Environmental Geosciences.

Variation in edaphology and water stress in *Vitis vinifera* L. in relation to the relief in a vineyard in the Guadalupe Valley, B.C., Mexico

Abstract approved by

Dr. Rodrigo Méndez Alonzo
Thesis codirector

Dr. Jorge Torres Rodríguez
Thesis codirector

The use of fresh water for human activities is primarily intended for agriculture, in virtually all countries of the world. The grape (*Vitis vinifera* L.) is one of the main crops within semi-arid Mediterranean type climate regions in the world and, because of its commercial importance, to maximize the efficiency of irrigation in this produce is crucial. Given this scenario, it is essential to know the conditions under which agriculture is carried out in the Valle de Guadalupe, Baja California, as this is a wine region of greater importance in Mexico, because of its geographical location, technology and international competitiveness. In this study, the relationship between the water status of a grape cultivar regarding the local microtopography and soil properties was evaluated by the elaboration of high resolution topographic maps using unmanned aerial vehicles, of soil texture analysis by the Bouyoucos method, pH and electrical conductivity by using a potentiometer, and of plant water relations, by analyzing plant water potential and stomatal conductance by the pressure chamber and foliar porometer. For each variable, maps were generated using spatial intrapolation, thus denoting the patterns of variability in each portion of the study area. It was found that topography determines the variation in edaphology and plant ecophysiology, where sites with lower topographic slope have better quality soils with higher organic matter content, low pH, and lower electrical conductivity, water potential and stomatal conductance, that sites with greater slope. In conjunct, the results of this thesis gives the basis for site-specific management and irrigation within the study area, expanding the capabilities of precision agriculture to vineyards less than 1 ha size.

Keywords: Bayesian statistics, precision agriculture, remote sensing, soil texture, topography.

Dedicatoria

A mis padres Julio Romero y Matilde Toledo por todos sus consejos y apoyo en cada etapa de mi vida.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico brindado a través de la beca no. 337941.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), al posgrado en Ciencias de la Tierra y Ciencias de la vida por el trato y apoyo proporcionado en todo momento.

Al proyecto interno: Ecofisiología y ecología funcional de plantas de ambientes estresado, clave: BOF081.

A mis codirectores, Dr. Rodrigo Méndez y Dr. Jorge Torres por su apoyo, tiempo, dedicación, y asesorías en el desarrollo de mi trabajo, así mismo a la Dra. Rufina Hernández, Dr. Enrique Gómez y Dr. Stephen Bullock por aceptar formar parte de mi comité de tesis, por cada uno de sus comentarios, apoyo y la disposición prestada en cada uno de los avances.

A Ivette Vaillard por permitirnos realizar esta investigación en su viñedo y el apoyo en la logística para realizar las mediciones fisiológicas.

A los técnicos Gabriel Rendón y Eulogio López por su apoyo en el proceso de los análisis del suelo, en la logística y mediciones en las salidas al campo, así como por sus comentarios y disposición.

A Ana Rosa Soto por todo su apoyo en cada una de las dudas que tenía, las pláticas que me animaban cada que me encontraba desesperada, por su buen trato, disposición y atención pero sobre todo por ese café tan rico con el que empezaba las mañanas.

A mis amig@s Mariana Espinosa, Patricia Andrade y Ricardo Miranda por el apoyo en mis dudas sobre ArcMap, instalación de programas, mantenimiento de mi computadora, por sus consejos y buenos ánimos.

A Cristian Gallegos, Armando Rocha y Oswaldo Sagahón por sus ánimos, comentarios, alegría, disposición y amistad la cual me enseñó que aún existen personas que en poco tiempo se ganan el corazón y la simpatía de todo aquel que los rodea, por este tiempo de convivio y por hacernos ver que la vida es más dulce si la disfrutas al máximo.

A tod@s aquellas personas que este posgrado me permitió conocer y disfrutar con ellos de una buena charla, tardes de cine, comida y muchas otras cosas, sin olvidar esas retas de fútbol que nos hacían olvidarnos de tanta presión.

Tabla de contenido

| | Página |
|--|--------|
| Resumen español | ii |
| Resumen inglés | iii |
| Dedicatorias | iv |
| Agradecimientos | v |
| Lista de figuras | viii |
| Lista de tablas | |
| | |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1 Antecedentes..... | 1 |
| 1.1.1 Agricultura de precisión..... | 1 |
| 1.2 Justificación..... | 2 |
| 1.3 Objetivos..... | 3 |
| 1.3.1 Objetivo general..... | 3 |
| 1.3.2 Objetivos específicos..... | 3 |
| | |
| 2. Marco teórico | 4 |
| 2.1 Cartografía del terreno | |
| 2.2 Suelos..... | 5 |
| 2.2.1 Textura del suelo | 5 |
| 2.2.2 Materia orgánica..... | 7 |
| 2.3 Fisiología del transporte hídrico en plantas..... | 8 |
| | |
| 3. Materiales y métodos | 9 |
| 3.1 Área de estudio | 9 |
| 3.1.1 Climatología..... | 10 |
| 3.1.2 Geomorfología..... | 10 |
| 3.1.3 Especie de estudio | 10 |
| 3.2 Cartografía del terreno | 11 |
| 3.2.1 Ubicación de puntos de control..... | 11 |
| 3.2.2 Vuelo del UAV..... | 12 |
| 3.3 Suelos..... | 14 |
| 3.3.1 Determinación del número de muestras..... | 14 |
| 3.3.2 Recolección de muestras | 15 |
| 3.3.3 Análisis de laboratorio..... | 15 |
| 3.3.3.1 Medición de pH..... | 15 |
| 3.3.3.2 Medición de Conductividad eléctrica..... | 15 |
| 3.3.3.3 Determinación de textura del suelo | 16 |
| 3.3.3.4 Contenido de materia orgánica | 17 |
| 3.4 Fisiología del transporte hídrico en plantas | 18 |
| 3.4.1 Experimento preliminar..... | 18 |
| 3.4.2 Determinación del potencial hídrico..... | 18 |
| 3.4.3 Conductancia estomática..... | 20 |
| 3.4.4 Medición de la densidad foliar..... | 20 |
| 3.4.5 Ciclo circadiano..... | 21 |
| 3.5 Análisis estadísticos y cartografía | 21 |
| 3.5.1 Interpolación espacial..... | 21 |

| | |
|---|----|
| 4. Resultados | 23 |
| 4.1 Cartografía del terreno..... | 23 |
| 4.2 Suelos..... | 26 |
| 4.3 Fisiología..... | 27 |
| 4.4 Interpolación espacial (Kriging)..... | 33 |
| 5. Discusión | 44 |
| 5.1 Variación del suelo en función de la topografía..... | 44 |
| 5.2 Variación en caracteres eco-fisiológicos en <i>V. vinifera</i> L..... | 44 |
| 5.2.1 Descripción de variación espacial de ψ y g_s | 45 |
| 5.2.2 Variación temporal de ψ y g_s | 46 |
| 5.3 Interpretación de los mapas de interpolación..... | 47 |
| 6. Conclusiones | 48 |
| Literatura citada | 49 |
| Anexos | 52 |

Lista de Figuras

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 1 | Triángulo textural del suelo basado en la clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA -1951)..... | 6 |
| Figura 2 | Ortofoto del Viñedo Tres Mujeres obtenida a partir del vuelo de un vehículo aéreo no tripulado el 8 diciembre del 2015 en el Valle de Guadalupe, México. En la parte central se puede observar la dimensión del sitio, en la parte inferior derecha podemos observar la misma ortofoto del sitio, en rojo se observa la delimitación de la zona con cultivo y en azul los puntos de muestreo que se seleccionaron para este estudio..... | 9 |
| Figura 3 | Extensión del sistema radical de <i>Vitis vinifera</i> L..... | 10 |
| Figura 4 | Hexacóptero utilizado para el levantamiento fotogramétrico..... | 11 |
| Figura 5 | Adquisición de puntos de control en el terreno. | 12 |
| Figura 6 | Targets de identificación por cada punto de control..... | 13 |
| Figura 7 | Estación de control y monitoreo de la trayectoria del vuelo..... | 13 |
| Figura 8 | Pecíolo de la hoja ingresado dentro del empaque de la cámara de presión..... | 19 |
| Figura 9 | Medición de la conductancia estomática..... | 20 |
| Figura 10 | Modelo Digital del Terreno generado a partir de las imágenes RGB obtenidas por medio de un vehículo aéreo no tripulado en el Viñedo Tres mujeres, en diciembre del 2015 el Valle de Guadalupe, BC México. | 23 |
| Figura 11 | Mapa del Orden de corrientes superficiales generado a partir del Modelo Digital del terreno del Viñedo Tres Mujeres. | 24 |
| Figura 12 | Mapa del cálculo de pendientes obtenido a partir del Modelo Digital del Terreno del sitio de estudio. En rojo se observan los valores más altos del sitio de estudio. | 25 |
| Figura 13 | Clasificación del suelo del Viñedo Tres Mujeres basado en la clasificación textural-USDA (1951) obtenido a partir de los análisis de textura realizados a los 56 puntos recolectados en sitio de estudio. | 26 |
| Figura 14 | Variación en el potencial hídrico del tallo a medio día por polígono, en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe, B.C. México. Se utilizó un análisis de varianza Bayesiano, donde BF es la razón entre la probabilidad de la ocurrencia de la hipótesis alternativa (al menos un tratamiento es diferente) sobre la nula (los tratamientos son iguales).... | 27 |
| Figura 15 | Variación en potenciales hídricos de tallo y hoja a medio día por edad de planta, en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe, B.C. México. Se utilizó un análisis de varianza Bayesiano, donde BF es la razón entre la probabilidad de la ocurrencia de la | 28 |

| | | |
|-----------|---|----|
| | hipótesis alternativa (al menos un tratamiento es diferente) sobre la nula (los tratamientos son iguales). | |
| Figura 16 | Análisis de la variación del contenido de materia orgánica y porcentaje de Limos en suelo y de la conductancia estomática foliar por polígonos, en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe, B.C. México. Se utilizaron análisis de varianza Bayesianos, donde BF es la razón entre la probabilidad de la ocurrencia de la hipótesis alternativa (al menos un tratamiento es diferente) sobre la nula (los tratamientos son iguales)..... | 29 |
| Figura 17 | Análisis de la Variación de potenciales hídricos del tallo antes del amanecer y a medio día para cuatro variedades de <i>V. vinifera</i> , en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe, B.C. México. Se utilizaron análisis de varianza Bayesianos, donde BF es la razón entre la probabilidad de la ocurrencia de la hipótesis alternativa (al menos un tratamiento es diferente) sobre la nula (los tratamientos son iguales). | 30 |
| Figura 18 | Análisis de la Variación de conductancia estomática entre las 5 edades de <i>V. vinifera</i> , en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe, B.C. México. Se utilizaron análisis de varianza Bayesianos, donde BF es la razón entre la probabilidad de la ocurrencia de la hipótesis alternativa (al menos un tratamiento es diferente) sobre la nula (los tratamientos son iguales). | 31 |
| Figura 19 | Promedio y error estándar para el potencial hídrico y conductancia estomática de seis individuos de <i>Vitis vinifera</i> , var. Grenache a lo largo de un lapso de 24 horas, en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe, B.C. México. | 32 |
| Figura 20 | Correlación entre conductancia estomática y potencial hídrico del tallo en <i>Vitis vinifera</i> var. Grenache, en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe, B.C. México. Los datos para esta correlación provienen de los promedios de seis plantas a lo largo de un ciclo de medición de 24 horas. | 32 |
| Figura 21 | Mapa de interpolación espacial de los valores de pH para 56 muestras del suelo del viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe. En rojo se puede observar los valores de pH asociado a suelos alcalinos mientras que en colores más verdes la asociación es con suelos ácidos. | 33 |
| Figura 22 | Mapa de interpolación espacial de los valores de conductividad eléctrica (CE) obtenidos de 56 muestras de suelo en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe. En rojo se observan las muestras mayor conductividad y en verde las que tuvieron menor conductividad. | 34 |
| Figura 23 | Mapa de interpolación espacial de los valores de contenido de materia orgánica obtenidos de 56 muestras de suelo en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe. En rojo se observan las muestras con mejor contenido de M.O., mientras que en verde se observan las muestras con mayor contenido. | 35 |
| Figura 24 | Mapa de interpolación espacial de los valores de porcentaje de arenas existentes en 56 muestras del suelo extraídas del viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe. En rojo se identifican las muestras con menor contenido de arenas, en verde los sitios con mayor contenido. | 36 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 25 | Mapa de interpolación espacial de los valores de porcentaje de limos existentes en 56 muestras del suelo extraídas del viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe. En rojo se identifican las muestras con menor contenido de limos, en verde los sitios con mayor contenido. | 37 |
| Figura 26 | Mapa de interpolación espacial de los valores de porcentaje de arcillas existentes en 56 muestras del suelo extraídas del viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe. En rojo se identifican las muestras con menor contenido de arcillas, en verde los sitios con mayor contenido. | 38 |
| Figura 27 | Mapa de interpolación espacial de los valores de gs medidos a medio día en 56 plantas de vid, en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe. En rojo se observan los valores donde existe menor conductancia y en verde los sitios de mayor conductancia..... | 39 |
| Figura 28 | Mapa de interpolación espacial de los valores de potencial hídrico en hoja al pre-amanecer para 56 plantas de vid en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe. En rojo, los valores que reflejan mayor estrés hídrico; en verde los valores de menor estrés hídrico..... | 40 |
| Figura 29 | Mapa de interpolación espacial de los valores de potencial hídrico en tallo al pre-amanecer para 56 plantas de vid en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe. En rojo, los valores que reflejan mayor estrés hídrico; en verde los valores de menor estrés hídrico | 41 |
| Figura 30 | Mapa de interpolación espacial de los valores de potencial hídrico en hoja a medio día para 56 plantas de vid en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe. En rojo, los valores que reflejan mayor estrés hídrico; en verde los valores de menor estrés hídrico..... | 42 |
| Figura 31 | Mapa de interpolación espacial de los valores de potencial hídrico en tallo a medio día para 56 plantas de vid en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe. En rojo, los valores que reflejan mayor estrés hídrico; en verde los valores de menor estrés hídrico..... | 43 |

Lista de tablas

| | | |
|---------|---|----|
| Tabla 1 | VARIABLES Y UNIDADES EMPLEADAS EN ESTE ESTUDIO..... | 22 |
|---------|---|----|

1. Introducción

Aproximadamente el 85% de la superficie terrestre en el planeta se encuentra sujeta a condiciones de sequía, por lo cual la falta de agua para las actividades humanas se ha convertido en uno de los principales problemas para la población a nivel mundial (Marylin y Bao, 2014). El agua dulce para las actividades humanas se destina principalmente para la agricultura, prácticamente en todos los países del mundo (Gleick, 2003). Por ejemplo, en México, de acuerdo a información proporcionada por CONAGUA, para finales del año 2010 existían 101 acuíferos sobreexplotados en todo el país, de los cuales aproximadamente un 49% explotan exclusivamente agua subterránea. Además se habían identificado 32 acuíferos con presencia de suelos salinos y agua salobre, localizados principalmente en la Península de Baja California y el Altiplano Mexicano, lo cual reduce aún más la cantidad de agua dulce disponible para el consumo humano (Comisión Nacional del Agua, 2012).

El Valle de Guadalupe, Baja California, es la región vitivinícola de mayor importancia en el país por su ubicación geográfica, tecnológica y competitividad internacional (Badan et al., 2006). Sin embargo, esta región posee un clima semiárido y está sujeta a frecuentes eventos de sequía. Ante este escenario es primordial conocer las condiciones bajo las cuales se lleva a cabo la agricultura. Esto hace necesario que los procesos de producción agrícola de la industria del vino estén a la vanguardia respecto a las nuevas técnicas dirigidas al buen manejo de sus cultivos y al uso adecuado de los recursos hídricos y edáficos. Al lograr consolidar su liderazgo en el manejo de recursos hídricos, los productores nacionales reducirán gastos e incrementarán la productividad para tener vinos de clase internacional (Aguilera y Carbajal, 2013). La calidad del suelo es de gran importancia en la agricultura ya que tiene una relación directa con los gastos económicos y la calidad de producción de los cultivos (Aguilera y Carbajal, 2013).

1.1 Antecedentes

1.1.1 Agricultura de precisión en viñedos

La agenda del agua del Gobierno Federal, a través de SEMARNAT, CONAGUA y la Presidencia de la República, impulsa a lograr que, para el año 2030, todos los cultivos de México estén tecnificados, con patrones de cultivo adecuados para cada región del país (SEMARNAT, 2010). Actualmente una de las ramas de la agricultura que más éxito han tenido para maximizar la eficiencia de irrigación es lo que se conoce como “agricultura de precisión”, una combinación de técnicas de diferentes disciplinas relacionadas con

el estudio del medio ambiente, como la percepción remota y la fisiología vegetal, para entender los patrones y procesos que modifican la productividad de un cultivo, permitiendo mejorar los procesos de irrigación y de aplicación de fertilizantes y otros insumos (Stafford 2000, McBratney et al., 2005). En el caso de los viñedos, esto implica mejorar los procesos de irrigación. Trabajos previos han demostrado que las herramientas empleadas para estudiar de manera fisiológica el estado hídrico de las plantas, en particular el uso de mediciones del potencial hídrico junto con herramientas de percepción remota, son útiles para establecer esquemas de irrigación más eficientes (Kumhalova et al., 2011; Williams et al., 2012). Sin embargo, no conocemos aún que impacto pueden tener la aplicación de técnicas de alta precisión propias de la fisiología vegetal combinadas con percepción remota de alta definición y mediciones edafológicas para mejorar la eficiencia de la irrigación en zonas de cultivos pequeñas. Esta carencia puede resolverse por medio del uso de nuevas tecnologías para la obtención y procesamiento de información espacial, tales como los vehículos aéreos no tripulados y la geoestadística, que pueden permitir generar cartografía específica para variables de interés en agricultura a escalas espaciales grandes.

1.2 Justificación

Debido a que el estrés hídrico es una de las principales causas de muerte en plantas, y es responsable de gran parte de las pérdidas de productividad agrícola y económica a escala global (Dai, 2011, McDowell et al., 2008), en este proyecto se plantea establecer una metodología de mapeo de alta precisión del terreno combinada con mediciones de potencial hídrico en viñedos para mejorar las estrategias de irrigación. Esto permitirá establecer irrigación diferencial controlada por la ubicación espacial en la cual se encuentren las plantas. Potencialmente esta técnica permitirá reducir pérdidas de agua debido a infiltración y evaporación excesivas, reduciendo así costos sin disminuir la productividad vegetal.

Este estudio se justifica aún más en Baja California, puesto que este Estado presenta un grave problema de déficit hídrico, lo cual ha afectado principalmente al sector agrícola. Las estadísticas hidrológicas referidas a la Región Hidrológica-Administrativa I (Baja California y Baja California Sur) establecen que la disponibilidad de agua del Estado dependen de la precipitación pluvial, aguas subterráneas (acuíferos) y aportes del Río Colorado, sin embargo, el clima local es propio de zonas semiáridas, por lo cual siempre hay un déficit en la cantidad de agua empleada respecto a la acumulada por precipitación y escorrentía (Congreso de Baja California, 2007). Ante esto, es necesario evaluar la eficiencia de los riegos en los cultivos y las condiciones del suelo para evitar el uso innecesario de agua y disminuir los gastos económicos para los agricultores. Se requiere la implementación de técnicas que ayuden a preservar la extracción del agua de los acuíferos donde se lleva a cabo la actividad agrícola,

principalmente en Maneadero, La Misión y Valle de Guadalupe. Al disminuir el uso de agua en la producción agrícola, se puede emplear una mayor proporción de agua para atender las demandas de uso urbano e industrial, entre otras (Gleick, 2003).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Determinar la relación entre la microtopografía y la hidrología, obtenida a escala local mediante mapeo de alta resolución, con la estructura del suelo y el estado de estrés hídrico en plantas de vid (*Vitis vinifera* L.) utilizando muestreos edafológicos y fisiológicos en un viñedo del Valle de Guadalupe, B.C., México.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Determinar la microtopografía del sitio a partir de un modelo digital de elevación del terreno con imágenes obtenidas de un vehículo aéreo no tripulado (UAV), para poder estimar la orientación de laderas, pendientes y microcuencas (zonas de máxima acumulación de agua).
2. Comparar el contenido de Materia Orgánica (MO), textura, pH y conductividad eléctrica en muestras del suelo obtenidas de zonas con diferentes pendientes dentro del área de estudio.
3. Comparar el potencial hídrico a preamanecer y medio día de plantas localizadas en zonas con diferentes pendientes dentro del área de estudio.
4. Comparar la densidad foliar, conductancia estomática (g_s) y potencial hídrico (Ψ) de plantas localizadas en zonas con diferentes pendientes dentro del área de estudio.
5. Generar cartografía para cada variable de estructura de suelo y de estrés hídrico de plantas a partir de técnicas geoestadísticas de interpolación espacial.

2. Marco teórico

2.1 Cartografía del terreno

Las aplicaciones de los sensores remotos en la biología de la conservación, monitoreo de coberturas y actividades forestales requieren imágenes con alta resolución espacial y temporal (Grenzdörffer, 2003). Una de las herramientas más eficaces para poder generar cartografía relacionada con variables agronómicas o con factores que afectan la productividad de los cultivos es la tecnología basada en la teledetección. Su fundamento consiste en obtener información sobre un objeto, área o fenómeno sin estar en contacto físico con éste, obteniendo información de cada cuerpo a partir de un patrón de energía propio y diferente conocido como firma espectral.

Uno de los parámetros principales que definen la utilidad de las imágenes en percepción remota, y que las permiten categorizar, es su resolución espacial. Esta resolución define la calidad y cantidad de la información adquirida por una imagen. En términos generales la resolución espacial de un sensor se refiere al detalle relativo del objetivo de estudio y el entorno geográfico que lo rodea. En 2006 Hengl determinó que son necesarios al menos 4 píxeles para detectar el objeto más pequeño. Un ejemplo de esto si tenemos un rodal de hierbas de 1 m² (1 m x 1 m), entonces se debería de utilizar un imagen con una resolución igual o menor a 0.5 m por píxel para detectarlo. Las imágenes multiespectrales obtenidas por satélites con mayor resolución espacial disponibles son las de los satélites Geo-Eye (1.64m píxel) y QuickBird (2.4m píxel).

Las imágenes satelitales o imágenes convencionales obtenidas a partir de aeronaves presentan dificultades de manejo y costos elevados. Ante este panorama, los vehículos aéreos no tripulados (UAV) empiezan a tener gran atención en investigaciones de teledetección (Koh y Wich 2012). Los UAV o drones se han desarrollado en los últimos años con mayor frecuencia en el ámbito comercial y científico revolucionando la forma en la que se obtiene información espacial del territorio (Ramírez Chávez et al., 2013). Un UAV es una plataforma aérea no tripulada con la capacidad de realizar distintas actividades, pudiendo ser controlado remotamente o de manera autónoma. La navegación autónoma es realizada utilizando un GPS, un controlador de vuelo el cual se encarga de suministrar la potencia en los motores propulsores y un receptor de frecuencia para control a distancia. Por medio de un autopiloto programable se hace posible hacer levantamientos fotogramétricos, ya que permite obtener un mapeado sistemático, rápido y eficiente del sitio de interés, a diferencia de un vehículo aéreo pilotado remotamente (Eisenbeis, 2004; Broich et al., 2011; Gardner et al., 2008; Zhang y Kovacs, 2012). Los UAV están siendo utilizados en

diferentes áreas debido a su versatilidad y bajo costo comparado con la adquisición de imágenes satelitales, para usos militares, sector civil y comercial. Algunas aplicaciones son la detección de incendios forestales, mapeo de cobertura del suelo, generación de cartografía digital, inventarios de recursos naturales, entre otras. Este nuevo desarrollo en el campo de la teledetección permite generar mosaicos derivados de técnicas fotogramétricas con rapidez y precisión, construir una orientación relativa de un bloque de imagen, extraer un modelo digital del terreno (DTM) y producir ortofotos con costos menores y mayores resoluciones que las obtenidas por imágenes tomadas desde otro tipo de plataforma aérea o espacial (Sandoval, 2013).

2.2 Suelos

El suelo se considera como el medio natural para el desarrollo de la vegetación y, desde el punto de vista técnico, el suelo puede definirse como: “Un cuerpo natural que se encuentra sobre la superficie de la corteza terrestre, conteniendo materia viva y soportando o siendo capaz de soportar plantas” (Ortiz y Cuanalo, 1981). Los suelos con frecuencia no muestran límites bien definidos, ya que en muchos casos se pueden observar variaciones, lo que hace que no se tenga una clasificación tan precisa. La textura del suelo define la proporción relativa de grupos de partículas proporcionando una idea general de las propiedades físicas del suelo.

Los suelos depositados en los valles fértiles han sido producto de la erosión, que en las partes más altas ha dejado al descubierto paisajes de rocas de granito de gran tamaño esparcidas en el paisaje. La textura de los suelos es de relevancia para los procesos de infiltración, siendo más importantes las texturas media y gruesa, en conjunto con la pendiente del terreno y la proximidad a las zonas con mayor posibilidad de almacén y transporte de aguas subterráneas (Del Toro, 2012).

2.2.1 Textura del suelo

La Textura del suelo se refiere a la proporción relativa existente de arenas, limos y arcillas en un suelo, esta característica es importante ya que afecta las propiedades físicas, químicas y biológicas de un sitio. La textura tiene relación con la facilidad con la que se puede trabajar un suelo, esto se refiere a la cantidad de agua y aire que retiene y la velocidad con que el agua penetra en el suelo y lo atraviesa (USDA 1951).

Sabiendo los porcentajes de arenas, limos y arcillas que se encuentran presentes, en cada suelo, se puede clasificar cada suelo según su textura, tal como se observa en la figura 1.

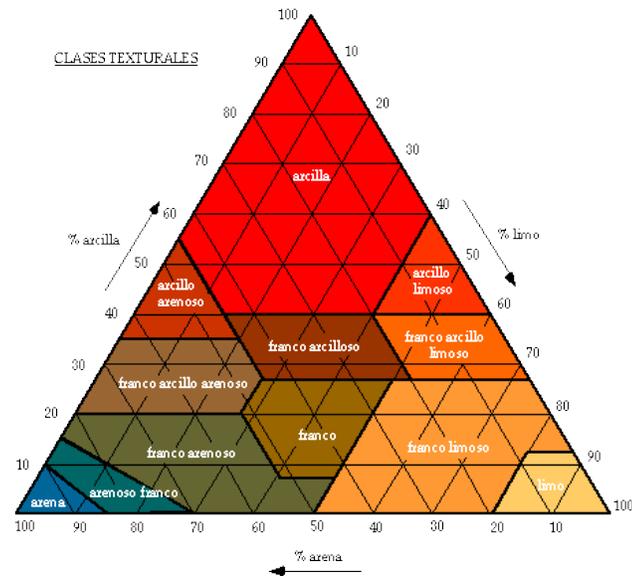


Figura 1. Triángulo textural del suelo basado en la clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA -1951).

Para determinar el tamaño de las partículas se utiliza el método de Bouyoucos (1936), el cual ayuda a estimar el porcentaje de limos, arenas y arcillas que existen en un suelo. Dichos porcentajes se obtienen mediante la separación de las partículas en grados clasificados de acuerdo a su diámetro, que se definen de la siguiente manera:

- A) Arena: se consideran arenas, las partículas comprendidas entre, 0.06-2mm de diámetro.
- B) Limo: se consideran limos a las partículas comprendidas entre 0.004 y 0.06 mm
- C) Arcillas: partículas más pequeñas menores a los 0.004mm

Este método se basa en el principio de análisis granulométrico por densimetría con un hidrómetro de Bouyoucos en una suspensión de suelo colocada en una probeta de sedimentación. La densidad a cierta profundidad va disminuyendo conforme se van sedimentando las partículas, esta densidad se determina con el hidrómetro de Bouyoucos graduado en gramos / litro, calibrado a 20°C, pero pueden realizarse correcciones para mediciones obtenidas a diferentes temperaturas, las velocidades de sedimentación

varían de forma proporcional a su tamaño. Generalmente, el tiempo de lectura se ha seleccionado a los 40 segundos para la separación de partículas mayores de 0.05 mm (arena) y de 2 horas para partículas de diámetro mayores de 0.002 mm (limo y arena). Estos límites han sido establecidos por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos. La lectura tomada a los 40 segundos nos da el porcentaje de arcillas más limos. Restando de 100 se obtiene el porcentaje de arena. La lectura obtenida a 2 horas es igual al porcentaje de arcilla. El porcentaje de limo se obtiene por diferencia. Con los porcentajes de limo, arena y arcilla se determina la textura correspondiente con el triángulo de texturas.

Pueden existir variaciones en las temperaturas de las muestras, ante esto se han establecido las correcciones necesarias tal como se describe a continuación. Se corrigen agregando 0.36 por cada grado centígrado por encima de los 20 °C y restando la misma cantidad cuando las temperaturas son debajo de los 20°C.

2.2.2 Materia Orgánica

La materia orgánica representa, aproximadamente, el 5% en el volumen de un suelo ideal. A pesar de ser un porcentaje relativamente pequeño, su presencia es altamente importante en el crecimiento de las plantas. La adición de residuos orgánicos al suelo, provenientes de plantas y animales y su posterior descomposición por los microorganismos son los dos procesos principales que determinan el nivel de acumulación de materia orgánica en los suelos. Las plantas son la principal fuente de materia orgánica, ya que parte de sus hojas, tallos, flores, frutos y generalmente todo el sistema radical, se quedan en el suelo cuando el cultivo es cosechado. El contenido de materia orgánica total del suelo se puede determinar de varias formas; por calcinación de la muestra de suelo, por oxidación de la muestra con dicromato de potasio y por oxidación con peróxido de hidrógeno (agua oxigenada).

Para este trabajo, el método seleccionado para cuantificar la materia orgánica fue por calcinación. Este método determina el contenido total de materia orgánica que posee el suelo, completo o en alguna de sus fracciones. Debe tenerse presente que con este método se obtienen valores más altos en el contenido de materia orgánica del suelo, ya que con él se volatilizan todas las formas de carbono orgánico (C₂) presentes en la muestra. En este método se pesa una muestra del suelo seco que se coloca en crisoles de porcelana. Se seca el conjunto (la muestra y el crisol) en horno a 105° C hasta peso constante (aproximadamente entre 24 y 48 horas), se retira del horno y se deja enfriar en desecador, luego se pesa.

Se calcina la muestra en una mufla a 650 ó 700° C, durante 3 ó 4 horas. Se retira de la mufla el conjunto, se deja enfriar en desecador y se pesa nuevamente. Se calcula la diferencia de peso entre las medidas antes y después de calcinar; esta diferencia de peso equivale a la cantidad de materia orgánica que se perdió de la muestra por efecto de la calcinación. Se expresa la diferencia de peso en porcentaje (%), con respecto al peso inicial (seca a 105° C) y ese es el porcentaje de materia orgánica que contenía la muestra.

2.3 Fisiología del transporte hídrico en plantas

Las plantas requieren una transportación continua de agua desde el suelo hasta la atmósfera para poder permitir la absorción de bióxido de carbono (CO₂) en las hojas. Debido a la concentración relativamente baja de CO₂ presente en la atmósfera para las plantas, éstas tienen que generar gradientes de concentración para este gas, y esto ocurre en regiones específicas del tejido foliar llamadas criptas estomáticas, las cuales son evaginaciones en la superficie foliar que están limitadas por un par de células llamadas células acompañantes. Estas células permiten la apertura y cierre de un orificio llamado estoma, que permite la comunicación entre las criptas estomáticas y la atmósfera (Evert y Eichorn, 2006). En estas criptas, se genera un ambiente permanentemente humedecido por la evaporación constante de agua proveniente de las células del tejido conocido como parénquima, que tienen una capa de agua que cubre sus membranas para facilitar la disolución del CO₂ atmosférico y su posterior absorción. Esto impone una tensión en los tejidos de conducción hídrica que depende del tipo de planta, de la cantidad de agua en el suelo y de la cantidad de agua en la atmósfera (Cochard, 2014). El potencial hídrico (Ψ) es una referencia del estado de tensión hídrica que mantiene una planta en relación a la tensión del agua pura (0 MPa), mientras más tensionada hídricamente esté la planta, más negativo será este potencial (Tyree y Ewers, 1991).

El potencial hídrico es una medida del estatus hídrico de la planta y su valor depende de la disponibilidad de agua y del aumento o disminución de la cantidad de agua que la planta pierde a través de la transpiración (Taiz y Zeiger, 2006; Scholander, 1964). Por su parte, la conductancia estomática, es un parámetro que se relaciona con la apertura y cierre de los estomas, lo cual permite establecer la cantidad del intercambio de moléculas de agua entre la planta y la atmósfera (Lambers et al., 1998).

3. Materiales y Métodos

Con la finalidad de realizar cada uno de los objetivos planteados en esta tesis, a continuación se describe la metodología que se realizó en cada etapa de análisis y procesamiento de la información. Asimismo, se incluye un cuadro al final de los métodos con las abreviaturas utilizadas para las variables de estudio (Tabla 1).

3.1 Área de estudio

El Viñedo Tres Mujeres, se ubica dentro de la localidad de Francisco Zarco, en el Valle de Guadalupe, B.C., cuenta con una superficie de aproximadamente 1.5 ha (Figura 2). Dentro del área de cultivo se tienen 4 tipos de variedades (Cabernet, Cabernet Sinsaul, Zinfandel y Grenache). La edad de las variedades dentro del sitio va desde los 5 años hasta los 16 años, Cabernet Sinsaul (16 años), Cabernet (14 años), Zinfandel (5 años), Grenache (9 años).

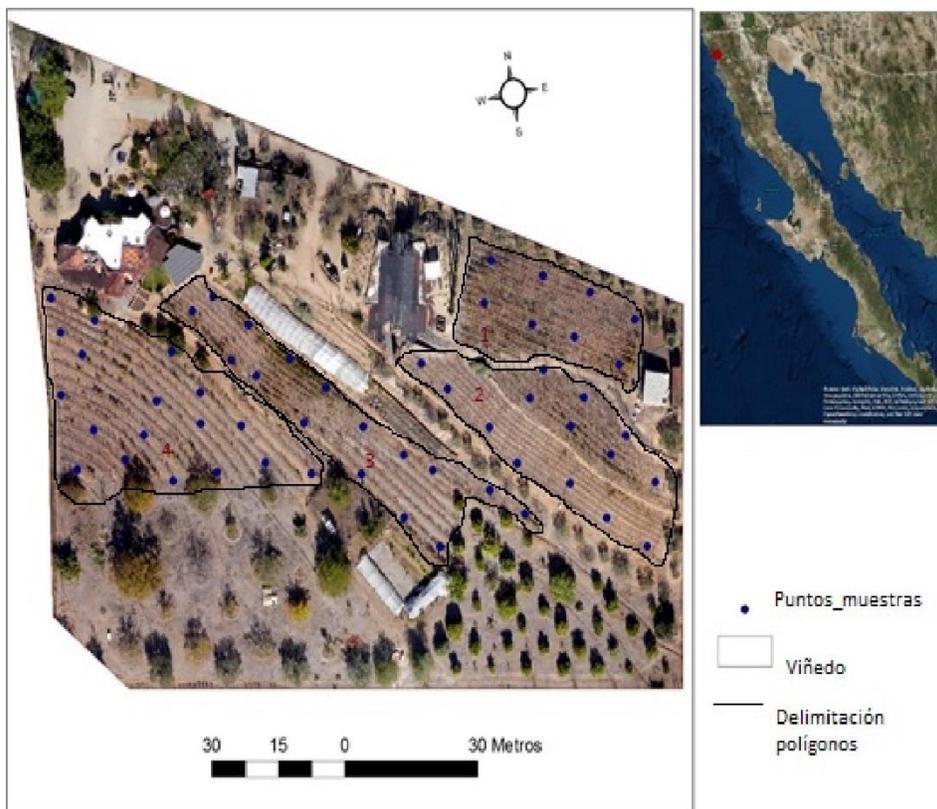


Figura 2. Ortofoto del Viñedo Tres Mujeres obtenida a partir del vuelo de un vehículo aéreo no tripulado el 8 diciembre del 2015 en el Valle de Guadalupe, México. En la parte central se puede observar la distribución de los viñedos enumerados conforme al orden de muestreo. En azul se muestran los puntos de colecta que se seleccionaron para este estudio.

3.1.1 Climatología

Con base a la clasificación modificada por García (2004), el clima del valle de Guadalupe es de tipo semi-árido, subtipo moderado, con una precipitación promedio anual entre los 250 y 300 mm por año, presentándose principalmente en invierno (Diciembre-Marzo) y la temperatura media anual varía de 12°C a 18°C (Kurczyn-Robledo et al. 2007).

3.1.2 Geomorfología

Desde el punto de vista edafológico, en el Valle de Guadalupe los suelos de las partes planas son de origen aluvial, de texturas gruesas del tipo areno-limosa. Los suelos en pendiente suelen presentar otra granulometría, con un mayor componente de arcillas debido a su origen granítico en descomposición.

3.1.3 Especie de estudio

La uva (*Vitis vinifera* L.) es una planta vivaz y trepadora de la familia de las Vitáceas, el tronco, retorcido, tortuoso y de hasta 6m de largo, presenta una corteza gruesa y áspera que se desprende en tiras longitudinales. Las ramas jóvenes, denominadas sarmientos, son flexibles y muy engrosadas en los nudos. Se desarrolla en zonas con climas fríos (Sozzi, 2008). Cuenta con un sistema radical que le permite el anclaje de la planta al suelo, absorción de agua y elemento minerales así como la acumulación de sustancias de reserva. La extensión del sistema radicular depende de la especie, marco de plantación, tipo de suelo y técnicas de cultivo. El 90% del sistema radical se desarrolla por encima del primer metro del suelo, conteniendo la mayor parte entre los 40 y 60 cm de profundidad.

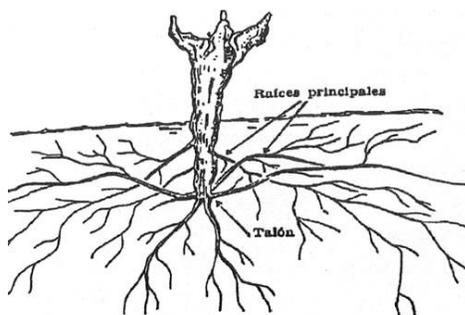


Figura 3. Extensión del sistema radical de *Vitis vinifera* L. (Fuente: Chauvet M. y Reynier A. 1984)

3.2 Cartografía del terreno

Con el objeto de hacer un levantamiento fotogramétrico que permitiera la obtención de un modelo de elevación digital el terreno (MDT) y generar una ortofoto que sirviera de referencia espacial en las tareas de cartografía del terreno, se realizó un vuelo utilizando un UAV (Vehículo Aéreo no Tripulado) tipo hexacóptero (Hexacopter- Modelo B de 3DRobotics) equipado con un piloto automático APM 2.6 de 3DRobotics (Figura 4).



Figura 4. Hexacóptero utilizado para el levantamiento fotogramétrico

3.2.1 Ubicación de puntos de control

Se realizó una visita antes del vuelo con el fin de localizar puntos de control en el terreno los cuales nos ayudarían en el proceso de georreferenciación. Utilizando un Sistema de Posicionamiento Global diferencial con grado de precisión de mapeo (≤ 30 cm), consistente en un receptor Pathfinder ProXH y un datalogger modelo Recon (Trimble Navigation Limited, Sunnyvale CA, USA), se tomaron las coordenadas y altura en cada punto, durante aproximadamente 5 minutos por lectura (Figura 5). Se obtuvieron un total de 8 puntos, por cada punto se dejaba una marca de identificación. Estas marcas servirían para colocar los *targets* de identificación durante el día del vuelo, los *targets* tenían un ancho de 1m para que se pudieran apreciar en la imagen tomada por la cámara del UAV.



Figura 5. Adquisición de puntos de control en el terreno

3.2.2 Vuelo del UAV

El vuelo se realizó el 8 de Diciembre del 2015 pero, antes de iniciar con la toma de las imágenes, en cada punto de control localizado en la primera visita se colocaron *targets* sobre cada uno de estos puntos con el fin de facilitar la georreferenciación (Figura 6). Una vez colocadas estas marcas, se instaló la cámara con la que se tomarían las fotos (Canon Powershot ELPH 115, Ota, Tokyo, Japan) en el hexacóptero. Antes de iniciar el vuelo se tomaba una fotografía con el fin de calibrar y observar que la cámara funcionara adecuadamente.



Figura 6. Targets de identificación por cada punto de control

Se utilizó el software MissionPlanner para poder observar la trayectoria y condiciones de altura, voltaje y consumo de batería. En la Figura 7 se muestra la estación de control utilizada durante toda la misión de vuelo.



Figura 7. Estación de control y monitoreo de la trayectoria del vuelo.

3.3 Suelos

3.3.1 Determinación del número de muestras

Para obtener el número de muestras necesarias para cubrir toda la zona de cultivo se trabajó en el software ArcMap 10.4.1 (Environmental Systems Research Institute, Redlands, California, USA.). Lo primero que se realizó fue agregar una imagen del sitio de estudio obtenida de Google Earth del año 2011 (Keyhole Inc., Mountain View, California, Estados Unidos). Con esta imagen como base se creó un *shapefile* de tipo polígono para delimitar el sitio de estudio, una vez delimitado se crearon tres *shapefile* de tipo polilínea en los que se trazaron cuadrículas de 5 x 5, 7 x 7 y 10 x 10 metros. Como no existía una separación entre la zona de cultivo y el resto del terreno se trazó un nuevo polígono que incluía las cuatro zonas que contenían plantas de vid, se superpusieron los polígonos de cultivo y las cuadrículas generadas para contabilizar el número de intersecciones que se tenían por cada sección. Al final se seleccionó el escenario con cuadrículas de 10 x 10 metros, obteniendo un total de 60 intersecciones con base en el tiempo estimado de trabajo que se había realizado en un experimento preliminar realizado en 6 plantas de vid, el cual se describe posteriormente en la parte de fisiología.

Ya que se tenían localizados los puntos se obtuvieron las coordenadas y se agregaron a un GPS (Garmin, Etrex 30). Posteriormente se fue al sitio para localizar y marcar los puntos. Se tuvo un error de precisión al momento de la localización de cada punto de unos cinco metros del punto identificado en el software, aproximadamente, por lo que se tuvo que reajustar el muestreo, tratando de mantener las mismas distancias de 10x10 metros. Para esto se utilizó un medidor de distancia laser (Nikon Vision Co., LTD, ProStaff Laser 440) donde una persona se quedaba en un punto fijo y otra persona caminaba en línea recta hasta llegar a los diez metros, con el GPS se tomaba la nueva coordenada y se colocaba una bandera con un número de identificación. Se obtuvieron un total de 56 puntos en toda la zona de viñedos. Con un GPS diferencial (Pathfinder ProXH, Trimble Navigation Limited, Sunnyvale CA, USA) se visitó de nuevo el sitio, en cada punto se procedió a tomar las coordenadas y altura para de esta manera poder desplegar las nuevas coordenadas en el software y poder obtener una ubicación más precisa de los puntos de muestreo. Por cada punto se tomó un tiempo de dos minutos de recepción de información en el GPS diferencial.

3.3.2 Recolección de Muestras

En cada punto se realizaron excavaciones con una pala y un barreno para suelos hasta una profundidad de aproximada de 40 cm. Una vez que se extraía el suelo, se les retiraba todo tipo de materia orgánica visible y se agregaba a un recipiente de medio litro, esto se hizo con el fin de llevar un control del volumen de suelo que se tomaba por punto. Después las muestras de suelo se guardaban en bolsas de plástico con sello (Ziploc, C Johnson, Rancine WI, USA), colocándoles una etiqueta de identificación con el número de punto, fecha y polígono correspondiente. Después de extraer las muestras, se transportaron al laboratorio para separarlas por número de polígono y determinar las siguientes variables: conductividad eléctrica, pH, materia orgánica y textura del suelo.

3.3.3 Análisis de Laboratorio

3.3.3.1 Medición de pH

La determinación del pH del suelo se llevó a cabo utilizando un potenciómetro (A221 Orion Star portable, Thermo Scientific, Beverly, MA, EUA), el cual se calibró introduciendo el electrodo en buffers de 4.7 y 10 para mantener calibrado el sensor de pH. Una vez calibrado el potenciómetro, se midió el pH del agua destilada que se utilizó para realizar las soluciones. Las mediciones se iniciaron en el polígono 4, 3, 2 y 1, respectivamente, ya que este fue el orden en el que se extrajeron las muestras en campo. De cada una se tomaron aproximadamente diez gramos de suelo y se depositaron en vasos de precipitados de 80 ml, se les agregó agua destilada y se agitaron por un minuto con el fin de homogeneizar y eliminar conglomerados que pudieran existir. Cada vez que se realizaba una nueva medición se enjuagaba el electrodo con agua destilada para evitar llevar residuos y obtener mediciones erróneas.

3.3.3.2 Medición de conductividad eléctrica

Para medir la conductividad de las muestras se calibró el equipo (A122 Orion Star, Thermo Scientific,) introduciendo el sensor en un buffer de calibración (Orion Application Solution), se siguió la misma metodología de análisis que en el pH, midiendo primero la conductividad eléctrica del agua destilada que se utilizó para después iniciar mediciones de las muestras comenzando con el polígono 4,3,2 y 1. Se tomaron diez gramos de cada muestra para agregarlas a vasos de precipitados de 80 ml con agua destilada, se agitaron con el fin de homogeneizar las muestras y disolver las sales que pudieran existir en el suelo.

Cada vez que se cambiaba de muestra se enjuagaba el sensor para evitar llevar residuos. Este proceso se realizó en siete sesiones con ocho muestras de suelo.

3.3.3.3 Determinación de textura del suelo

La textura se determinó tomando la mitad del volumen de suelo colectado para cada punto de colecta, dejando el resto como muestra testigo. Las muestras se colocaron en envases de plástico de un litro, agregándoles peróxido de hidrógeno al 10% hasta la mitad de cada envase. Las muestras se agitaron con una espátula para generar una mayor reacción y se dejaron reposar por 24 horas. Después de este lapso se les agregó agua y se agitaron por un minuto, se dejaron reposar hasta que los sedimentos se fueron al fondo de los recipientes. Cada muestra se decantó con el fin de eliminar materia orgánica como hojarasca y raíces que pudieran llevar. Después de este proceso las muestras se introdujeron a una estufa de secado a 105° C por otras 24 horas con el fin de eliminar la humedad. Ya que se encontraban secas se retiraron de la estufa y se dejaron enfriar por una hora para después homogeneizar mediante una agitación por un minuto en cada muestra. Después de esto se pesaron 100 gramos de suelo por cada punto y se les agregó 100 ml de hexametáfosfato de sodio dejándolas reposar por otras 24 horas. Este proceso se realizó en cuatro sesiones procesando 14 muestras a la vez.

Finalmente, para obtener los porcentajes de limos, arenas y arcillas, se hizo la cuantificación de textura por el método de Bouyoucos. Para esto se colocaron ocho probetas de 1000 ml sobre una mesa de trabajo, siete de las cuales contenían muestras de suelo y una más funcionó como blanco ya que solo tenía el hexametáfosfato de sodio y agua destilada. Al blanco se le midió la temperatura y se le introdujo un hidrómetro de Bouyoucos (ASTM 152-H), el cual se dejó durante todo el proceso de análisis. Para el resto de las muestras se tomó la probeta y se le colocó un tapón para agitarlas por un minuto, esto con el fin de que se mezclaran. Después de agitar la solución se volvió a colocar la probeta en la mesa y a los 40 segundos se tomó la primera medición de densidad relativa con el hidrómetro y simultáneamente se midió la temperatura, la segunda medición se registró a las dos horas realizando el mismo procedimiento de medición con el hidrómetro y termómetro. Se realizaron ocho sesiones de trabajo, cada una con siete muestras del suelo y un blanco.

3.3.3.4 Contenido de materia orgánica

Se pesaron diez gramos de suelo de cada muestra en una balanza analítica (AB204, Mettler Toledo, Greifensee, Suiza). En la misma balanza se pesaron los crisoles de porcelana que se utilizaron y se registraron los pesos para llevar un control de los datos. Las muestras se introdujeron en estufa de secado (Fisher Isotemp, 500 series, Pittsburgh, PA, EUA) a 105° C por 24 horas, transcurridas las 24 horas las muestras se sacaron de la estufa y se colocaron en un desecador mientras se enfriaban, después de media hora se volvieron a pesar y se metieron a la mufla (2-525, J.M. NEY furnace, Tucson, AZ, EUA) a 280° C por tres horas. Una hora después se volvieron a pesar para tener el último peso y poder calcular el porcentaje de materia orgánica. Este proceso se realizó en cuatro sesiones con 14 capsulas para las 56 muestras.

El cálculo de contenido de materia orgánica se realizó tomando como base la siguiente ecuación.

$$\left[\frac{P1-P2}{Pm} \right] \times 100$$

Donde:

P1 es el peso de la estufa

P2 es el peso de la mufla

Pm es el peso de la muestra

100 es el porcentaje

3.4 Fisiología del transporte hídrico en plantas

Los análisis fisiológicos se realizaron en 56 plantas seleccionadas lo más cercano posible a los puntos donde se extrajeron las muestras del suelo.

3.4.1 Experimento preliminar

Este experimento se llevó a cabo con el objetivo de evaluar las condiciones del equipo y a su vez establecer el tiempo de traslado del sitio de estudio al laboratorio y el esfuerzo realizado en cada medición. Se seleccionaron seis plantas de vid de forma aleatoria dentro del viñedo en el que no se tomó en cuenta la variedad, edad o ubicación. A cada planta se le midió conductancia estomática (g_s) y potencial hídrico (Ψ). En el viñedo se realizó la medición de g_s y se colectaron las muestras que se llevaron a laboratorio para realizar las mediciones de Ψ . En laboratorio se desempacaron las muestras y se enlistaron conforme el orden asignado en campo, a cada muestra se le midió Ψ de tallo y hoja. Al finalizar el experimento, para los análisis en seis plantas, se empleó un tiempo de trabajo de aproximadamente seis horas, todo esto entre el arribo al viñedo, mediciones de g_s , colecta de muestras, traslado al laboratorio y mediciones de Ψ .

3.4.2 Determinación del potencial hídrico

La medición del potencial hídrico (Ψ) se llevó a cabo utilizando una cámara de presión modelo 1505D (PMS Instruments, Albany, OR, USA). Las mediciones se realizaron antes del amanecer (momento de menor estrés hídrico, aproximadamente entre 5 y 7 am) y a medio día (momento de mayor estrés hídrico, aproximadamente entre 11 y 1 pm) utilizando ramas de aproximadamente 35 cm con hojas totalmente extendidas y sanas (segmento de tallo con al menos dos hojas). Para cuantificar el potencial hídrico de los tallos, una rama terminal con al menos dos hojas por individuo fue previamente embolsada, se exhaló en el interior de cada bolsa y una vez cerrada se dejaron estabilizar por un lapso de 15-20 minutos, mientras que otra rama se dejó transpirar libremente para calcular el potencial hídrico de la hoja (Melcher et al., 2001). Transcurrido el tiempo de espera, se marcaban colocando el número de planta para después cortarlas y transportarlas a un espacio que se utilizó como laboratorio al interior del viñedo, donde se contaba con un pequeño sistema basado en un microscopio, una fuente de luz y un tanque de nitrógeno acoplado a la cámara de presión. Sobre una tabla de madera se colocaron las muestras desprendiendo

una hoja de las embolsadas y otra de las que se encontraban expuestas, a cada una se le cortó por el peciolo con una navaja. El peciolo de la hoja se insertó en el centro del empaque de la tapa de la cámara de presión (Figura 8) de tal forma que sobresaliera unos tres centímetros en el exterior de la cámara y se pudiera observar con el microscopio como la savia era expulsada del tallo en forma de gota sobre el corte, mientras que el resto de la hoja se quedaba en el interior del aparato ajustándola de tal manera que permitiera sellar todo el sistema dentro de la cámara y no existieran fugas del gas, después se procedió a inyectar gas gradualmente para evitar pasarse del momento de cuantificación del potencial de presión, esto es la presión en la cual se observa una gota de agua saliendo por el peciolo (punto de compensación) (Scholander et al., 1965). Al llegar a este punto se tomaba la lectura que arrojaba el manómetro (en Megapascales, MPa) y este valor se anotaba en la tabla de datos. Finalmente se dejaba salir el aire que pudiera quedar en el interior de la cámara y de esta manera se continuaba con una nueva medición, por cada planta se realizaron dos mediciones, una del Ψ de la hoja y una del Ψ del tallo.



Figura 8. Peciolo de la hoja ingresado dentro del empaque de la cámara de presión

3.4.3 Conductancia estomática

Adicional a las mediciones de potencial hídrico se cuantificó la conductancia estomática (g_s) con el porómetro foliar SC-1 (Decagon Devices Inc, Pullman, WA, USA) (Figura 9). Esta medición se realizó a medio día (momento de mayor transpiración, aproximadamente entre las 11am y 1 pm). El equipo se calibró cada día antes de iniciar con las mediciones, este proceso tardaba unos 15 minutos, después se iba a cada la planta y se tomaba la hoja más extendida y con mayor exposición al sol. Con un papel se limpiaba la zona que se iba a medir y se colocaba el sensor en la parte abaxial de la hoja (cara opuesta al sol) evitando realizar la medición sobre el nervio principal de la hoja. Se esperaban aproximadamente dos minutos en lo que se registraban las lecturas, mientras esto pasaba se medía la temperatura y humedad relativa debajo de la hoja con un termohidrómetro (Traceable Humidity/ Temperature Pen, Thomas Scientific, Swedesboro, NJ, EUA).



Figura 9. Medición de la conductancia estomática en *Vitis vinífera* L. a medio día

3.4.4 Medición de la densidad foliar

La medición del índice de densidad foliar se llevó a cabo el 23 de mayo, empezando a las 5 am y terminando a las 7 am. Se utilizó el analizador del dosel vegetal y medidor del índice de área foliar LAI-2200C (LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska USA 68504). Se colocaba el aparato sobre cada planta y debajo de cada una con el fin de obtener dos imágenes por planta, las cuales denominamos A y B respectivamente, una de las cuales proporcionaba una imagen de la cantidad de radiación solar obtenida a cielo abierto y la otra proporcionaba la cantidad de radiación solar interceptada por cada planta. Con base en la diferencia en la cantidad de luz determinada por cada fotografía, se obtuvo la densidad foliar por individuo.

3.4.5 Ciclo Circadiano

Para conocer la variabilidad circadiana (esto es, en un período de 24 horas) en g_s y Ψ , se cuantificaron estas variables en seis plantas de vid localizadas en el polígono 1 (*V. vinifera* var. *Grenache*) cada dos horas a lo largo de un ciclo de 24 horas. Un día antes de iniciar el ciclo se visitó el sitio y se marcaron las plantas que se iban a monitorear. Las mediciones se realizaron cada 2 horas iniciando el ciclo a las 10:30 am. Para medir Ψ se seleccionaba una hoja de cada planta y se embolsaba exhalando en ella. Al igual que en las mediciones anteriores se dejaron embolsadas por lapso de 15-20 minutos. Mientras se esperaba que trascurriera el tiempo para cortar las hojas se medía la conductancia estomática; pero en este experimento, a diferencia del muestreo de las 56 mediciones, en estas nuevas plantas se escogió una hoja que se pudiera identificar fácilmente, ya que en esa misma hoja se realizarían las mediciones durante todo el ciclo.

3.5 Análisis estadísticos y cartografía

Los análisis estadísticos y la interpolación de los datos para obtener los mapas por variable se hicieron con dos programas. Para la estadística inferencial y las pruebas de hipótesis se utilizó JASP, un programa de estadística bayesiana en un formato libre. En este paquete se realizaron las comparaciones entre polígonos y se realizaron las asociaciones entre variables por medio de análisis de varianza (ANOVAS) y correlaciones entre variables. Se realizaron comparaciones entre polígonos, variedades y edad de la planta para las variables independientes de suelo y fisiología.

3.5.1 Interpolación espacial

Se realizó interpolación espacial para cada variable de interés en el programa ArcMap 10.4.1 (Environmental Systems Research Institute, Redlands, California, USA.). Con los datos ya procesados y organizados en una base de datos se procedió a realizar el cálculo de Empirical Bayesian Kriging con el objetivo de obtener mapas de la distribución de los datos. El Kriging es una técnica que permite hacer inferencias sobre puntos en un espacio no estudiados a partir de una retícula de puntos estudiados. El Kriging Bayesiano es útil para establecer los patrones de interpolación cuando el número de puntos de muestreo es inferior a 100, por lo cual se seleccionó esta técnica de interpolación. Con base en los resultados arrojados por el Kriging, se procedió a generar cartografía para cada variable de suelo y vegetación.

Tabla 1. Variables y unidades empleadas en este estudio

| Abreviatura | Significado |
|-------------|-----------------------------|
| MPa | Megapascal |
| Ψ | Potencial hídrico |
| g_s | Conductancia estomática |
| CE | Conductividad eléctrica |
| UAV | Vehículo aéreo no tripulado |
| LAI | Índice de área foliar |
| M.O. | Materia orgánica |
| MDT | Modelo digital del terreno |

4. Resultados

4.1 Cartografía del terreno

Con las imágenes obtenidas del vuelo se generó la ortofoto del sitio de estudio y se obtuvo un Modelo Digital del Terreno. Dada la altura de vuelo y las características de la cámara, la resolución espacial del MDT fue de 4 cm/píxel (Figura 10).

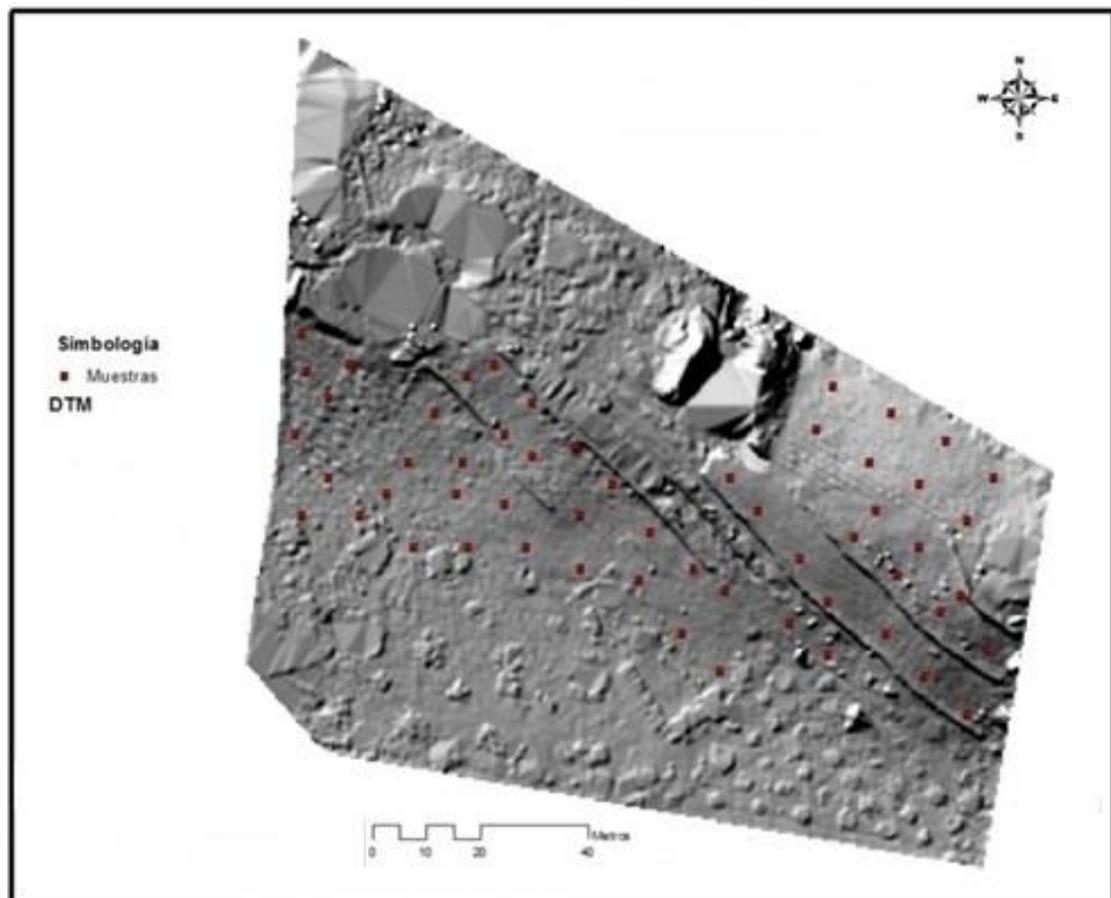


Figura 10. Modelo Digital del Terreno generado a partir de las imágenes RGB obtenidas por medio de un vehículo aéreo no tripulado en el Viñedo Tres mujeres, en diciembre del 2015 el Valle de Guadalupe, BC México. En puntos rojos se observan los puntos en el terreno de donde se extrajeron las 56 muestras de suelo y las 56 mediciones de potenciales hídricos y conductancia estomática.

En el sistema de información geográfico se evaluaron los patrones de escorrentía. Para este viñedo, los órdenes de corrientes del flujo siguen un patrón reticular, se observa que el valor máximo fue de 4, en la parte central del viñedo, donde había una zanja en la fecha en que se realizó el vuelo (Figura 11). Entre mayor sea en número de ordenes encontrados en un terreno nos indica un drenaje más eficiente que permitirá una mejor infiltración del agua.



Figura 11. Mapa del orden de corriente de agua superficial generado a partir del Modelo Digital del terreno (DEM) del Viñedo Tres Mujeres. Se encontraron corrientes de 1er, 2do, 3er y 4to orden, en azul se observa el orden de corriente con mayores uniones mientras que en verde observamos pequeños canales que no tienen ningún tributario (aporte).

Adicionalmente, se calculó la variación en pendientes para conocer cuáles son las zonas con mayor inclinación dentro del terreno (Figura 12). Con excepción de los edificios, se observa que hay zonas de mayor pendiente en la superficie del polígono 2 y 3.

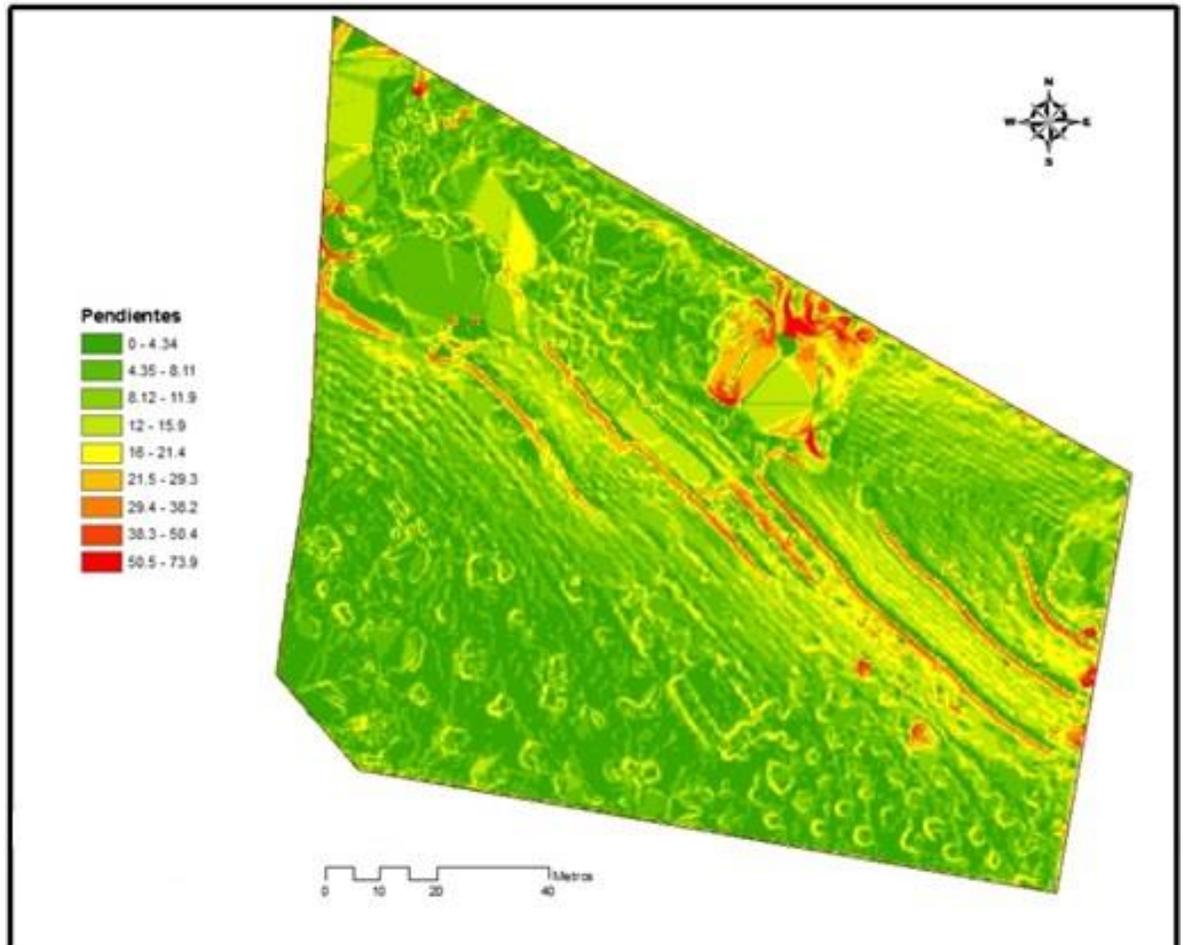


Figura 12. Mapa del cálculo de pendientes obtenido a partir del Modelo Digital del Terreno del sitio de estudio. En rojo se observan los valores más altos dentro del sitio de estudio.

4.2 Suelos

Basados en los cálculos obtenidos de la clasificación textural del suelo del sitio de estudio, se encontró que la mayor parte del terreno contiene un tipo de suelo Franco Arenoso tal como se observa en la imagen inferior (Figura 13).

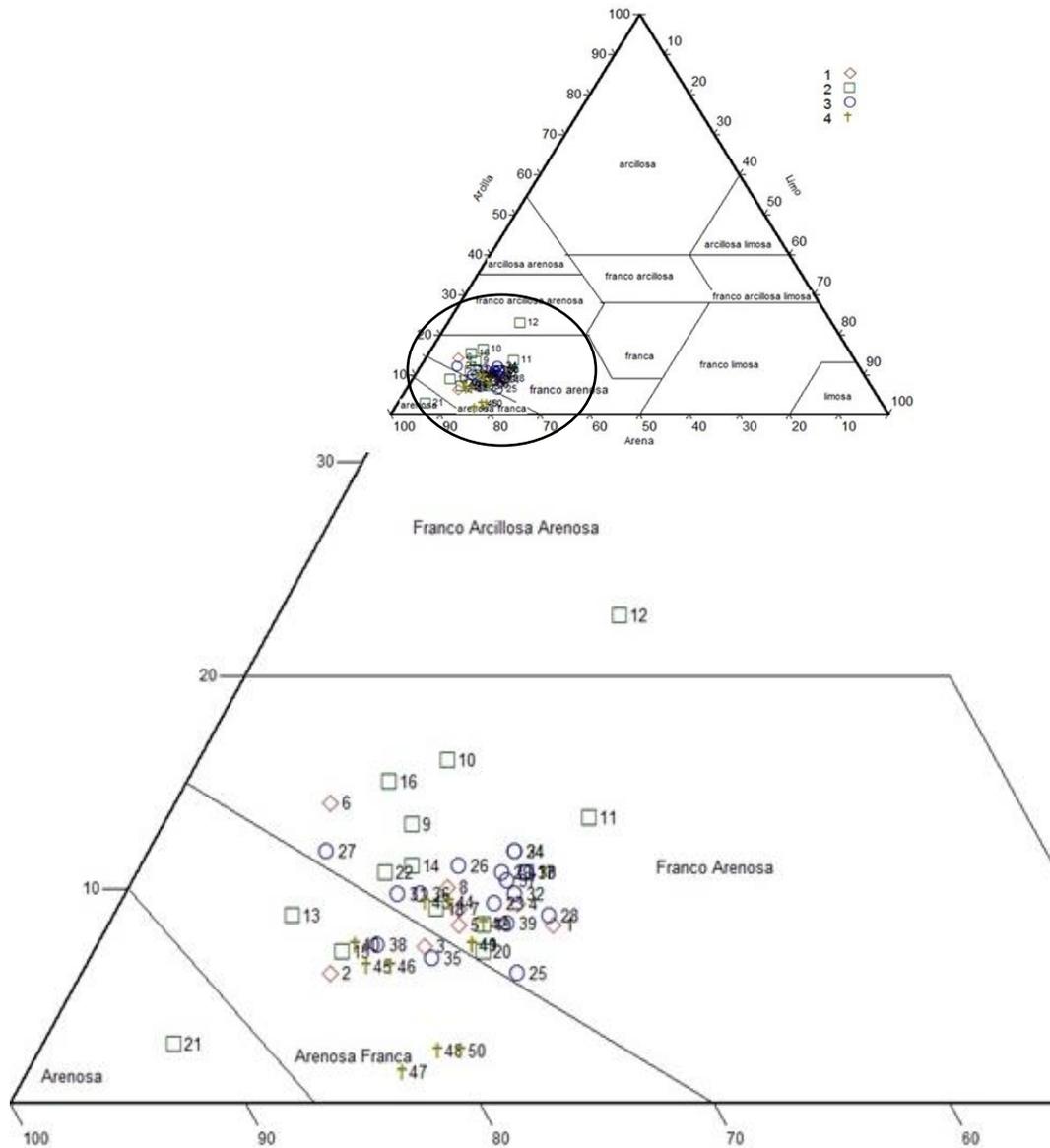


Figura 13. Clasificación del suelo del Viñedo Tres Mujeres obtenido a partir de los análisis de textura realizados a los 56 puntos recolectados en sitio de estudio. Los números asignados a cada figura corresponden al orden de muestreo asignado a cada polígono dentro del terreno.

4.3 Fisiología

Para las 56 plantas muestreadas se encontró que existe una alta correlación entre la conductancia estomática y el potencial hídrico con los datos obtenidos a partir del ciclo circadiano. Las relaciones encontradas entre las variables medidas con una alta correlación se dieron entre M.O., potencial hídrico, conductancia estomática y porcentaje de limos contra el número de polígono, edad de la planta y variedad tal y como se observa en cada uno de las ANOVAS generadas. Se encontró que el Ψ del tallo a medio día variaba en función del polígono (Figura 14), así como en función de la edad de las plantas (Figura 15).

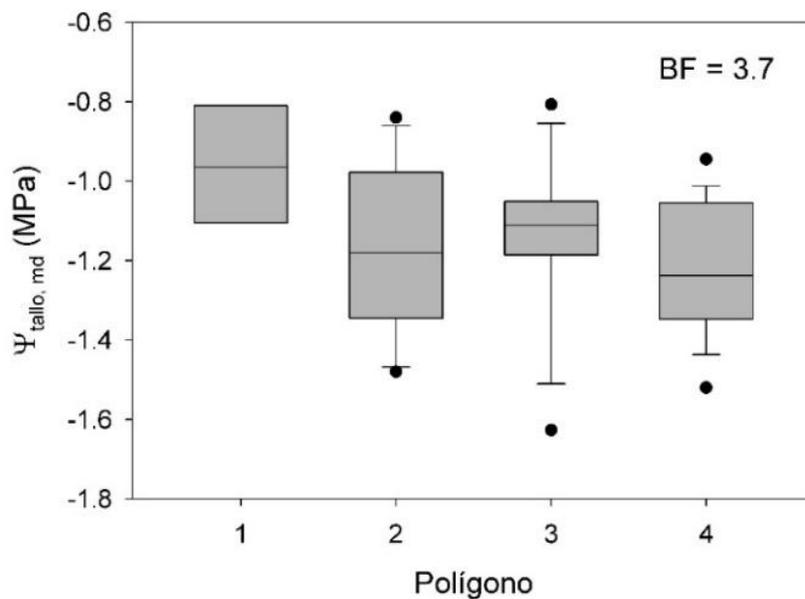


Figura 14. Variación en el potencial hídrico del tallo a medio día por polígono, en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe, B.C. México. Se utilizó un análisis de varianza Bayesiano, donde BF es la razón entre la probabilidad de la ocurrencia de la hipótesis alternativa (al menos un tratamiento es diferente) sobre la nula (los tratamientos son iguales).

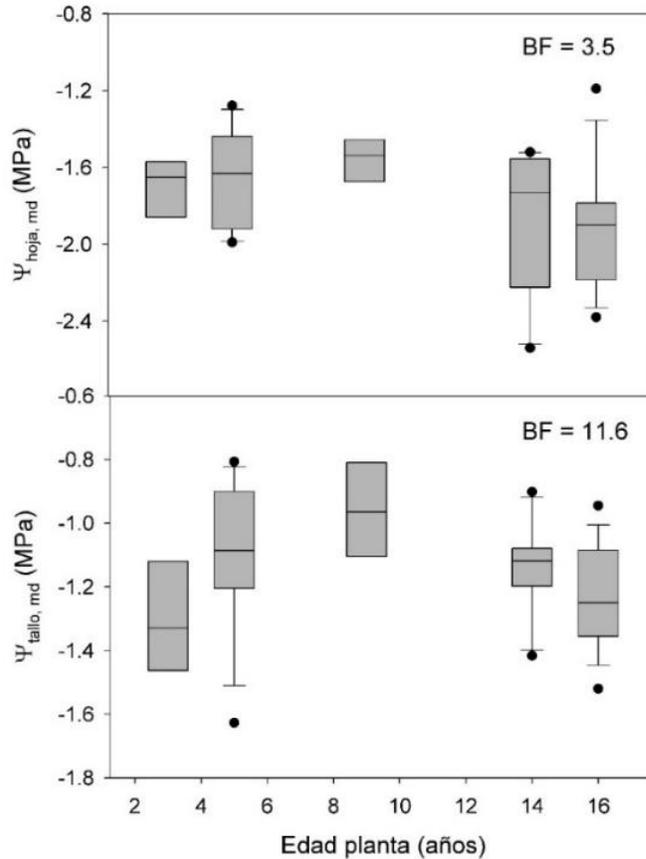


Figura 15. Variación en potenciales hídricos de tallo y hoja a medio día por edad de planta, en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe, B.C. México. Se utilizó un análisis de varianza Bayesiano, donde BF es la razón entre la probabilidad de la ocurrencia de la hipótesis alternativa (al menos un tratamiento es diferente) sobre la nula (los tratamientos son iguales).

También se encontró que la conductancia estomática (g_s) y el contenido de materia orgánica y limos fue diferente entre los polígonos, donde el polígono 1, el cual tenía menor pendiente, fue el que mayor contenido de materia orgánica tuvo, así como el cual en el que las plantas tuvieron mayor g_s (Figura 16).

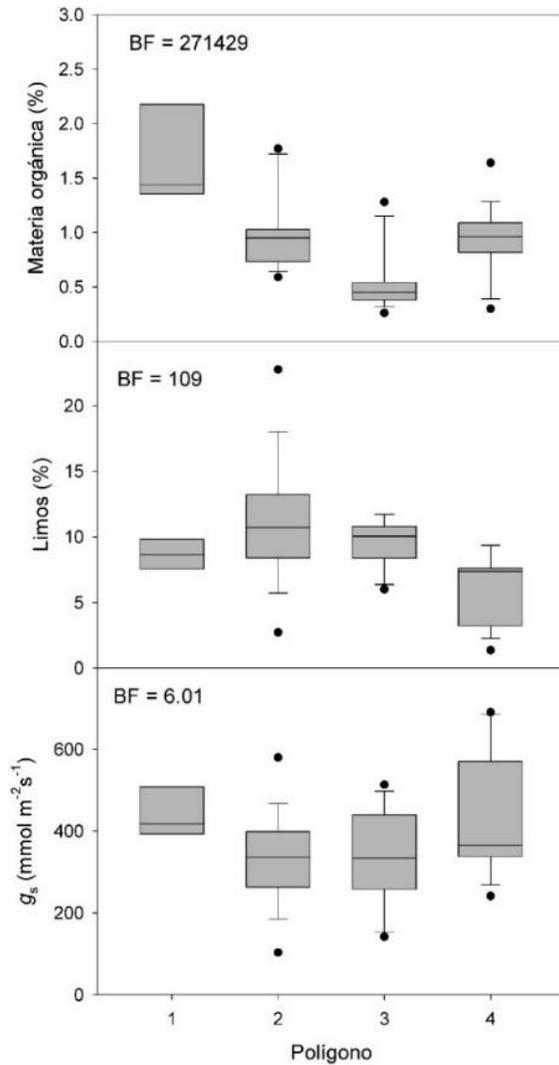


Figura 16. Análisis de la variación del contenido de materia orgánica y porcentaje de Limos en suelo y de la conductancia estomática foliar por polígonos, en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe, B.C. México. Se utilizaron análisis de varianza Bayesianos, donde BF es la razón entre la probabilidad de la ocurrencia de la hipótesis alternativa (al menos un tratamiento es diferente) sobre la nula (los tratamientos son iguales).

Respecto a la relación entre el potencial hídrico y el tipo de varietal, se encontró que la Cabernet tenía los potenciales más negativos, mientras que Grenache tenía los más cercanos a cero. Esto puede ser consecuencia de un efecto confundido entre la variedad y la variación en pendiente, pues en este viñedo Grenache sólo es cultivado en el polígono 1 (el polígono de menor pendiente), mientras que Cabernet y Cabernet Sauvignon son cultivados en el polígono 2 y 3 (los polígonos de mayor pendiente; Figura 17). Del mismo modo, se encontró que las plantas más jóvenes presentaron menor g_s respecto a plantas de mayor edad (Figura 18), pero las plantas jóvenes han sido plantadas en sitios con mayor pendiente.

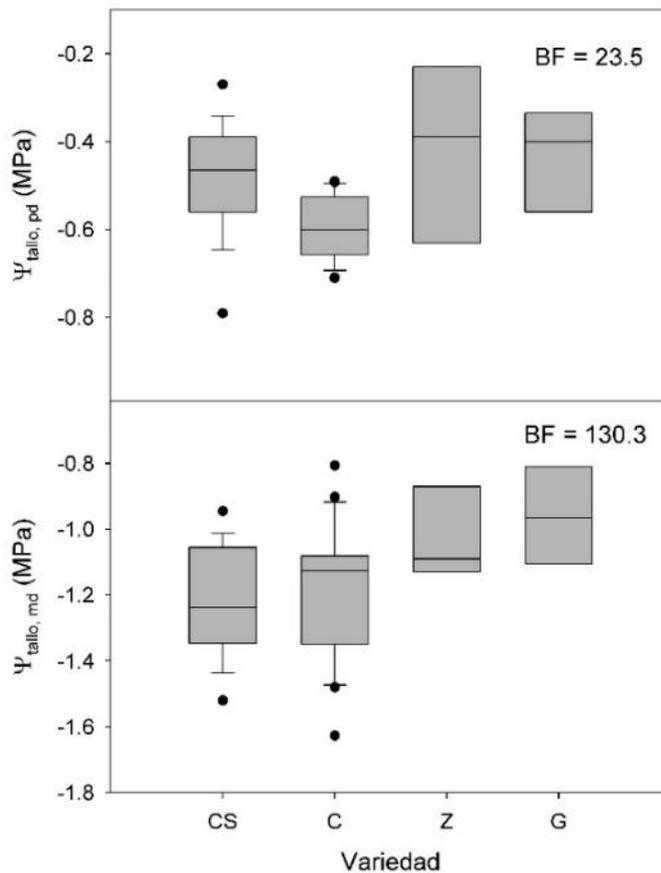


Figura 17. Análisis de la Variación de potenciales hídricos del tallo antes del amanecer y a medio día para cuatro variedades de *V. vinífera*, en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe, B.C. México. Se utilizaron análisis de varianza Bayesianos, donde BF es la razón entre la probabilidad de la ocurrencia de la hipótesis alternativa (al menos un tratamiento es diferente) sobre la nula (los tratamientos son iguales).

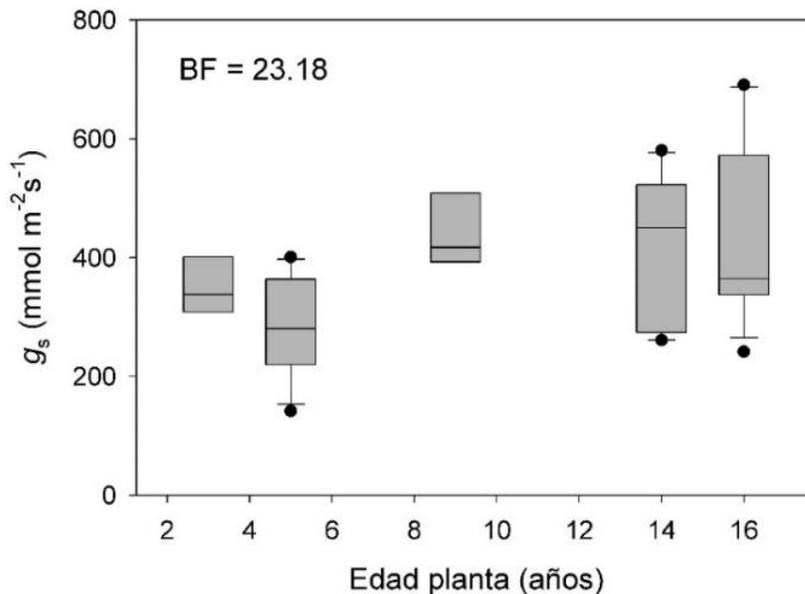


Figura 18. Análisis de la Variación de conductancia estomática entre las 5 edades de *V. vinífera*, en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe, B.C. México. Se utilizaron análisis de varianza Bayesianos, donde BF es la razón entre la probabilidad de la ocurrencia de la hipótesis alternativa (al menos un tratamiento es diferente) sobre la nula (los tratamientos son iguales).

Con relación a la variación en Ψ y g_s a lo largo del día, se observó que las plantas variaron en ambos caracteres de manera equivalente. Durante la noche, a partir de aproximadamente las 21 hrs, los niveles de g_s fueron constantemente inferiores a 60 mmol/m²s, y los valores de Ψ fueron superiores a 0.5 MPa. Esto se mantuvo hasta aproximadamente las 07:00 hrs, en el momento que comenzó a incrementar la g_s hasta alcanzar un máximo de ca. 300 mmol/m²s a medio día, mientras que el potencial hídrico recapituló este patrón, disminuyendo hasta -1.4 MPa a medio día (Figura 19). La variación de ambos caracteres estuvo muy asociada entre sí, con un valor de coeficiente de correlación de 0.96 (Figura 20).

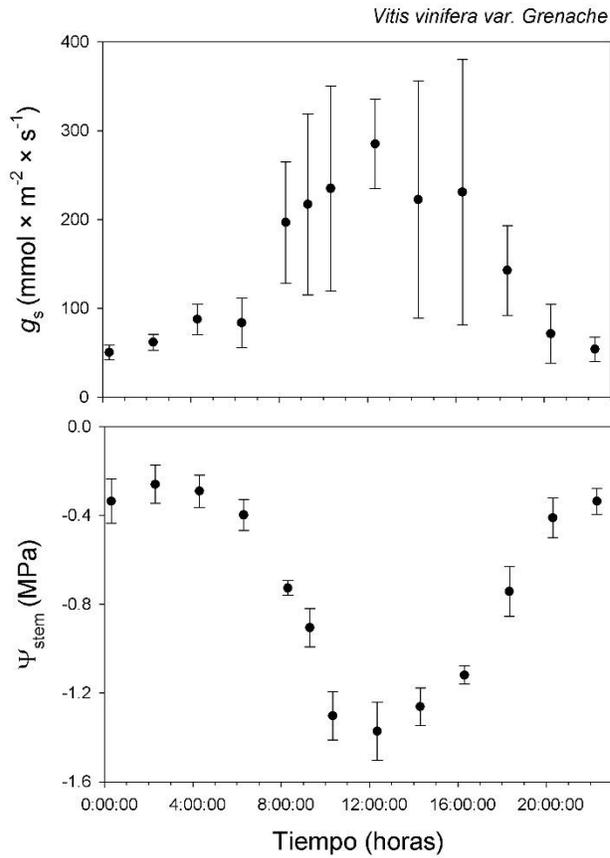


Figura 19. Promedio y error estándar para el potencial hídrico y conductancia estomática de seis individuos de *Vitis vinifera*, var. Grenache a lo largo de un lapso de 24 horas, en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe, B.C. México.

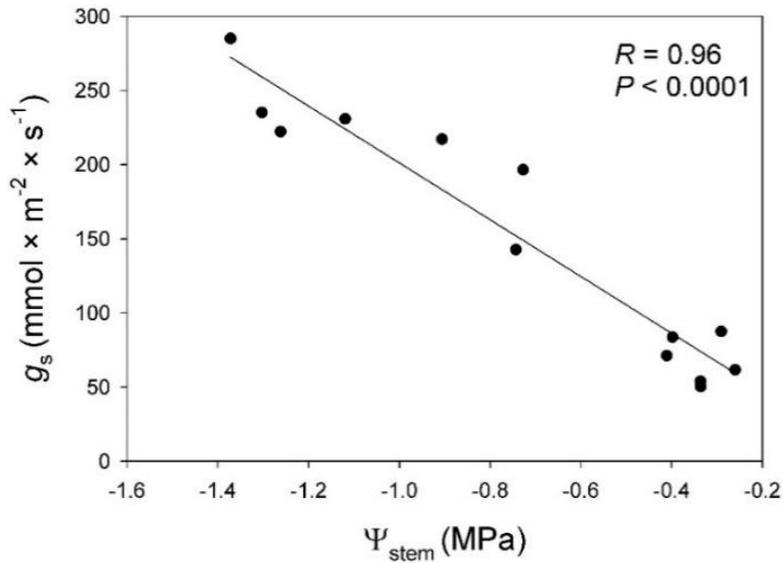


Figura 20. Correlación entre conductancia estomática y potencial hídrico del tallo en *Vitis vinifera* var. Grenache, en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe, B.C. México. Los datos para esta correlación provienen de los promedios de seis plantas a lo largo de un ciclo de medición de 24 horas.

4.4 Interpolación espacial (Kriging)

A partir de Los análisis estadísticos de interpolación de los datos tomados en campo, se generó cartografía para mostrar la variación de cada carácter estudiado, como se observa en la Figura 21 para el pH:

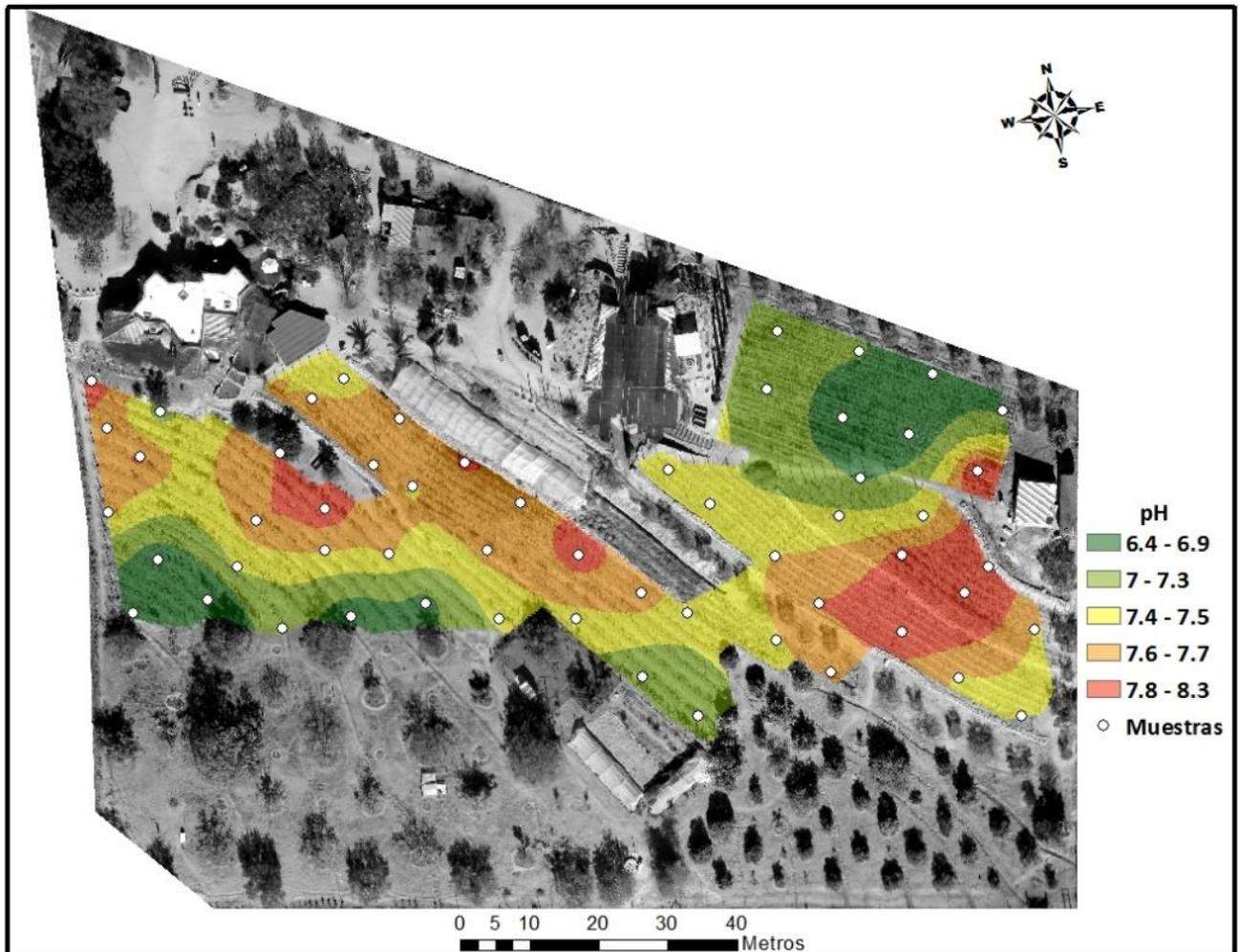


Figura 21. Mapa de interpolación espacial de los valores de pH para 56 muestras del suelo del viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe. En rojo se observan los valores de pH asociados a suelos alcalinos, mientras que en colores más verdes la asociación con suelos ácidos.

Este procedimiento se realizó para la conductividad eléctrica (Figura 22), contenido de materia orgánica (Figura 23), para los porcentajes de arenas, limos y arcillas (Figuras. 24, 25 y 26, respectivamente), para los valores de g_s (Figura 27) y para los valores de Ψ , para hoja y tallo a preamanecer (Figuras 28 y 29) y para hoja y tallo a medio día (Figura 30 y 31).

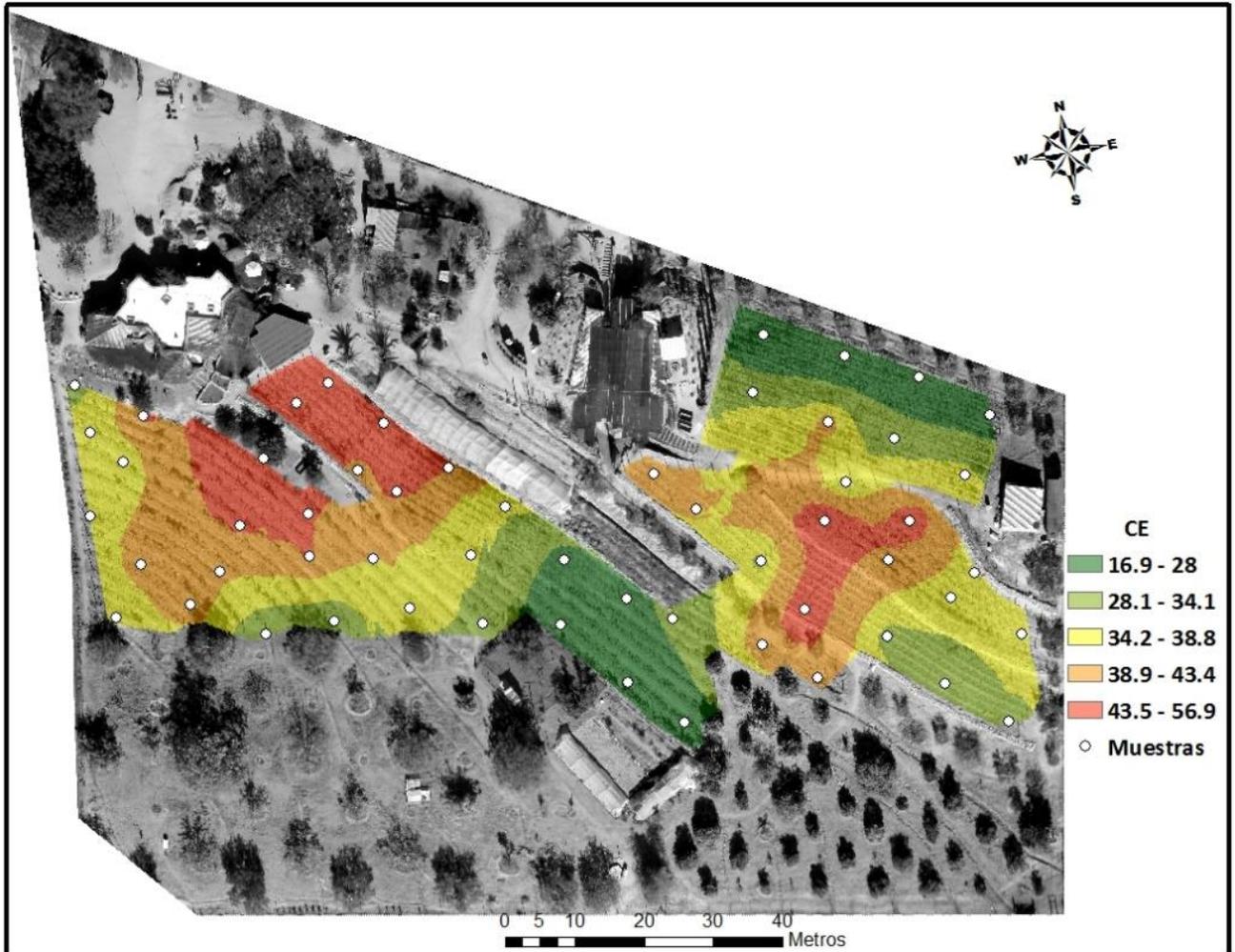


Figura 22. Mapa de interpolación espacial de los valores de conductividad eléctrica (CE) obtenidos de 56 muestras de suelo en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe. En rojo se observan las muestras con mayor conductividad y en verde las que tuvieron menor conductividad.

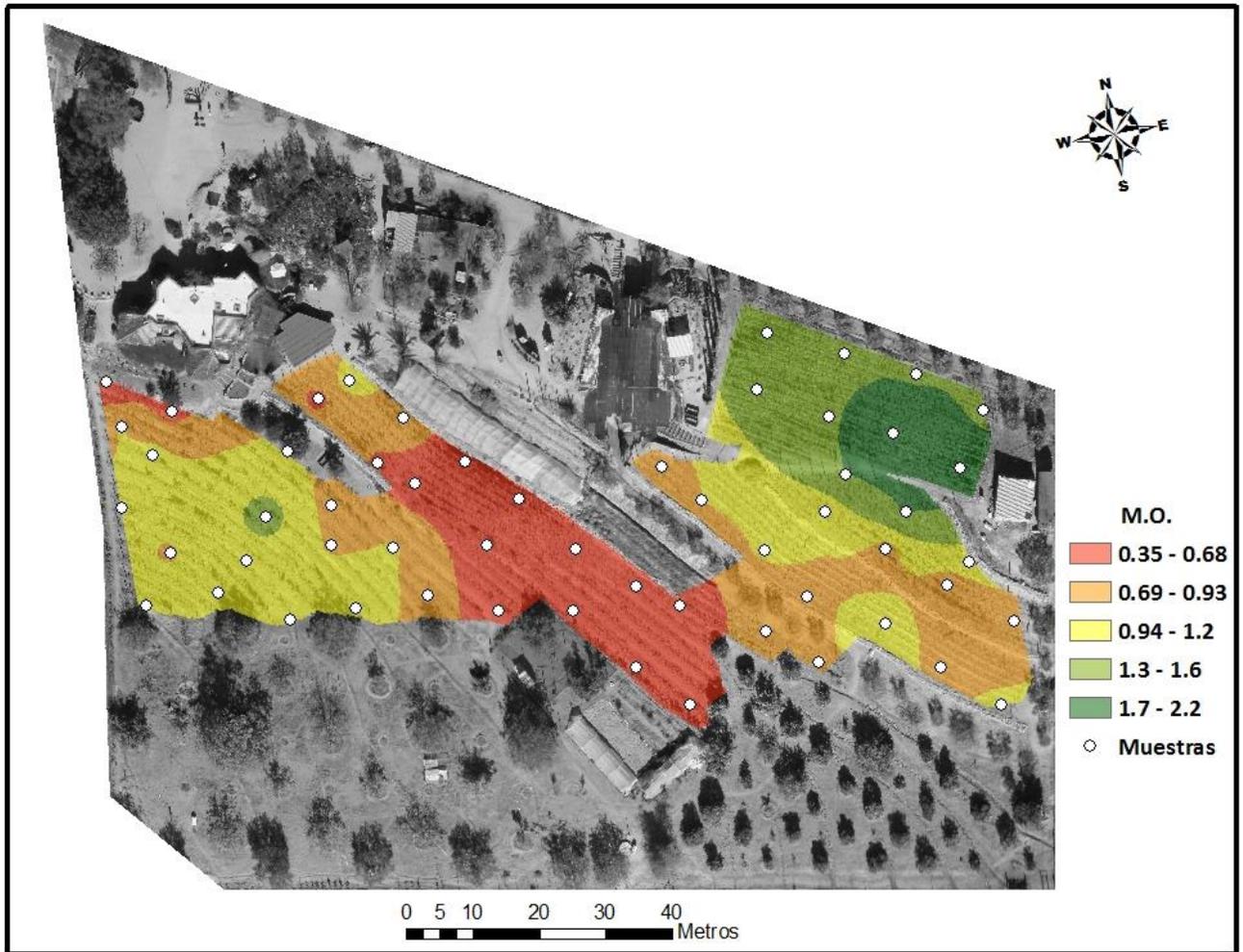


Figura 23. Mapa de interpolación espacial de los valores de contenido de materia orgánica obtenidos de 56 muestras de suelo en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe. En rojo se observan las muestras con menor contenido de M.O., mientras que en verde se observan las muestras con mayor contenido.

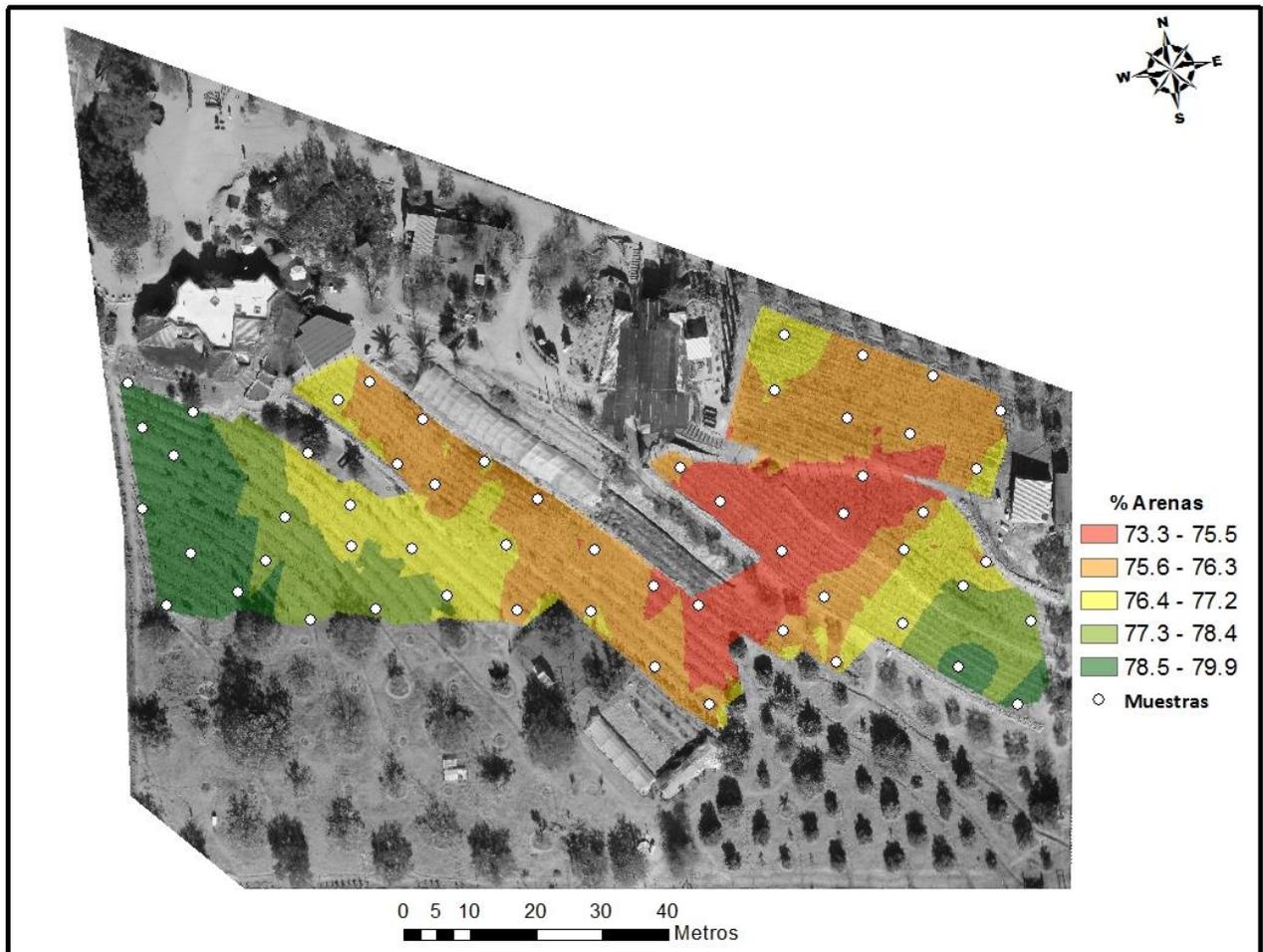


Figura 24. Mapa de interpolación espacial de los valores de porcentaje de arenas existentes en 56 muestras del suelo extraídas del viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe. En rojo se identifican las muestras con menor contenido de arenas, en verde los sitios con mayor contenido.

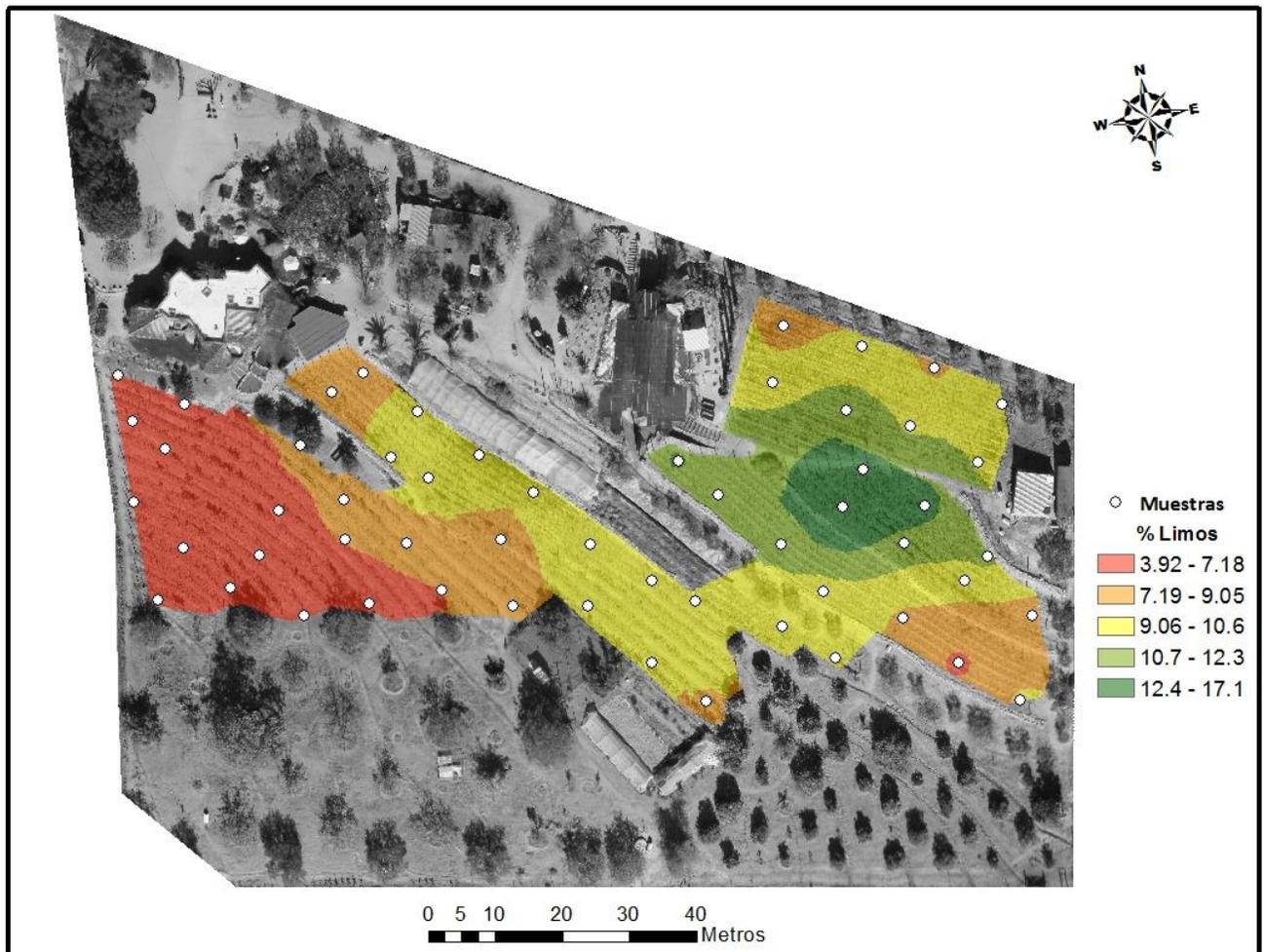


Figura 25. Mapa de interpolación espacial de los valores de porcentaje de limos existentes en 56 muestras del suelo extraídas del viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe. En rojo se identifican las muestras con menor contenido de limos, en verde los sitios con mayor contenido.

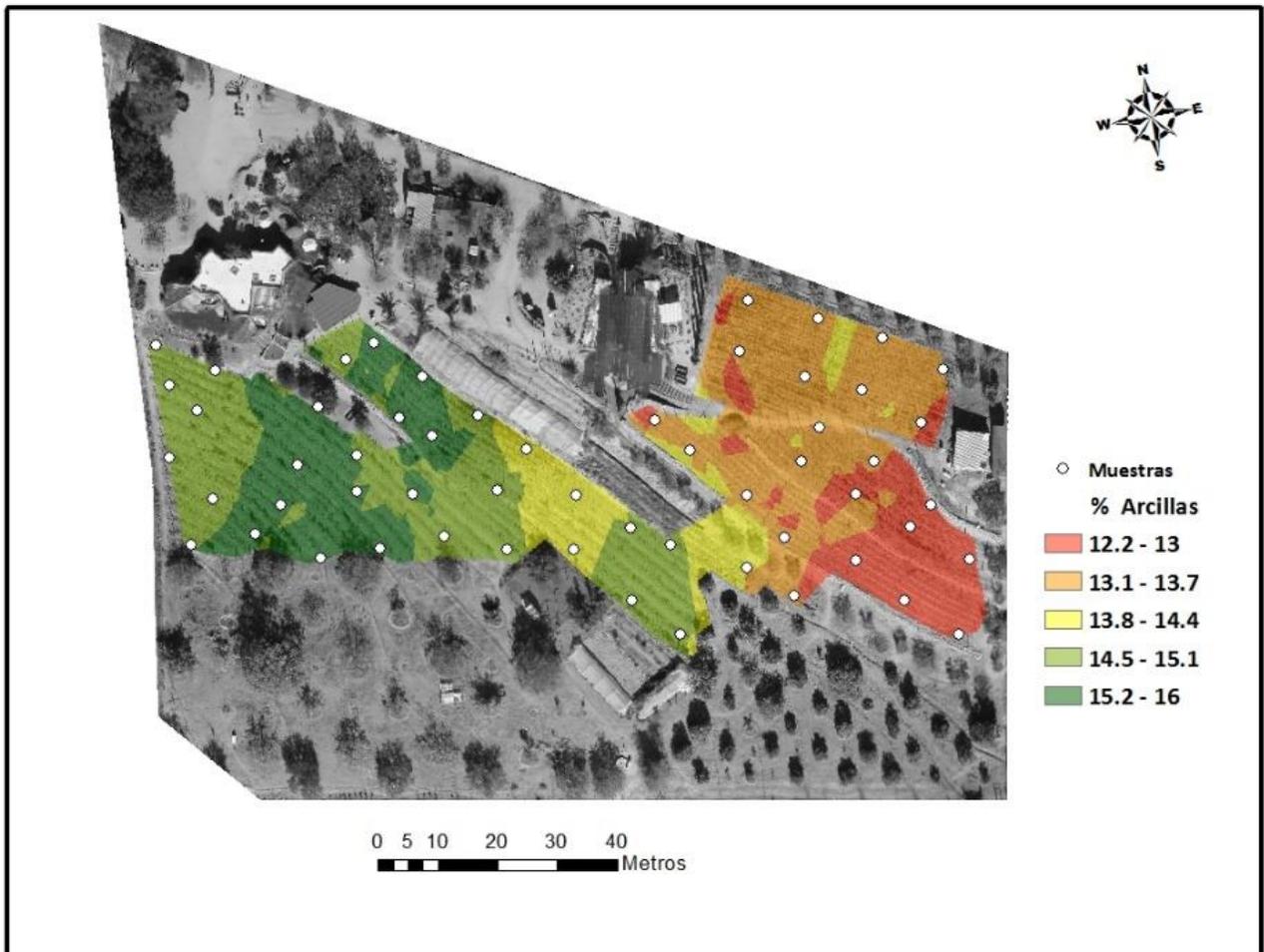


Figura 26. Mapa de interpolación espacial de los valores de porcentaje de arcillas existentes en 56 muestras del suelo extraídas del viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe. En rojo se identifican las muestras con menor contenido de arcillas, en verde los sitios con mayor contenido.

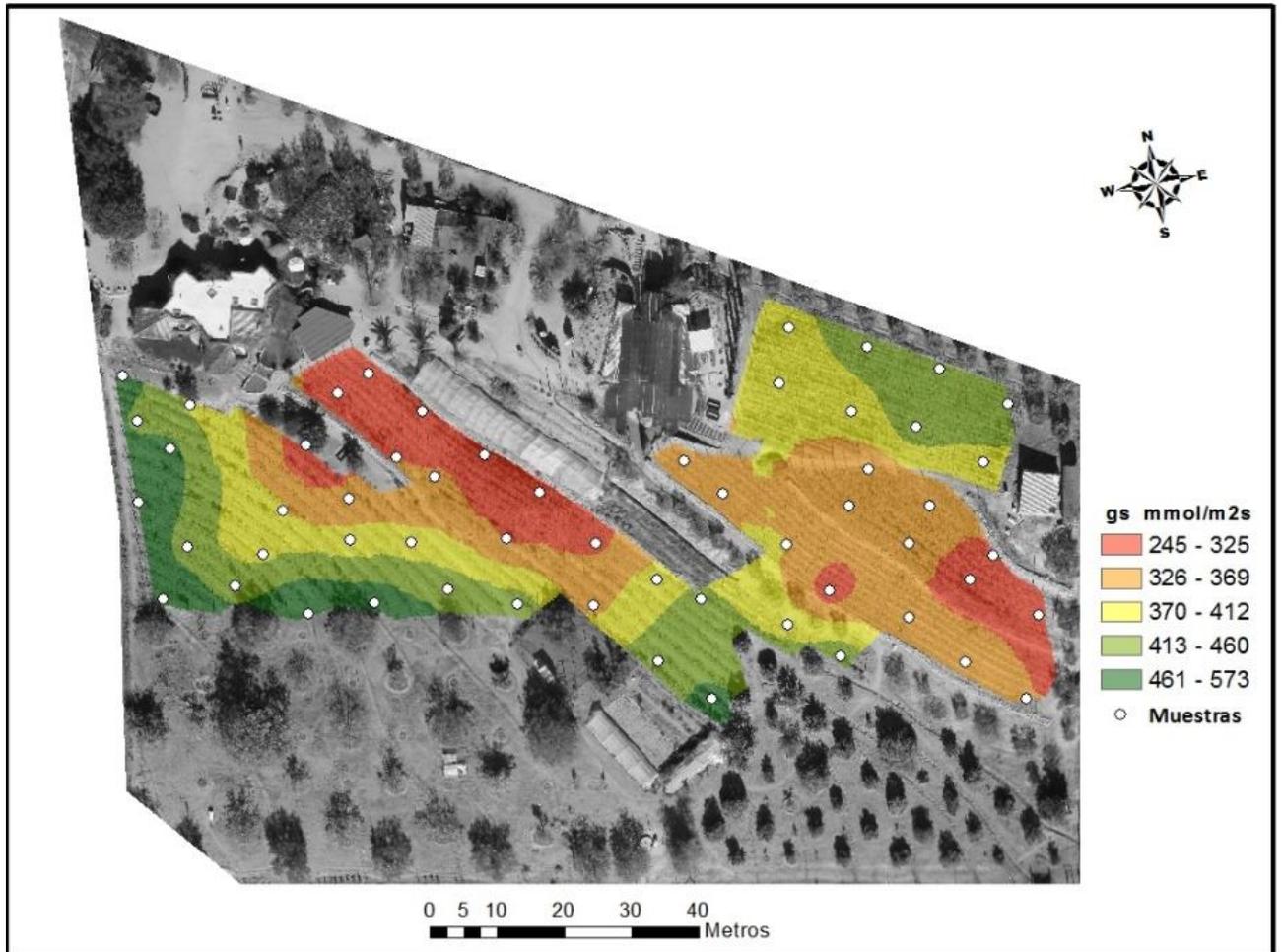


Figura 27. Mapa de interpolación espacial de los valores de g_s medidos a medio día en 56 plantas de vid, en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe. En rojo se observan los valores donde existe menor conductancia y en verde los sitios de mayor conductancia.

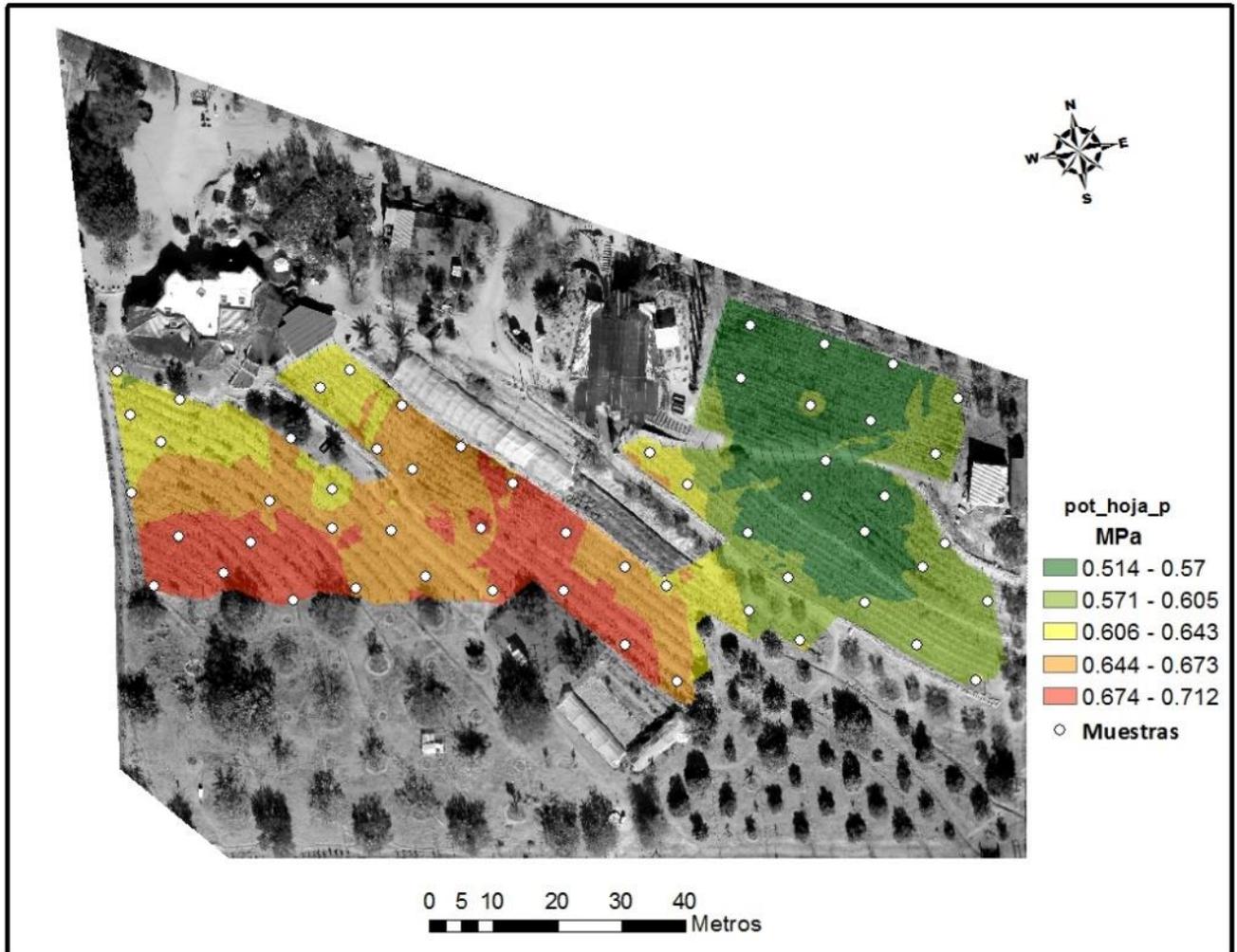


Figura 28. Mapa de interpolación espacial de los valores de potencial hídrico en hoja al pre-amanecer para 56 plantas de vid en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe. Por los valores se infiere que en rojo las plantas se encuentran más estresadas mientras que en verde se encuentran las menos estresadas.

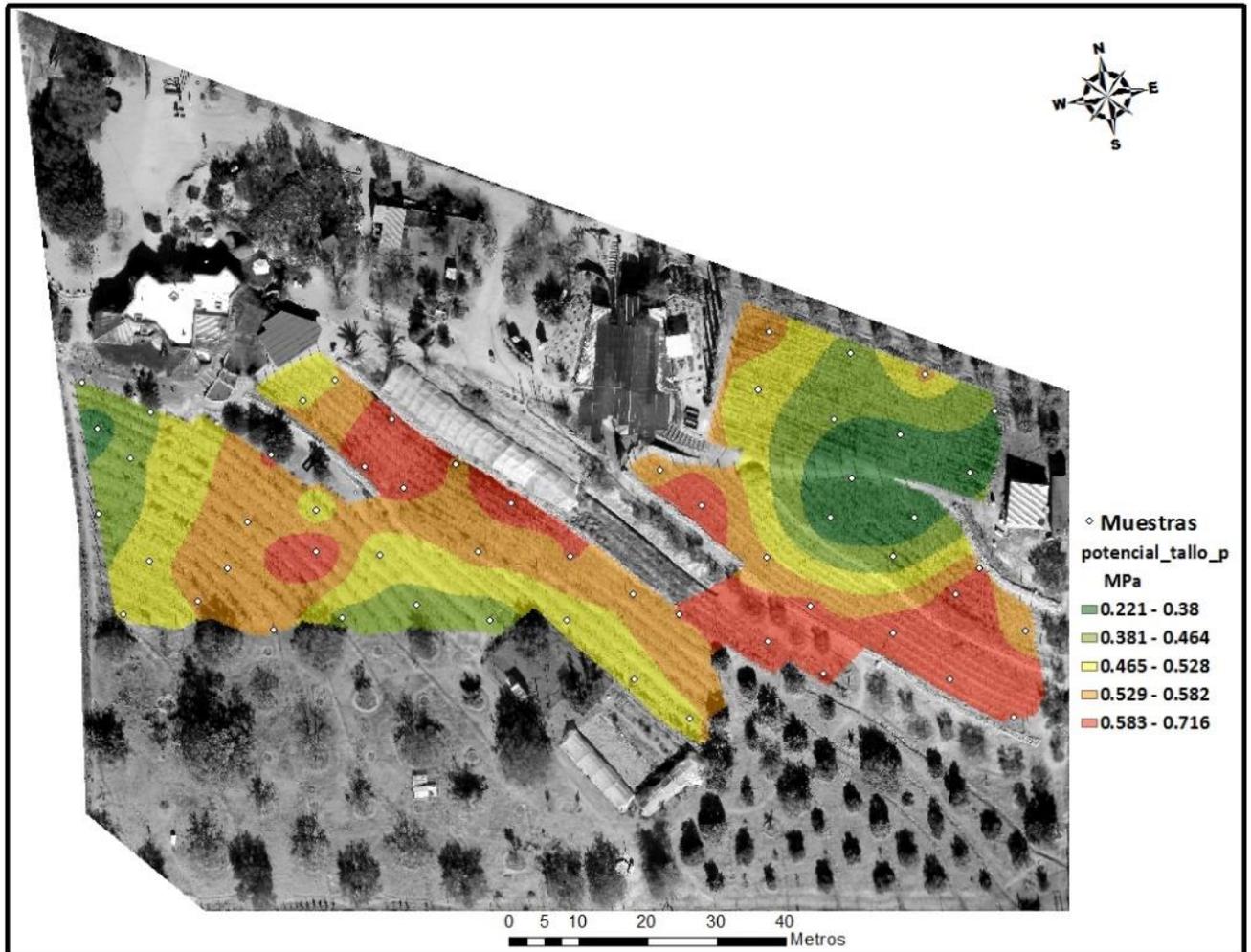


Figura 29. Mapa de interpolación espacial de los valores de potencial hídrico en hoja al pre-amanecer para 56 plantas de vid en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe. Por los valores se infiere que en rojo las plantas se encuentran más estresadas mientras que en verde se encuentran las menos estresadas.

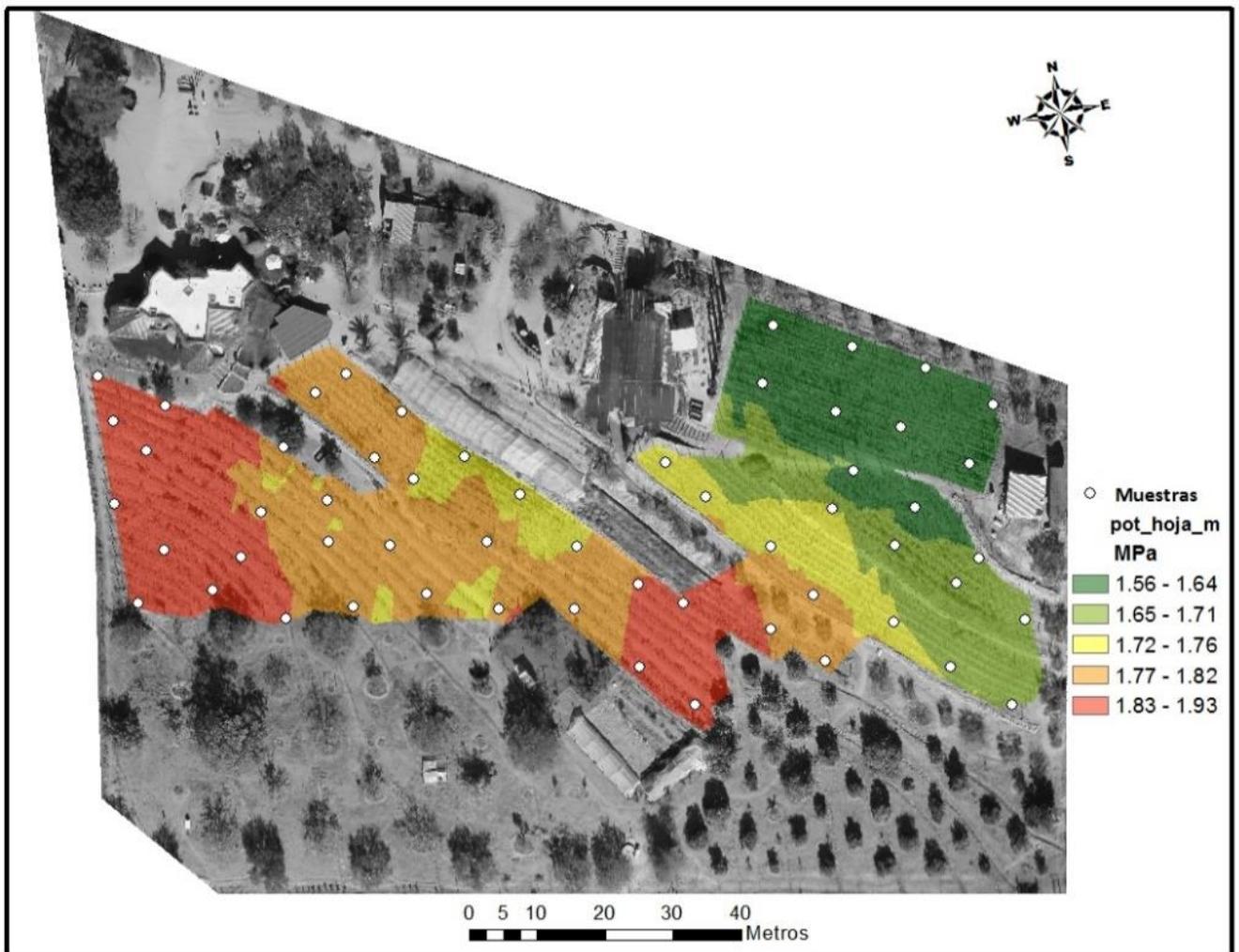


Figura 30. Mapa de interpolación espacial de los valores de potencial hídrico en hoja a medio día para 56 plantas de vid en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe. En rojo se observan plantas con mayor estrés mientras que en verde se muestran plantas con menor estrés.

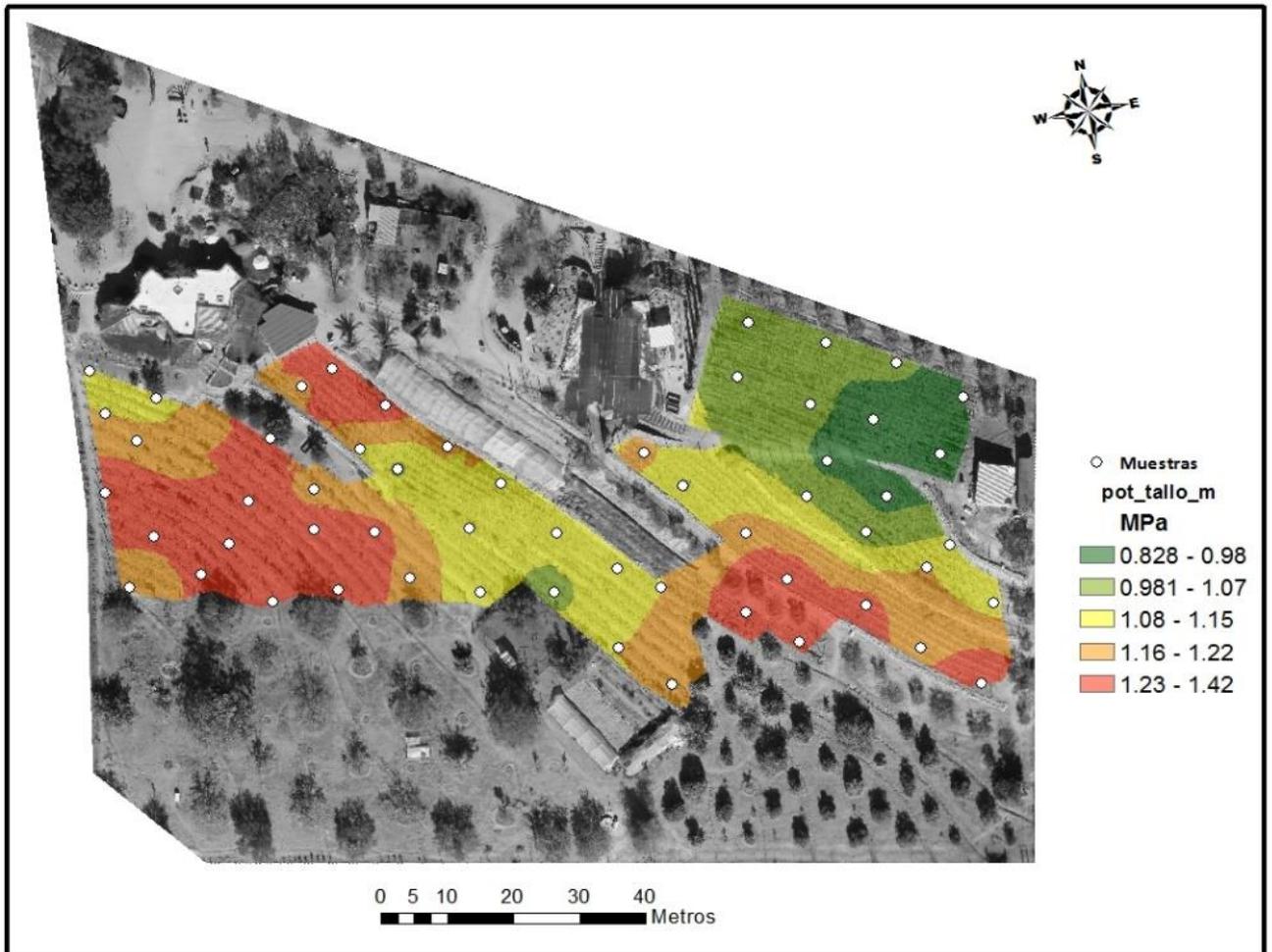


Figura 31. Mapa de interpolación espacial de los valores de potencial hídrico en tallo a medio día para 56 plantas de vid en el viñedo Tres Mujeres, Valle de Guadalupe. En rojo se observan plantas con mayor estrés mientras que en verde se muestran plantas con menor estrés.

5. Discusión

En esta tesis se pudo establecer la relación de la topografía, la edafología y las variables ecofisiológicas para el viñedo Tres Mujeres, del Valle de Guadalupe, B.C. Para determinar las variables ecofisiológicas, se utilizaron características clave en el transporte de agua a través de las plantas. En particular se encontró que los lugares dentro del viñedo con mayor pendiente contenían poca materia orgánica (M.O.), g_s y Ψ con valores absolutos más altos, lo que se puede asociar a un nivel relativamente mayor de estrés en las plantas. En contraparte, se pudo observar que en las zonas de poca pendiente o de acumulación se observaron valores de M.O. más altos, además de mayores valores de g_s y Ψ que fueron más cercanos a cero, lo que implica que estos sitios con menor pendiente tenían menor estrés hídrico.

5.1 Variación del suelo en función de la topografía.

En el sitio de estudio, cuya área total es de 1.5 ha, encontramos que existen patrones de heterogeneidad espacial muy marcados, donde la altura mínima sobre el nivel del mar es de 340 msnm y la máxima es de 370 msnm. El cálculo de pendientes nos permitió conocer las zonas con mayor inclinación dentro del sitio de cultivo. Una vez generado el mapa de pendientes se buscó relacionar la topografía del sitio con las variables de M.O., pH, CE y textura del suelo. Como ejemplo, se encontró una asociación entre la pendiente y M.O., donde los polígonos centrales correspondientes al 2 y 3 presentaron valores menores al 1% de M.O., mientras que los polígonos 1 y 4, por ser sitios de acumulación, presentaron valores arriba del 1% de M.O.

5.2 Variación en caracteres eco-fisiológicos en *V. vinifera* L.

Las mediciones ecofisiológicas permitieron evaluar como variaban los caracteres fisiológicos involucrados en el transporte hídrico a través de la planta, los cuales pueden ayudar a describir las variaciones en estrés por polígono. En particular estudiamos dos tipos de caracteres: Ψ y g_s . El primero se ha encontrado que es capaz de describir los límites de funcionalidad de la columna continua de agua en plantas de vid (Williams, 2002; Williams et al., 2012). Respecto a g_s se ha encontrado que este carácter permite definir

la cantidad de agua transpirada a la atmósfera (Nardini y Salleo, 2000). Este estudio además cuantificó la variación circadiana, entendida como un monitoreo realizado durante 24 horas con el fin de evaluar las horas en las que las plantas empiezan el proceso de apertura y cierre de estomas, por medio de la medición de g_s , mientras que para Ψ se observaron las horas en las cuales existe un aumento o disminución en la variación en la capacidad de transporte del agua. La evaluación y significancia de los resultados se explican en seguida.

5.2.1 Descripción de variación espacial de Ψ y g_s

Nuestros resultados apuntan a que la variación de g_s y Ψ a través de los diferentes polígonos del viñedo, se relaciona con la topografía y la edafología dentro de la zona de cultivo. Se observó que los polígonos 1 y 4 fueron los que se encontraron más favorecidos en cuanto a los valores obtenidos de las mediciones fisiológicas mientras que los polígonos 2 y 3 mostraron ser sitios de mayor estrés, lo cual se traduce a un mayor consumo de agua y nutrientes. Esto nos da una idea de la variación que puede existir dentro de un mismo sitio. Al no ser un experimento controlado se pueden tener asociaciones confundidas entre las mediciones ecofisiológicas y las características de los sitios o de las plantas como fue respecto a la edad y variedad de las vides.

Podemos suponer que dado que los suelos son fundamentales en definir las propiedades hídricas que realmente la variación espacial es determinante, junto con la edad de la planta, tal en mayor medida que los varietales. A partir de los análisis estadísticos generados se encontraron las diferencias entre g_s contra edad donde se obtuvo un $BF= 23.18$ (Figura 13), para Ψ en tallo a medio día y preamanecer contra variedad encontramos una mayor diferencia en Ψ tallo a medio día con un valor de $BF=130.3$ mientras que para preamanecer fue de $BF=23.5$ (Figura 12). Por último se asoció el Ψ tallo y hoja a medio día contra la edad de planta, en este último encontramos una mayor diferencia en tallo con valor de $BF= 11.6$ (Figura 10), lo que indica que tanto la edad, la variedad y el sitio interactuaron en conjunto para definir la variación en características hidráulicas.

5.2.2 Variación temporal de Ψ y g_s

Para generar un estudio de la variación a lo largo de un ciclo circadiano en g_s y Ψ se realizaron mediciones por 24 horas, cada dos horas. Se encontró que después de las 21 horas las plantas alcanzaron los valores mínimos de g_s y los valores máximos de Ψ , por lo cual, para conocer la mayor variabilidad de estos caracteres es recomendable realizar las mediciones después de las 21 horas y al medio día. Siguiendo la recomendación de Klepper (1968), la mayor parte de los ecofisiólogos vegetales consideran mejor realizar las mediciones al preamanecer, pero en este estudio, debido a que no se encontró variación en los valores obtenidos a partir de las 20 horas y hasta las 05 am de g_s y Ψ , podemos recomendar realizar las mediciones en la noche, ya que las mediciones serían más confiables por no tener el riesgo de que los primeros rayos de luz del sol al preamanecer aceleraran la apertura de los estomas y por consecuencia iniciaran el proceso del transporte de agua a través de las plantas. Hacer mediciones a preamanecer sólo sería recomendable si previamente se ha encontrado que existen diferencias significativas entre las horas más tardías de la madrugada respecto al inicio de la noche. De no ser así, la recomendación es tomar las mediciones mínimas de g_s y máximas de Ψ al menos dos horas después de que se oculte el sol. Al ser un ambiente particularmente favorable para el desarrollo de las plantas hay un estrecho vínculo entre g_s y Ψ , donde cada vez que incrementa la transpiración hay un decremento en Ψ . Los datos soportan la noción de que los valores máximos de g_s y mínimos de Ψ se encontrarán a medio día, pero no soportan la hipótesis de que el preamanecer es el momento mínimo de g_s y máximo de Ψ , dado que cualquier punto en la noche es igualmente útil para definir los máximos de Ψ y mínimos de g_s .

Sería interesante conocer cómo varía la transpiración nocturna y la variación en Ψ entre noches con diferente grado de iluminación (luna llena vs luna nueva), para ver si efectivamente es igual de conveniente tomar las mediciones mínimas de g_s y máximas de Ψ para horas diferentes al preamanecer, lo cual permitirá realizar modificaciones metodológicas que facilitarán mucho la logística de las investigaciones ecofisiológicas.

5.3. Interpretación de los mapas de interpolación

La generación de mapas de interpolación espacial hace que el usuario pueda observar a mayor detalle la distribución de los datos adquiridos en campo a partir de diferentes mediciones, de esta manera se vuelven una herramienta de manejo para la agricultura. En este caso se pudieron generar mapas con cada una de las variables medidas en campo tales como la topografía del terreno, pendientes, distribución de nutrientes y conductividad eléctrica, por mencionar algunas. Los mapas de interpolación permiten definir la variabilidad de los suelos aún en espacios relativamente pequeños, para controlar mejor la heterogeneidad espacial. Esto podría permitir manejo por secciones definidas del territorio, mejorando el uso de los recursos.

La Geoestadística es una técnica útil para agricultura, ya que puede predecir los valores entre los puntos de muestra con precisión, contando sólo unos pocos puntos dentro de un campo donde hay información y realizando intrapolaciones estadísticas para determinar los valores aproximados entre ellos. Por tanto, la geoestadística proporciona las herramientas para generar mapas sin necesidad de hacer esfuerzos de muestreo demasiado costosos en tiempo y recursos. El mapa krigeado es mucho más fácil de usar que la imagen digital en bruto, y nos muestra que el kriging es valioso no sólo cuando los datos son escasos, sino también cuando proporcionan una cobertura completa (Oliver, 2013). Con esto el principal objetivo de este tipo de herramienta, es poder observar las variaciones dentro de los campos de manera que, las áreas individuales reciban los tipos y las cantidades de insumos que se adaptan exactamente a sus necesidades.

A partir de esto, este estudio sólo se enfocó en la variación espacial dentro del viñedo, lo cual permitiría seleccionar las áreas más adecuadas para implementación de sensores ambientales, por ejemplo de humedad del suelo, o de Temperatura / humedad relativa, entre otros. En conjunto, el conocer la variación espacial y temporal en campos de cultivo permitirá generar esquemas de irrigación más eficientes, reduciendo costos y aumentando la productividad en la agricultura.

6. Conclusiones

Existen múltiples asociaciones entre las variables, que se pueden atribuir primordialmente a la topografía. Los polígonos con menor pendiente topográfica, donde la variedad cultivada es Grenache contienen suelos más ricos en materia orgánica, permitiendo mayores valores de g_s con valores menos negativos de potencial hídrico. En contraste los sitios que contienen variedades de Cabernet tienen suelos más pobres en contenido de materia orgánica y tienen valores de g_s menores y potenciales hídricos más negativos. Esto permite interpretar las necesidades para manejo tras el paisaje y organizar esfuerzos, inversiones y estudios.

Con el ciclo circadiano se pudo observar y confirmar que las horas seleccionadas para realizar los muestreos fueron las adecuadas. Esto se debe a que en la madrugada los valores de potencial era cercanos a 0 lo cual es aceptable ya que no existe una apertura de estomas lo cual permite estimar el valor mínimo de estrés hídrico durante un día, mientras que a medio día se observó lo contrario.

En conjunto, la obtención de imágenes a partir de vehículos aéreos no tripulados, junto con evaluaciones de las características físicas del suelo y de las propiedades hidráulicas en plantas permiten generar mapas de alta resolución de variables importantes en la agricultura y desempeño de las plantas, lo cual puede ser útil para comprender los patrones de variación al interior de los campos de cultivo. Un paso posterior para entender mejor la dinámica de uso de agua en los viñedos debería ser la integración de información espacial por medio de ortofotos y cartografía de alta resolución con sensores de humedad de suelo a lo largo del año. La descripción de la variación espacial y temporal de variables importantes en agricultura permitirá el establecimiento de calendarios de irrigación más adecuados para las necesidades de cada usuario, reduciendo así los costos implícitos en la agricultura en sitios semiáridos.

Literatura citada

- Aguilera, J. C. L., y Carbajal, M. I. E. L. 2013. El valle de Guadalupe: Conjugando Tiempos, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, Baja California.
- Atlas Digital del Agua México 2012: Sistema Nacional de Información del Agua. Recuperado el 17 de Julio de 2015, de: <http://www.conagua.gob.mx/atlas/ciclo21.html>
- Badan, A., Kretzschmar, T., Espejel, I., Cavazos, T., D'Acosta, H., Vargas, P. y Ahumada, B. (2006). Hacia un plan de manejo del agua en Valle de Guadalupe, Baja California. *Memorias del II Seminario Internacional de Vitivinicultura: Ensenada, Baja California, México, INIFAP*, 45-64.
- Bouyoucos, G. J. (1936). Directions for making mechanical analyses of soils by the hydrometer method. *Soil Science*, 42, 225-230.
- Broich, M., Hansen, M. C., Potapov, P., Adusei, B., Lindquist, E., y Stehman, S. V. (2011). Time-series analysis of multi-resolution optical imagery for quantifying forest cover loss in Sumatra and Kalimantan, Indonesia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(2), 277-291.
- Cochard, H. (2014). The basics of plant hydraulics. *Journal of Plant Hydraulics*, 1:1
- Congreso de Baja California: El agua en Baja California. Recuperado el 15 de Julio de 2015, de: <http://www.congresobc.gob.mx/IELWeb/documentos/AguaenBajaCalifornia.pdf>
- Consejo Estatal de Protección al Ambiente: Ordenamiento Ecológico. Recuperado el 3 de Agosto de 2015, de: http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/temas/ordenamientoecologico/Documentos/documentos%20decretados/valle_gpe/poet_valle_guadalupe.pdf
- Chauvet A. y Reynier (1984). Manual de Viticultura. Mundi-Prensa. 279pp.
- Dai, A. (2011). Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(1), 45-65
- Eisenbeis, H. 2004. A Mini Unmanned Aerial Vehicle (UAV): System Overview and Image Acquisition (7). In: International Workshop on "Processing and Visualization Using High-Resolution Imagery", Pitsanulok, Thailand.
- Evert, R. F. (2006). *Esau's plant anatomy: meristems, cells, and tissues of the plant body: their structure, function, and development*. John Wiley & Sons.
- Gardner, T. A., Barlow, J., Araujo, I. S., Ávila-Pires, T. C., Bonaldo, A. B., Costa, J. E., ... y Hoogmoed, M. S. (2008). The cost-effectiveness of biodiversity surveys in tropical forests. *Ecology letters*, 11(2), 139-150.
- Florido Bacallao, M., y Bao Fundora, L. (2014). Tolerancia a estrés por déficit hídrico en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Cultivos Tropicales*, 35(3), 70-88.
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana) 5a. Edición, Serie Libros 6, UNAM.

- Gleick, P. H. (2003). Water use. *Annual review of environment and resources*, 28(1), 275-314.
- Grenzdörffer, G., Stafford, J., y Werner, A. (2003). Investigations on the use of airborne remote sensing for variable rate treatments of fungicides, growth regulators and n-fertilization. In Proc. Fourth European Conf. on Precision Agriculture, Berlin (pp. 241-246).
- Hengl, T. (2006). Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences*, 32(9), 1283-1298.
- Klepper, B. (1968). Diurnal pattern of water potential in woody plants. *Plant Physiology*, 43(12), 1931-1934.
- Koh, L., y Wich, S. (2012). Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for conservation.
- Kumhálová, J., Kumhála, F., Kroulík, M., y Matějková, Š. (2011). The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. *Precision Agriculture*, 12(6), 813-830.
- Kurczyn-Robledo et al. (2007). Evaluación del escurrimiento superficial en el noreste del Valle de Guadalupe, BC, México, usando el método de curvas numeradas y datos de satélite. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 24(1), 1-14.
- Lambert, D.M., Cooper, M.C. y PAGH, J.D. SUPPLY CHAIN MANAGEMENT: Implementation Issues AND Research Opportunities. *The International Journal OF Logistics Management*, Vol. 9, N.2, P.1-19, 1998.
- Melcher, P. J., Goldstein, G., Meinzer, F. C., Yount, D. E., Jones, T. J., Holbrook, N. M., y Huang, C. X. (2001). Water relations of coastal and estuarine Rhizophora mangle: xylem pressure potential and dynamics of embolism formation and repair. *Oecologia*, 126(2), 182-192.
- McBratney, A., Whelan, B., Ancev, T., y Bouma, J. (2005). Future directions of precision agriculture. *Precision agriculture*, 6(1), 7-23.
- McDowell, N., Pockman, W. T., Allen, C. D., Breshears, D. D., Cobb, N., Kolb, T. y Yopez, E. A. (2008). Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought?. *New phytologist*, 178(4), 719-739.
- Nardini, A., y Salleo, S. (2000). Limitation of stomatal conductance by hydraulic traits: sensing or preventing xylem cavitation?. *Trees*, 15(1), 14-24.
- Oliver, M. A. (2013). Precision agriculture and geostatistics: How to manage agriculture more exactly. *Significance*, 10(2), 17-22.
- Ortiz, S. C. y Cuanalo de la C. H. (1981). Introducción a los levantamientos de suelo. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Ramírez Chávez, E. J., Cruz García, A., Lagunas Pérez, A. G., y OE, R. C. (2013). Uso de vehículos aéreos no tripulados para la caracterización del paisaje sumergido; Bahía Estacahuite. *Ciencia y Mar*, 19(51), 35-40.
- Scholander, P. F., Hammel, H. T., Hemmingsen, E. A., y Bradstreet, E. D. (1964). Hydrostatic pressure and osmotic potential in leaves of mangroves and some other plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 52(1), 119-125.

- Scholander, P.F., H.T. Hammel, E.D. Bradstreet y E.A. Hemmingsen (1965). Sap pressure in vascular plants. *Science* 148: 339-346.
- Sozzi, Gabriel O. (octubre de 2008). *Árboles frutales. Ecofisiología, cultivo y aprovechamiento*. 1ª reimpresión. Buenos Aires: Facultad de Agronomía. p. 53.
- Stafford, J. V. (2000). Implementing precision agriculture in the 21st century. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76(3), 267-275.
- Tyree, M. T. y Ewers, F. W. (1991), The hydraulic architecture of trees and other woody plants. *New Phytologist*, 119: 345–360
- Williams, L. E., y Araujo, F. J. (2002). Correlations among predawn leaf, midday leaf, and midday stem water potential and their correlations with other measures of soil and plant water status in *Vitis vinifera*. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 127(3), 448-454.
- Williams, L. E., Baeza, P., y Vaughn, P. (2012). Midday measurements of leaf water potential and stomatal conductance are highly correlated with daily water use of Thompson Seedless grapevines. *Irrigation Science*, 30(3), 201-212.
- Zhang, C., y Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision agriculture*, 13(6), 693-712.

Anexo 1. Valores de pH y Conductividad eléctrica para 56 puntos de estudio separados en una cuadrícula de 10 x 10 metros en el viñedo “Tres Mujeres” en el Valle de Guadalupe, B.C., México.

| Polígono | Planta ID | pH | Conductividad Eléctrica |
|----------|-----------|------|-------------------------|
| 4 | 56 | 6.63 | 31.1 |
| 4 | 55 | 6.32 | 49.3 |
| 4 | 54 | 6.51 | 44.6 |
| 4 | 53 | 7.2 | 17.15 |
| 4 | 52 | 7.4 | 39 |
| 4 | 51 | 7.69 | 35.8 |
| 4 | 50 | 6.47 | 19.19 |
| 4 | 49 | 7.56 | 49.9 |
| 4 | 48 | 7.78 | 47.4 |
| 4 | 47 | 7.6 | 38.1 |
| 4 | 46 | 7.93 | 27.79 |
| 4 | 45 | 6.68 | 45.3 |
| 4 | 44 | 7.65 | 37.1 |
| 4 | 43 | 8.03 | 43.9 |
| 4 | 42 | 7.81 | 57.4 |
| 4 | 41 | 6.93 | 51.7 |
| 4 | 40 | 8.06 | 22.26 |
| 4 | 39 | 7.35 | 36.9 |
| 3 | 38 | 7.05 | 13.69 |
| 3 | 37 | 6.94 | 11.5 |
| 3 | 36 | 7.45 | 15.71 |
| 3 | 35 | 7.68 | 35.2 |
| 3 | 34 | 7.42 | 46 |
| 3 | 33 | 7.72 | 32.8 |
| 3 | 32 | 7.56 | 44.3 |
| 3 | 31 | 7.33 | 29.18 |
| 3 | 30 | 7.78 | 19.38 |
| 3 | 29 | 7.95 | 18.52 |
| 3 | 28 | 7.67 | 30.5 |
| 3 | 27 | 7.83 | 45.3 |
| 3 | 26 | 7.72 | 67.6 |
| 3 | 25 | 7.37 | 47.1 |
| 2 | 24 | 7.59 | 52 |
| 2 | 23 | 7.5 | 52.1 |
| 2 | 22 | 7.38 | 27.94 |
| 2 | 21 | 7.44 | 18.05 |
| 2 | 20 | 7.94 | 21.38 |
| 2 | 19 | 7.81 | 59.8 |
| 2 | 18 | 7.56 | 17.56 |
| 2 | 17 | 7.27 | 43.6 |
| 2 | 16 | 7.46 | 55.7 |
| 2 | 15 | 7.48 | 44.7 |
| 2 | 14 | 8.45 | 36.9 |
| 2 | 13 | 7.91 | 40.5 |
| 2 | 12 | 7.38 | 63.7 |
| 2 | 11 | 7.8 | 36.3 |
| 2 | 10 | 7.32 | 62.4 |
| 2 | 9 | 6.83 | 22.97 |
| 1 | 8 | 8.36 | 39.6 |
| 1 | 7 | 6.37 | 29.17 |

| | | | |
|---|---|------|-------|
| 1 | 6 | 6.6 | 57.2 |
| 1 | 5 | 7.24 | 33.5 |
| 1 | 4 | 6.78 | 12.87 |
| 1 | 3 | 6.51 | 17.3 |
| 1 | 2 | 7.05 | 7.52 |
| 1 | 1 | 7.12 | 7.17 |

Anexo 2. Valores de Materia orgánica para 56 puntos de estudio separados en una cuadrícula de 10 x 10 metros en el viñedo “Tres Mujeres”, Valle de Guadalupe, B.C., México.

| Polígono | Planta ID | Mat Org % |
|----------|-----------|-----------|
| 4 | 56 | 1.06 |
| 4 | 55 | 1.09 |
| 4 | 54 | 0.84 |
| 4 | 53 | 0.92 |
| 4 | 52 | 0.97 |
| 4 | 51 | 0.95 |
| 4 | 50 | 1.24 |
| 4 | 49 | 0.84 |
| 4 | 48 | 1.64 |
| 4 | 47 | 1.07 |
| 4 | 46 | 1.13 |
| 4 | 45 | 0.87 |
| 4 | 44 | 1.08 |
| 4 | 43 | 0.75 |
| 4 | 42 | 1.09 |
| 4 | 41 | 0.4 |
| 4 | 40 | 0.3 |
| 4 | 39 | 0.41 |
| 3 | 38 | 0.38 |
| 3 | 37 | 0.41 |
| 3 | 36 | 0.46 |
| 3 | 35 | 0.52 |
| 3 | 34 | 0.47 |
| 3 | 33 | 0.54 |
| 3 | 32 | 0.37 |
| 3 | 31 | 0.26 |
| 3 | 30 | 0.44 |
| 3 | 29 | 0.42 |
| 3 | 28 | 0.55 |
| 3 | 27 | 0.38 |
| 3 | 26 | 1.02 |
| 3 | 25 | 1.28 |
| 2 | 24 | 0.93 |
| 2 | 23 | 0.97 |
| 2 | 22 | 0.99 |
| 2 | 21 | 0.91 |
| 2 | 20 | 1.15 |
| 2 | 19 | 0.89 |
| 2 | 18 | 1.03 |
| 2 | 17 | 0.98 |
| 2 | 16 | 0.72 |
| 2 | 15 | 0.66 |
| 2 | 14 | 0.68 |
| 2 | 13 | 0.59 |
| 2 | 12 | 0.77 |
| 2 | 11 | 1.02 |
| 2 | 10 | 1.77 |
| 2 | 9 | 1.7 |
| 1 | 8 | 2.41 |
| 1 | 7 | 2.4 |
| 1 | 6 | 1.5 |

| | | |
|---|---|------|
| 1 | 5 | 1.44 |
| 1 | 4 | 1.3 |
| 1 | 3 | 1.43 |
| 1 | 2 | 1.35 |
| 1 | 1 | 1.37 |

Anexo 3. Valores de corrección por temperatura para porcentajes de valores de textura obtenidos por el método de Bouyoucos de clasificación textural de suelos.

| TEMP. °C | CORRECCION | | TEMP. °C | CORRECCION | |
|----------|------------|------|----------|------------|-------|
| 15.0 | - | 1.62 | 21.5 | + | 0.18 |
| 15.5 | - | 1.44 | 22.0 | + | 0.90 |
| 16.0 | - | 1.26 | 22.5 | + | 1.08 |
| 16.5 | - | 1.08 | 23.0 | + | 1.26 |
| 17.0 | - | 0.90 | 23.5 | + | 1.44 |
| 17.5 | - | 0.72 | 24.0 | + | 1.62 |
| 18.0 | - | 0.54 | 24.5 | + | 1.80 |
| 18.5 | - | 0.36 | 25.0 | + | 1.98 |
| 19.0 | - | 0.18 | 25.5 | + | 2.15 |
| 19.5 | - | 0 | 26.0 | + | 2.34 |
| 20.0 | + | 0.18 | 26.5 | + | 2.52 |
| 20.5 | + | 0.36 | 27.0 | + | 2.70 |
| 21.0 | + | 0.54 | 27.5 | + | 2.858 |
| | | | 28.0 | + | 3.06 |