



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE RIEGO A PRECISIÓN EN UN
EQUIPO DE PIVOTE CENTRAL**

JOSÉ ANDRÉS LEÓN MOSTACERO

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS

Montecillo, Estado de México

2012

La presente tesis, titulada: **Desarrollo de un Sistema de Riego a Precisión en un Equipo de Pivote Central**, realizada por el alumno: **José Andrés León Mostacero**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:

DR. HÉCTOR FLORES MAGDALENO

ASESOR:

DR. FRANCISCO GAVI REYES

ASESOR:

DR. HÉCTOR DEBERNARDI DE LA VÉQUIA

ASESOR:

DR. ROBERTO ASCENCIO HERNÁNDEZ

ASESOR:

DR. FRANCISCO MIGUEL ÁGUILA MARÍN

ASESOR:

DR. WOLFRAM SPREER

Montecillo, Texcoco, Edo. de México; Diciembre de 2012

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE RIEGO A PRECISIÓN EN UN EQUIPO DE PIVOTE CENTRAL

José Andrés León Mostacero, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2012

La presente investigación se desarrolló en el pivote central del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México. El objetivo fue diseñar, construir y evaluar un sistema de riego a precisión que opere en un equipo pivote central. La metodología seguida se puede agrupar en cuatro componentes 1. Medición y estimación de propiedades físico-químicas del suelo, 2. Interpolación de datos y elaboración de mapas, 3. Desarrollo del sistema de riego a precisión y 4. Evaluación del sistema. La medición de propiedades del suelo fue manual y consistió en la toma de muestras georeferenciadas, preparación, transporte, almacenamiento y análisis de propiedades físicas en laboratorio. Interpolación de datos depurados y analizados con estadísticos básicos terminando en el uso del método Kriging tipo Ordinario Gaussiano para la obtención de los diferentes mapas. El desarrollo del sistema de riego a precisión se describe en tres partes: A) desarrollo del componente electromecánico, basado en la ubicación del sistema, cableado e instalación de electroválvulas, B) componente electrónico, con la elaboración de dos tablillas, integración de GPS y comunicación con la computadora, C) software basado en la comparación de los datos obtenidos por el GPS con un mapa establecido de zonas “homogéneas” para el riego. La evaluación del sistema basado en la comparación de la cantidad de agua aplicada (ordenada por el programa) y el agua colectada a nivel del suelo. Los resultados obtenidos fueron a) mapas temáticos de propiedades físicas del suelo (Da. pH, C.E., M.O., CC, PMP, Textura), b) hardware del sistema de riego a precisión en el pivote central, que permite la operación de electroválvulas en función al geoposicionamiento, c) software de riego a precisión abierto y adaptable a cualquier equipo de rodamiento circular (pivote central) en cualquier ubicación de la tierra, bajo cualquier criterio de programación de variabilidad del suelo-cultivo, d) evaluación donde se encontró que la precisión del riego permitió un ahorro del 39.09% de agua en comparación con la aplicación uniforme y la variación entre la lámina aplicada y colectada fue de 8.41% atribuida al viento y retraso de actuación de las válvulas por efectos de electromagnetismo de las electroválvulas en condiciones de operación del pivote central bajo estudio. Concluyendo que se puede obtener un ahorro de agua considerable con la implementación de un sistema de riego de precisión en equipos de pivoteo central, provocando todos los impactos económicos, ambientales y hasta sociales favorables conocidos.

Palabra clave: Riego de control automático, Riego en tiempo real, Riego de Tasa Variable, Riego diferenciado, Precisión en Riego, Riego de conservación.

DEVELOPMENT OF A PRECISION IRRIGATION SYSTEM ON CENTRAL PIVOT TEAM

José Andrés León Mostacero, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2012

This research was conducted in the central pivot of the Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México. The objective was to design, build and evaluate a precision irrigation system operating on a central pivot. The methodology can be grouped into four components 1. Measurement and estimation of physical-chemical properties of the soil, 2. Interpolation and mapping data, 3. Development of precision irrigation system and 4. Evaluation system. The measurement of soil properties was manual and involved the georeferenced sampling, preparation, transportation, storage and analysis of physical properties in the laboratory. Interpolation purified and analyzed data with basic statistical finishing in using Ordinary Kriging Gaussian type to obtain the different maps. The development of precision irrigation system described in three parts: A) development of electromechanical component, based on the location of the system, wiring and installation of valves, B) electronic component, with the development of two tablets, and GPS integration communication with the computer, C) based software comparison of the data obtained by the GPS with a map set zones "homogeneous" for irrigation. The evaluation system based on comparison of the amount of water applied (ordered by the program) and the water collected at ground level. The results were a) thematic maps of soil physical properties (Bulk Density, pH, Electric Conductivity, Organic Matter, Field Capacity, Wilting Point, Texture), b) system hardware precision irrigation center pivot, which allows the operation of solenoid valves according to geoposicion, c) precision irrigation software open and adaptable to any equipment bearing circular (Kingpin) anywhere on earth, by any standard programming soil-crop variability, d) evaluation which found that irrigation accuracy allowed savings of 39.09% of water compared with the uniform application and variation between the applied sheet was collected and 8.41% attributed to wind and delay valve actuation by electromagnetic effects in terms of solenoid Kingpin operating under study. Concluding that can obtain substantial water savings by implementing an irrigation system accuracy in center pivot equipment, causing all the economic, environmental and social conditions known to.

Keyword: Precision Irrigation, Variable Rate Irrigation, Automation of Irrigation, Differential Irrigation.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a la memoria de mi padre **Luis Ernesto**[†], ejemplo de perseverancia, trabajo y honestidad.

A mi madre **Adelaida**, por darme la vida y por todo su cariño y apoyo brindado en esta etapa de mi vida.

A mi esposa **Rosalba** por su amor, apoyo y colaboración permanente en todas las fases de lo que ha sido este trabajo de investigación y mi vida misma.

A mis hermanas **Rosa Isabel** y **Zarita Luzmila** por su apoyo moral y ánimos para concluir mis estudios de doctorado.

A mi hijo **José Ernesto** que a pesar de su corta edad siempre estuvo conmigo en trabajo de campo además de sus buenas vibras para concluir esta tesis.

A todos los mexican@s amigo@s, que contribuyeron directa e indirectamente en la realización de este trabajo.

A mi pueblo Contumacino, conformado por personas trabajadoras, estudiosas y de buen corazón a las que espero jamás defraudar como profesional.

AGRADECIMIENTO

A todos los mexicanos y mexicanas que gracias al pago de sus impuestos y a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), recibí el apoyo económico para realizar mis estudios de doctorado

Al Colegio de Postgraduados y en especial al Programa de Hidrociencias por permitir la realización de mis estudios de doctorado y por el financiamiento de mis colegiaturas y parte del trabajo de investigación.

Al Dr. Héctor Flores Magdaleno, Consejero y Amigo, por todo el apoyo y acompañamiento durante la realización del doctorado y conducción del presente trabajo.

Al Dr. Francisco Gavi Reyes por todas sus aportaciones y sugerencias en la mejora de este documento y su apoyo en la gestión de pago de colegiaturas.

Al Dr. Héctor Debernardi de la Véquia, por sus opiniones y contribuciones en el proceso de afinamiento del documento final de tesis.

Al Dr. Roberto Ascencio Hernández, por todo el acompañamiento en el trabajo de campo y sus valiosas aportaciones en todo el transcurso del trabajo de investigación.

Al Dr. Francisco Miguel Águila Marín, por sus valiosas críticas, aportaciones y mejoras realizadas durante la revisión del documento y realización del trabajo en general, además de la gestión que permito realizar mi estancia doctoral.

Al Dr. Wolfram Spreer por sus opiniones y aportaciones al presente documento, además de permitir realizar una estancia en Alemania y China durante el año 2010.

Al Dr. Enrique Mejía Sáenz por su apoyo económico en el pago de colegiaturas, uso de materiales y equipos e instalaciones para análisis de muestras de suelo y gestión para la obtención de equipos de riego donde se desarrollo el trabajo de investigación

Agradecimiento muy especial y sincero al M.C. Carlos Alberto Gardea Flores, compañero, compadre y amigo que sin su apoyo, interés y dedicación no hubiese sido posible el desarrollo de la presente tesis.

A mi familia, mi cuñado Ing. Manuel Arce, mis tíos y tías, mis primos y primas; a mis suegros Prof. Rosendo Gómez, Prof. Josefina Hernández, a mis cuñados Lic. Zoraida y Prof. Rosendo, gracias por su apoyo incondicional y sus palabras de ánimo para realizar esta especialización profesional.

A mis amigos y compañeros, M.C. Roberto Vázquez, Ing. Ilianeli García, M.C. Arely del Rocío Ireta (mi comadre), M.C. Yamil Cartagena, M.C. Víctor Osorio, M.C. Saúl Montero y todos los que me brindaron su amistad durante mi estancia en México en la realización del doctorado.

A todos los trabajadores del Colegio que me apoyaron durante la realización del trabajo de campo, “Lic. Krispin”, “Don Cruz”, personal de carpintería, herrería y otros.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general.....	2
1.2. Objetivos particulares	2
1.3. Hipótesis	2
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Agricultura de precisión (AP).....	3
2.2. Riego de precisión (RP).....	4
2.3. Componentes principales de un sistema de riego a precisión	6
2.3.1. Adquisición de datos.....	7
2.3.1.1. Riego de precisión usando datos de la conductividad eléctrica (CE)	8
2.3.1.2. Mapeo de suelos con variables físicas, químicas y biológicas del suelo	10
2.3.2. Interpretación, análisis y presentación de información.....	13
2.3.2.1. Estadística descriptiva y variograma.....	14
2.3.3. Control y aplicación de riego a precisión.....	19
2.3.3.1. Software de control y comunicación.....	22
2.3.3.2. Hardware de operación y control	25
2.3.4. Evaluación del riego a precisión	28
2.4. Futuro del riego a precisión, oportunidades y limitantes	32
3. MATERIALES Y MÉTODOS	35
3.1. Ubicación	35
3.2. Materiales.....	36
3.3. Métodos.....	42
3.3.1. Propiedades físico-químicas del suelo:	43
3.3.1.1. Muestreo	43
3.3.1.2. Preparación de la muestra.....	44
3.3.1.3. Determinación de la Densidad Aparente (Da).	44
3.3.1.4. Determinación del pH (pH).	45
3.3.1.5. Determinación del Conductividad Eléctrica (C.E.).	45
3.3.1.6. Determinación de la Materia Orgánica (MO).....	46
3.3.1.7. Determinación de la textura.	48
3.3.1.8. Estimación de la Capacidad de Campo (CC).	49
3.3.1.9. Estimación del Punto de Marchitez Permanente (PMP).	50

3.3.2.	Interpolación y elaboración de mapas.....	51
3.3.3.	Sistema de riego a precisión.....	59
3.3.3.1.	<i>Sistema electrónico</i>	59
3.3.3.2.	<i>Software del sistema de riego</i>	67
3.3.3.3.	<i>Componente electromecánico</i>	70
3.3.4.	Evaluación del sistema.....	72
3.3.4.1.	<i>Medición del gasto de los aspersores</i>	72
3.3.4.2.	<i>Medición de la lámina aplicada</i>	73
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	76
4.1.	Propiedades físicas del suelo.....	76
4.1.1.	Densidad aparente	76
4.1.2.	pH.....	78
4.1.3.	Conductividad eléctrica.....	80
4.1.4.	Materia orgánica	82
4.1.5.	Capacidad de Campo	85
4.1.6.	Punto de marchitez permanente	86
4.2.	Operación del sistema de riego a precisión.....	90
4.3.	Evaluación del Sistema de riego a precisión.....	95
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	102
6.	LITERATURA CITADA	103

Contenido de cuadros

Tabla 1. Correlación de la CE y la Humedad del suelo ($p < 0.05$), en la superficie y perfiles medios.....	10
Tabla 2. Especificaciones técnicas del sistema pivote central de riego por aspersión.....	38
Tabla 3. Especificaciones técnicas, cantidad y precio de los materiales usados para el sistema de riego a precisión (control de 8 válvulas)	40
Tabla 4. Clasificación del suelo en función a la Da.....	45
Tabla 5. Clasificación del suelo en función al valor de su pH.....	45
Tabla 6. Clasificación de suelos en función a la conductividad eléctrica medidos en una solución suelo: agua, relación 1:2 (v:v).....	46
Tabla 7. Valores de referencia para clasificar los porcentajes de materia orgánica.....	48
Tabla 8. Clases texturales en función a los porcentajes de arena, limo y arcilla	49
Tabla 9. Parámetros descriptivos de la Da.....	77
Tabla 10. Parámetros descriptivos del pH	78
Tabla 11. Parámetros descriptivos del CE.	81
Tabla 12. Parámetros descriptivos de la MO.	83
Tabla 13. Parámetros descriptivos de la CC.	86
Tabla 14. Parámetros descriptivos del PMP.	87

Contenido de Figuras

Figura 1. Ciclo de la Agricultura a precisión según (Stanley, 2008).	4
Figura 2. Ciclo del riego a precisión según Smith et al. (2010).	6
Figura 3. Análisis exploratorio de datos a. Mapa de datos; b. Box Plot; c. Scatter Plot Tridimensional, d. Post Plot según Funes (2004).	14
Figura 4. Representación teórica del a. Semivariograma; b. Covarianza (ESRI, 2003).	16
Figura 5. Modelo esférico	18
Figura 6. Modelo exponencial	18
Figura 7. Modelo cúbico	18
Figura 8. Modelo gaussiano	18
Figura 9. Modelo potencial	19
Figura 10. Diagrama del flujo de RP del software VARIwise, desarrollado por (McCarthy et al., 2010).	33
Figura 11. Mapa de Ubicación del área de pivote central en el campo experimental del Colegio de Posgraduados, Campus Montecillos	35
Figura 12. Plano de la ubicación del experimento en el Colegio de Posgraduados, Campus Montecillos, (Ascencio H., 2009).	36
Figura 13. Equipo de riego, pivote central del Colegio de Posgraduados.	37
Figura 14. Materiales y equipos del sistema de riego a precisión	39
Figura 15. Diagrama de operación y evaluación del riego a precisión.	42
Figura 16. Metodología de muestreo de suelos con fines de riego a precisión.	43
Figura 17. Modelo de interpolación e intersección de un mapa de C.E. del suelo	52
Figura 18. Procedimiento de presentación de base de datos e interpolación	53
Figura 19. Procedimiento para la limitación del raster creado	54
Figura 20. Clasificación y conversión de raster a shape.	55
Figura 21. Límite de secciones y trayectoria de las válvulas.	57
Figura 22. Límite de secciones de riego y base de datos.	58
Figura 23. Pasos seguidos del proceso automático en la creación de mapas temáticos	59
Figura 24. Montaje del sistema de posicionamiento.	60
Figura 25. Conexión de GPS a pantalla digital.	61
Figura 26. Diseño electrónico de la tablilla 1	61
Figura 27. Diseño de la tablilla e integración de sistemas.	62
Figura 28. Mapa eléctrico de la tablilla 1	62
Figura 29. Diseño electrónico de la tablilla 2	63
Figura 30. Mapa eléctrico de la tablilla 2	64
Figura 31. Diseño de la tablilla de control individualizado de las válvulas.	65

Figura 32. Diseño de la tablilla de control individualizado de las válvulas.....	65
Figura 33. Diagrama de flujo de información y energía del sistema de riego diferenciado.....	67
Figura 34. Diagrama de flujo del sistema de riego diferenciado.	69
Figura 35. Ubicación del sistema de control de riego diferenciado.....	70
Figura 36. Cableado de sistema de control a electroválvulas.	71
Figura 37. Ubicación de electroválvula NaanDanJain de $\frac{3}{4}$ de Ø interno.	72
Figura 38. Medición del gasto de las salidas del riego diferenciado.....	73
Figura 39. Canaleta pluviométrica instalada para medición de lámina aplicada.	74
Figura 40. Diagrama de caja y semivariograma de la Da.	76
Figura 41. Mapa de densidad aparente.....	77
Figura 42. Diagrama caja y semivariograma del pH.....	79
Figura 43. Mapa de pH	79
Figura 44. Diagrama de caja y semivariograma de la CE.....	81
Figura 45. Mapa de Conductividad eléctrica	82
Figura 46. Diagrama de caja y semivariograma de la MO	83
Figura 47. Mapa de Materia orgánica	84
Figura 48. Diagrama de caja y semivariograma de la CC.....	85
Figura 49. Mapa de capacidad de campo.....	86
Figura 50. Diagrama de caja y semivariograma del PMP.....	87
Figura 51. Mapa de marchitez permanente	88
Figura 52. Mapas de CC y PMP en el área de riego del pivote central del COLPOS (Proyección UTM Zona 14 N).....	89
Figura 53. Pantalla 4 o pantalla de riego.....	90
Figura 54. Pantalla 3 o pantalla de secciones.....	91
Figura 55. Pantalla 2 o pantalla de dimensiones	92
Figura 56. Pantalla 1 o pantalla principal	94
Figura 57. Presentación del riego en Google Earth	95
Figura 58. Resumen de sesión de riego	96
Figura 59. Gasto promedio (5 repeticiones) de últimos 8 aspersores utilizados en el riego diferenciado	96
Figura 60. Comparación de riego uniforme y diferenciado en últimos 8 aspersores del pivote central	97
Figura 61. Mapa de lámina colectada en canaletas pluviométrica.....	98
Figura 62. Mapa de lámina diferenciada aplicada al área de riego del pivote central	99
Figura 63. Comparación de la lámina aplicada con la colectada	100
Figura 64. Vista tridimensional de la comparación de la lámina aplicada y la colectada.....	100

1. INTRODUCCIÓN

Definir el riego hoy en día difiere de la concepción que se tenía 20 años atrás, que era la simple aplicación del agua suplementaria a la obtenida de la lluvia, hoy definimos el riego como “Un medio artificial de aplicar agua a la zona radicular de los cultivos de forma que ésta pueda ser utilizada al máximo”. El riego de precisión por su parte incluye la exactitud en volumen y tiempo de aplicación de agua que impacte en el incremento de la rentabilidad de la cosecha, y disminuya el riesgo ambiental (Ortega B., 2001).

El riego de precisión se presenta como la tecnología actual y futura que fundamenta su desarrollo en sus cuatro componentes principales: a) adquisición de datos de suelo, cultivo y clima por medición o sensoramiento continuo, b) procesamiento de información geoespacial para la toma de decisiones, c) desarrollo de tecnología que permita la aplicación de agua e insumos en el momento, la cantidad y lugar “exacto”, y d) desarrollo de herramientas evaluativas y monitoreo que permitan no solo la identificación y comparación de beneficios sino la propuesta de mejoras en cualquier componente del sistema (Smith, et al., 2010), definiendo así un ciclo de retroalimentación y mejora continua en su precisión y exactitud.

Si bien el riego de precisión es una metodología basada en procedimientos sencillos para la aplicación de agua al suelo de manera diferenciada a un cultivo con cualquiera que sea su forma, posee una gran capacidad de adopción de las tecnologías de punta como los sistemas de posicionamiento, tecnología de medición y monitoreo de propiedades de suelo, condiciones de cultivo y clima en tiempo real, uso de información de generación continua de sensores remotos y satélites, aprovechamiento y desarrollo de software para procesamiento de información que permitan la toma de decisiones, implementación de sistemas de control automático que permitan monitoreo remoto por internet, evaluación mediante mediciones periódicas y “exactas” del desarrollo y rendimiento de cultivos como fin principal (Al-Karadsheh, et al., 2002).

La relación entre una acción simple como el riego (dentro de un sistema de producción moderno) con temas como la precisión, exactitud, adelantos tecnológicos, sistemas de comunicaciones, y la transversabilidad de ciencias: electrónica, electromecánica, inteligencia artificial, robótica, cada vez es menos raro, considerando un enfoque de sistemas y en el que se van incorporando actores y procesos que lleven no solo a incrementar la cantidad de las cosechas, sino a mejorar la calidad de estas, nunca va ser demasiado la propuesta de uso de las últimas tecnologías sabiendo que impactarán favorablemente en el cuidado del ambiente, además de facilitar, eficientizar y agilizar los procesos productivos en la agricultura.

Desde 1990 se viene trabajando en la modificación principalmente de equipos de riego móviles (pivotes centrales y avances laterales), para hacer riego de precisión, en función a la medición y monitoreo de un sin número de variables de suelo y cultivo, si bien, estas investigaciones se vienen realizando en países de la Unión Europea y EE.UU. (Smith, et al., 2010), también tenemos avances significativos en países latinoamericanos como Argentina, Brasil, Chile y México.

El presente documento contiene una propuesta para desarrollar un sistema de riego a precisión, permitiendo diseñar, construir, implementar, operar y evaluar una nueva forma eficiente y eficaz de aplicar agua a los cultivos

1.1. Objetivo general

Diseñar, construir, implementar y evaluar un sistema de riego a precisión

1.2. Objetivos particulares

- Elaborar mapa de variables físicas del suelo: textura, pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, punto de marchitez permanente, capacidad de campo del suelo cubierto regado por el pivote central del Colegio de Postgraduados.
- Elaborar un software de riego de precisión, en función a la variación espacial de propiedades físicas del suelo y desarrollo del cultivo.
- Adaptar los componentes de control para la aplicación de riego a precisión en función a los requerimientos del cultivo.
- Evaluar, comparar el sistema de riego de precisión y la aplicación de láminas uniformes.
- Determinar el ahorro de agua con el riego de precisión.

1.3. Hipótesis

El riego de precisión es una metodología plenamente adaptable en equipos de riego móvil caso pivote central y se puede diseñar, implementar y poner en funcionamiento el sistema con los recursos que se tiene logrando un ahorro de agua significativo.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Agricultura de precisión (AP¹).

La agricultura de precisión (AP) consiste en efectuar la intervención correcta de agua, en el momento adecuado, en el lugar preciso en un cultivo y con la dosis de insumos óptima (Gil, 2000), mediante el uso de la automatización (Leyva *et al.*, 2001).

Por lo anterior, la AP, como técnica, busca aumentar la productividad, rentabilidad y disminuir el impacto ambiental, a través de la diferenciación de sectores “homogéneos”, para ello debe proporcionar un manejo específico a fin de que la superficie agrícola exprese su máximo potencial (Ortega, 2008).

Ortega (2001) argumenta que la AP requiere de información de posicionamiento satelital, no obstante ésta no indica lo que se debe de hacer en el campo, sino permite a través de ciertas herramientas proporcionar a cada zona del campo cultivado el tratamiento agronómico más apropiado, tomando en cuenta el aspecto económico, productivo y ambiental .

La filosofía de la AP se presentó en 1929 por Linsley y Bauer, investigadores de la Estación Experimental Agrícola de la Universidad de Illinois (Elías y Camargo, 1999). Estos dos investigadores dividieron un área experimental en pequeñas sub áreas, y elaboraron un mapa de variabilidad espacial de la acidez del suelo. El estudio concluyó señalando que la dosis de calcio utilizada para corregir el pH debía variar a lo largo del área, pudiendo ser realizada a través de la aplicación diferenciada. Sin embargo, con el aumento de las áreas productivas y la introducción de equipos mecanizados la utilización de esta técnica se volvió no viable (Balastreire, 2001, citado por Leyva *et al.*, 2001).

El ciclo típico de la AP consta de cuatro etapas, como se muestra en la Figura 1: E1) recolección de datos referenciales, muestreo y análisis de suelos, monitoreo de cultivos y mapas de producción. E2) procesamiento de datos, análisis, interpolación y modelaje. E3) análisis e interpretación de la información, con software especializado. Y E4) aplicación de

¹ Agricultura de Precisión su acrónimo en inglés PA (Precisión Agriculture)

insumos, respetando la variabilidad del espacio y la diferenciación de los tratamientos (Stanley, 2008).

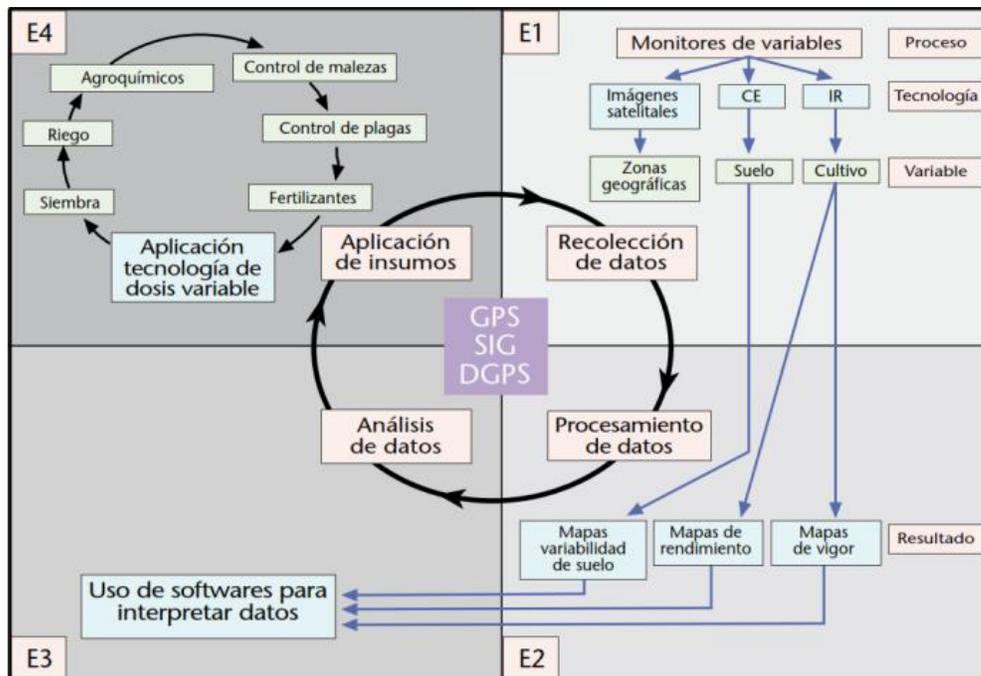


Figura 1. Ciclo de la Agricultura a precisión según (Stanley, 2008).

2.2. Riego de precisión (RP²).

Smith *et al.* (2010) considera que el riego de precisión está en la etapa de nacimiento, por lo mismo se denomina de múltiples formas como “riego prescriptivo”, “de prescripción”, “riego sitio-específico”, “riego de tasa variable”, “riego diferencial de precisión”, “riego preciso”, “riego diferenciado”.

Por lo anterior existen diversas definiciones como: “*la aplicación exacta y precisa de agua para satisfacer las necesidades específicas de plantas individuales o unidades de gestión y con esto minimizar el impacto adverso*” (Misra *et al.*, 2005 y Raine *et al.*, 1997). “*La aplicación de agua en un sitio determinado en volumen y tiempo necesario para la producción óptima, la rentabilidad o el objetivo de gestión del lugar*” (Camp *et al.*, 2006). “*Aplicación de agua en el lugar adecuado y con la cantidad necesaria*” (Al-Karadsheh *et*

² Riego de precisión o su acrónimo en inglés PR (Precision Irrigation)

al., 2002). “El manejo de riego (profundidad, tiempo) sobre la base de los cultivos que se definen en sub áreas de un campo conocido como zonas de manejo” (King *et al.*, 2006).

Para Smith *et al.* (2010), el riego actual aspira y debe ser una actividad de precisión que involucre la estimación precisa del requerimiento hídrico en el cultivo y la aplicación precisa del volumen de agua en el tiempo requerido. Por lo tanto, el RP debe satisfacer las necesidades hídricas de la cosecha en el momento oportuno, garantizando la mayor eficiencia y diferenciación posible. Para lograrlo, se requiere precisión en la estimación de la cantidad del recurso hídrico al aplicarlo y el control de las aplicaciones con alta eficiencia volumétrica. A diferencia del concepto anterior de riego (aplicación de agua a los cultivos), el RP debe hacer la aplicación eficaz y diferenciada de agua que satisfaga las necesidades de una cosecha promedio, y debemos considerar que no es una receta ya que la aplicación “exacta” depende de la interacción de múltiples variables espaciales que piden una atención específica por “planta”

En palabras sencillas, el riego de precisión se puede definir como un sistema donde cada gota de agua es aprovechada por la planta regada y se aplica con la cantidad exacta en el momento justo. Además, permite que el volumen de abonos que se apliquen a través del riego también sean los necesarios. Es así, que el corte del riego se efectúa en el momento idóneo para que no haya filtraciones al subsuelo con las consecuentes contaminaciones a las aguas subterráneas por fertilizantes y pesticidas, es decir regar lo justo en el momento y lugar exacto (Copestake, 2009). Smith *et al.* (2010) y Barnes *et al.* (2000) indican que existen elementos comunes en las definiciones del RP, a señalar:

- Consiste en la gestión óptima de los componentes espaciales y temporales de cultivo.
- Es integral, por lo que se debe combinar a la perfección el funcionamiento óptimo del sistema de aplicación con el cultivo, el agua y la aplicación de solutos.
- No es una tecnología específica, sino una forma de pensar dentro de un enfoque de sistemas, donde el rendimiento del cultivo se ha optimizado a través de la recolección sistemática y el tratamiento de la información sobre el cultivo y el campo, la gestión del riego y tecnología de aplicación, detección, tecnologías de modelado y control son adecuados para uso en un sistema de RP.

- Es aplicable a todos los métodos de riego y la aplicación para todos los cultivos en escalas espaciales y temporales en menor o mayor grado de sofisticación.
- Sus objetivos específicos tienen el potencial de alterar la toma de decisiones y lograr objetivos múltiples de mejorar la eficiencia del uso de insumos, reducir los impactos ambientales, aumentar los beneficios agrícolas y la calidad del producto. Se considera un sistema de aprendizaje continuo, donde la medición de la ingeniería, comportamiento agronómico y económico son esenciales para proporcionar retroalimentación y mejora para el siguiente ciclo, es decir "cerrar el círculo".

2.3. Componentes principales de un sistema de riego a precisión

En la Figura 2 se muestra el enfoque de sistemas del RP, constituido por cuatro componentes principales, cabe indicar que dentro de cada ciclo existe la capacidad de retroalimentarse en todas sus partes se tiene la Figura 2, que representa sus cuatro componentes principales.

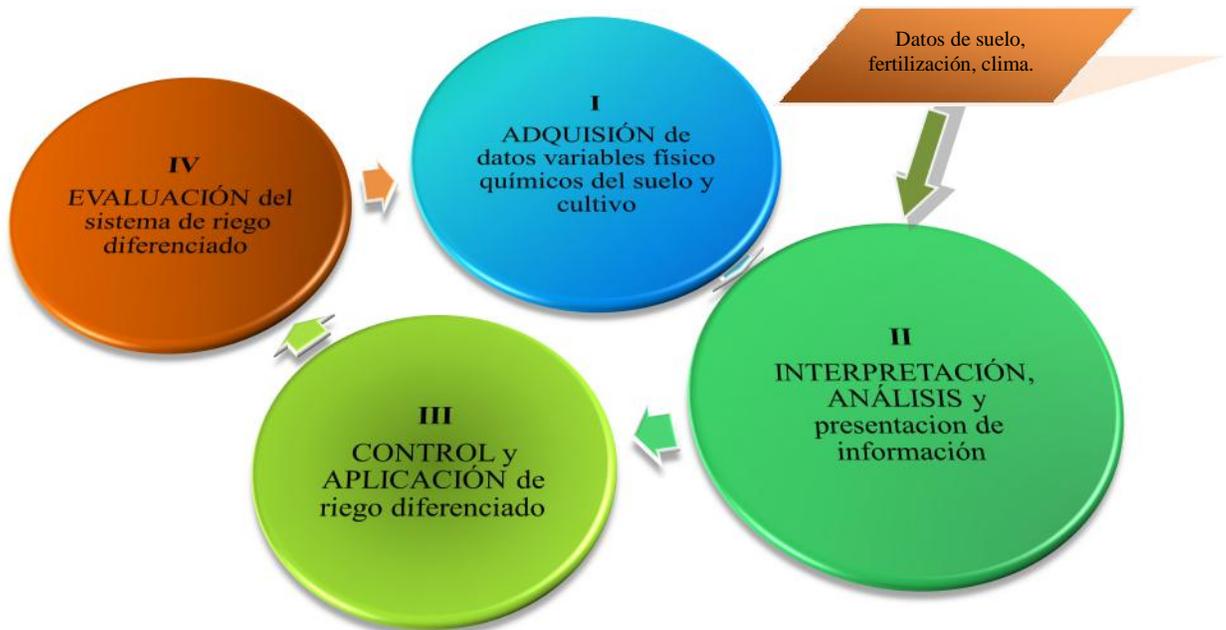


Figura 2. Ciclo del riego a precisión según Smith *et al.* (2010).

2.3.1. Adquisición de datos

Un sistema de RP inicia con una variabilidad espacial y/o temporal de las condiciones del suelo y de los cultivos dentro y entre los campos. Así, como la capacidad de identificar y cuantificar dicha variabilidad en términos de necesidad hídrica de las plantas (Smith *et al.*, 2010).

La obtención de datos inicia con la ubicación geoespacial del sitio, medición de la topografía del suelo, muestreo de suelos en una cuadrícula definida, medición directa de propiedades del suelo y del cultivo, recorrido del cultivo para la detección de plagas y enfermedades, monitoreo de rendimientos, sensoramiento remoto de suelos y cultivos, y digitalización de mapas, mediante el uso de tecnologías como GPS³, SIG⁴, instrumentos topográficos, sensores remotos, y sensores directos (Ortega, 2008).

En la actualidad, se usan un sin número de sensores construidos, operados y evaluados para medir y correlacionar variables del suelo, del cultivo y hasta del aire como es el uso de fotos, ortofotos, imágenes de satélite y videografías, que mediante una clasificación supervisada se llega a definir zonas “homogéneas” que permite la aplicación precisa de insumos (Chenghai, 1999).

Lütticken (2000) indica que en la actualidad se puede monitorear el cultivo y el medio que lo rodea (por ejemplo el aire), no obstante el factor suelo es el aspecto de variabilidad más considerado. A pesar de existir instrumentos, métodos y procedimientos de muestreo automatizado de muchas variables, el suelo sigue siendo la toma de muestras georeferenciadas y análisis en laboratorio más utilizado para la variabilidad espacial. Este estudio inicia con la consideración de la profundidad del horizonte cultivable, número de muestras, época y de muestreo haciendo de este un método rápido, rentable y preciso que proporcione información fiable.

Shatar (1999) argumenta que el fin principal de un cultivo “es el rendimiento”, para lograrlo los suelos se deben muestrear para medir y estimar variables, no solo que

³ Global Positioning System o su acrónimo en español SPG (Sistema de Posicionamiento Global).

⁴ Sistemas de Información Geográfica o su acrónimo en inglés GIS (Geographic Information System),

definan la aplicación diferenciada de un componente como el riego, sino que permita inferir en otras variables, de tal manera que se obtenga el manejo integral de los demás factores de la compleja ecuación del rendimiento. Por ello, propone medir la variabilidad de la mayoría de propiedades físicas (Da⁵, CC⁶, PMP⁷, CE⁸, Textura), químicas (pH⁹, N¹⁰, P¹¹, K¹², Ca¹³, Mg¹⁴, Na¹⁵, micro elementos) y hasta biológicas (MO¹⁶, C¹⁷, micro flora y fauna) del suelo.

2.3.1.1. Riego de precisión usando datos de la conductividad eléctrica (CE)

El RP requiere de la disponibilidad de datos (de bajo costo en su recolección), sistemas de posicionamiento y desarrollo de la programación en equipo. La tendencia de obtención de datos de campo en pequeña escala pone frente al aprovechamiento de métodos rápidos, no destructivos, en tiempo real y con sensores, como el EM38¹⁸ que mide la CE.

Al-Karadsheh *et al.* (2002) mencionan que la CE es una variable que puede ser correlacionada con otras para la programación del riego, y es considerada como un indicador químico del suelo que incide sobre la relación suelo-planta, calidad de agua, capacidad amortiguadora del suelo y disponibilidad de nutrimentos para las plantas y microorganismos (Larson, 1991 y Doran y Parkin, 1994).

La CE con el EM38 se puede determinar sin contacto físico entre el sensor y el suelo, mediante la inducción de doble sistema de bobina electromagnética (EMI¹⁹) (Rhoades *et al.*, 1989, Hendrickx *et al.*, 1992, Sudduth *et al.*, 1999, Dalgaard *et al.*,

⁵ Densidad Aparente

⁶ Capacidad de campo

⁷ Punto de marchitez Permanente

⁸ Conductividad Eléctrica

⁹ Potencial Hidrogeniónico

¹⁰ Nitrógeno total en el suelo

¹¹ Fosforo disponible en el suelo

¹² Potasio móvil del suelo

¹³ Calcio total en el suelo

¹⁴ Magnesio móvil en el suelo

¹⁵ Sodio intercambiable

¹⁶ Materia Orgánica

¹⁷ Carbono Orgánico

¹⁸ Sensor que mide la Conductividad eléctrica del Suelo

¹⁹ Inducción Electromagnética o su acrónimo en ingles EMI (Electromagnetic Induction)

2001, Domsch, 2001, y Sudduth *et al.*, 2001). El EM38 desarrollado por Geonics Limited, Mississauga, Ontario, Canadá, proporciona una rápida medición no destructiva de la CE del suelo en mS/m (Geonics Limited, 2000), después de la calibración y montado junto a una unidad DGPS²⁰ es tirado por una moto 4 x 4 y transportado a lo largo del campo en líneas espaciadas cada 5 m de distancia, permitiendo medir la CE, que integrado a los valores del DGPS dan la ubicación con precisión inferior al metro para cada medida individual a 1 s, mismo que se interpola en un SIG (Al-Karadsheh *et al.*, 2002).

Por su parte, Rhoades y sus colegas, en los últimos 20 años han demostrado que la CE se puede medir con la receptividad eléctrica y la inducción electromagnética, como una de las propiedades más útiles y fáciles de obtener del suelo (Corwin, 2003). Sin embargo, puede ser muestreada y analizada en laboratorio bajo diferentes métodos como extracto de saturación, relación 1:2; 1:3; 1:5 suelo: agua (v:v) (Gartley, 1995 y revied 2011), o con el uso de la técnica de 4 electrodos in-situ (Rhoades *et al.*, 1990), y con una densidad suficiente (dependiendo del área muestreada y recursos), cabe indicar que por interpolación se obtendrá el mapa de CE (Wetterlind, *et al.*, 2008).

Hedley y Yule (2009) encontraron que la correlación de la CE y la máxima capacidad de retención de agua en el suelo fue de $r^2 = 0.60$, mientras que Sherlock y McDonnell (2003) y Brevik *et al.* (2006) encontraron un $r^2 = 0.70$; finalmente Huth y Poulton (2007) mencionado por Hedley (2009) encontraron un $r^2 = 0.93$. Por su parte, Sudduth *et al.* (2005) llevaron a cabo un estudio extenso de suelos en diferentes lugares de EE.UU., quienes utilizaron dos sensores EM38 y Veris 3100²¹, y obtuvieron como resultado la regresión estadística de la CE y la humedad de la superficie y perfil medio del suelo, como se indica en la tabla 1.

²⁰ Differential Global Positioning System o su acrónimo en español SPGD (Sistema de Posicionamiento Global Diferencial)

²¹ Máquina para medir la conductividad eléctrica por contacto.

Tabla 1. Correlación de la CE y la Humedad del suelo ($p < 0.05$), en la superficie y perfiles medios

Correlación de la CE	Tipo de suelo	EM38		Veris 3100		Veris + EM38	
		R ²	ES ²²	R ²	ES	R ²	ES
Humedad en la superficie del suelo	MO	0.24	29	0.48	25	0.69	19
	MI	0.30	30	0.30	30	0.30	30
	WI	0.33	19	0.45	17	0.52	16
	SD	0.70	23	0.79	20	0.79	20
	IA	0.39	32	0.39	33	0.39	33
	Total		0.23	42	0.23	42	0.50
Humedad en el perfil medio del suelo	WI	0.38	27	0.71	19	0.75	19
	SD	0.68	28	0.73	26	0.68	28
	IA	0.40	36	0.34	38	0.58	31
	Total		0.15	45	0.15	45	0.24

MO: Áreas centrales de Missouri, MI: Sur de Michigan y Norte de Indiana, WI: Sur de Wisconsin y Norte de Illinois, SD: Tierras altas y llanuras de Dakota, IA: Centro de Iowa y Minnesota, tomado de (Sudduth *et al.*, 2005).

Si bien, la CE (medida con el EM38) no es una variable con alta correlación con la capacidad de campo, punto de marchitez permanente y agua fácilmente disponible ($r = 0.58$, $p < 0.01$), es un método de medición no destructivo que permite fenotipificar áreas homogéneas del suelo y hacer aplicaciones diferenciadas del recurso hídrico (Romano *et al.*, 2010). Por tanto, Hedley (2010) la considera un método para asignar el agua disponible hasta la capacidad de campo a un suelo, con el uso de un sistema de riego por aspersión móvil (pivote central y/o avance lateral).

2.3.1.2. Mapeo de suelos con variables físicas, químicas y biológicas del suelo

Navarro (2010) realizó su experimento en el lote A1 del campo experimental de Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, donde midió, analizó e interpoló las variables o indicadores como: RM^{23} , v^{24} , K_s^{25} , I_a^{26} , Da, MO, CE, pH, y textura, de esto encontró variación significativa de todas las variables en función al espacio, a

²² Error estándar.

²³ Resistencia mecánica

²⁴ Humedad volumétrica

²⁵ Conductividad hidráulica

²⁶ Infiltración acumulada

pesar de hacerse en un muestreo muy denso, bajo una cuadrícula de 5*5 m, indicando el comportamiento similar e interacción entre variables y definiendo el uso de cualquiera de estas para la aplicación diferenciada de insumos, previo análisis de relación y calibración.

Karlen *et al.* (1997) manifiestan que los indicadores físicos del suelo son las propiedades que aceptan, retienen y proporcionan agua a las plantas y limitan el crecimiento de las raíces, emergencia de plántulas, infiltración y movimiento de agua en el perfil. Algunos de estos son textura, estructura, profundidad, infiltración, Da, capacidad de retención de agua, compactación, porosidad, Ks estabilidad de agregados, resistencia a la erosión y pendiente.

Para Larson (1991) y Doran y Parkin (1994), los indicadores químicos inciden en la relación suelo-planta, calidad de agua, capacidad amortiguadora del suelo y disponibilidad de nutrientes a plantas y microorganismos. Algunos de estos son pH, CE, N-P-K²⁷ extraíbles, MO, C0 total y lábil, CIC²⁸ y micronutrientes.

Kennedy y Papendicks (1995) y el Soil Quality Institute (1996) afirman que los indicadores biológicos se derivan de la presencia de múltiples organismos que viven en el suelo, entre sus funciones se consideran la descomposición de la MO, reciclaje de nutrimentos, degradación de residuos tóxicos, formación de estructura del suelo, control de la disponibilidad nutrimental. Algunos de estos indicadores son la biomasa microbiana, poblaciones de lombrices y nemátodos, medición de la actividad microbiana relacionado con subproductos como enzimas, N, C⁰, fijación biológica del N, MO, y N potencialmente mineralizable.

Yagodin *et al.* (1982) explican que la evaluación de la calidad de un suelo debe considerar las dimensiones temporales y espaciales, ya que ninguna propiedad del suelo es permanente, por lo que la tasa y frecuencia de cambio varían. Mientras que Acton y Gregorich (1995) indican que el área a evaluar para saber la calidad edáfica puede ser tan pequeña como una parcela, una nación o incluso todos los suelos del

²⁷ Nitrogeno – Fosforo – Potasio

²⁸ Capacidad de Intercambio Cationico

mundo, aceptándose que el empleo de indicadores es una alternativa para entender la complejidad de la variabilidad de los suelos.

El dinamismo de las propiedades del suelo considera parámetros que a la escala de medición aceptada, prácticamente “no cambian en el tiempo” como textura (porcentaje de arena, limo y arcilla) y Da, por ello no deben considerarse como indicadores. De manera contraria valores de CV²⁹, MO, CE, pH cambian en periodos más cortos y pueden reflejar procesos como retención de agua, drenaje, erosión, salinidad, acidez, resultando buenos indicadores del dinamismo del suelo (Blakkes *et al.* (1994) y (Dumanski, 1994, citado por Navarro, 2010).

Respecto al pH del suelo se considera que es una medida de la concentración de iones hidrógeno en el suelo que se relaciona con la disponibilidad de macro y micronutrientes. Para la mayoría de las plantas bajo riego el valor es aceptable entre 5.0 y 8.5 (medido en cloruro de calcio) donde se maximiza la disponibilidad de nutrientes y por lo tanto el potencial de crecimiento (Department of Environment and Conservation, 2004). Los cambios de tipo de labranza o sistema de cultivo y la incorporación de fertilizantes producen modificaciones en el pH, en especial en la capa de 0-10 cm y hacen de este factor una variable dinámica espacio temporal (Pierce *et al.*, 1994 y Rhoton *et al.*, 1993).

Por otra parte, Green *et al.* (2006) manifiestan que la variabilidad espacial y temporal del contenido de agua en un suelo se recomienda medir con el reflectómetro de dominio temporal (TDR³⁰), que es un método de mucha exactitud para mediciones de campo in situ del contenido volumétrico de agua en el suelo. Estos autores indican que el muestreo georeferenciado con el TDR presenta una fuerte variación según las diferencias del perfil del suelo en su textura, estructura, profundidad y la posición topográfica. Por ejemplo, los suelos arenosos por tener una mayor proporción de poros grandes drenan más rápido que los poros más pequeños. Además, Hedley (2009) agrega que la posición topográfica también es un factor de control para el

²⁹ Cobertura vegetal

³⁰ Time-Domain Reflectometer, con su acrónimo en español RDT (Reflectómetro de Dominio Temporal).

drenaje, es así que suelos en las zonas bajas por lo general son más húmedos y demoran más tiempo en secarse.

Por último, la utilización de todas las propiedades del suelo como indicadores para caracterizar sitios específicos sería imposible, por lo que se debe identificar y seleccionar un mínimo de aquellas que cumplan con algunas características como la integración de propiedades físicas, químicas y biológicas; fáciles de medir, susceptibles a monitorear, basadas en información disponible, además su medición debe ser rectificable y reproducible, sensitivos a variaciones de clima y manejo, y cambios en características en periodos cortos (Doran y Parkin, 1994 y Gregorich *et al.*, 1994).

2.3.2. Interpretación, análisis y presentación de información

Los datos que se recopilan se deben interpretar y analizar a una escala apropiada, que permita su utilización en la aplicación de las decisiones para hacer el control del RP (McBratney *et al.*, 2005). Los avances recientes en el análisis geoestadístico consideran que el resultado de los tratamientos no es de efecto fijo, debido a que puede estimar la respuesta a diferentes tratamientos y los contrastes de estos, para cualquier sitio de destino. Por ejemplo, kriging es un método que evalúa la auto correlación de puntos de datos (sus relaciones espaciales) y los modelos de predicción de una superficie (Bishop y Lark, 2006).

Los métodos geoestadísticos, kriging y cokriging, son de uso común para la generación de mapas de suelos. Tabor *et al.* (1984) y Tabor *et al.* (1985) usaron para cuantificar la variabilidad de diversos indicadores espaciales en la ciencia del suelo, como nitratos en algodón, Yates *et al.* (1993) en suelos salinos, Samra y Gill (1993) en pH y la absorción de sodio por árboles en suelos contaminados, Yates *et al.* (1986a) y Yates *et al.* (1986b) en CE. Yates y Warrick (1987) citado por Pozdnyakova y Zhang (1999) indican que el kriging se utiliza para evaluar la distribución espacial de una variable sobre la base de datos de la muestra de la propia variable, mientras que el cokriging se aplica para mejorar la estimación de las variables en la muestra con abundantes datos de otras variables.

2.3.2.1. Estadística descriptiva y variograma

Funes (2004) explica que después de la colección de datos de campo, se debe llevar a cabo un análisis básico de estadística descriptiva, el cual inicia con la **a)** presentación de datos en un “mapa de datos”, seguido de un **b)** análisis de diagrama de caja o Box Plot, luego de la **c)** presentación en un gráfico de dispersión tridimensional o scatter plot tridimensional, finalmente, **d.** hasta algunas técnicas de análisis univariadas como el Post Plot, como se muestra en la Figura 3.

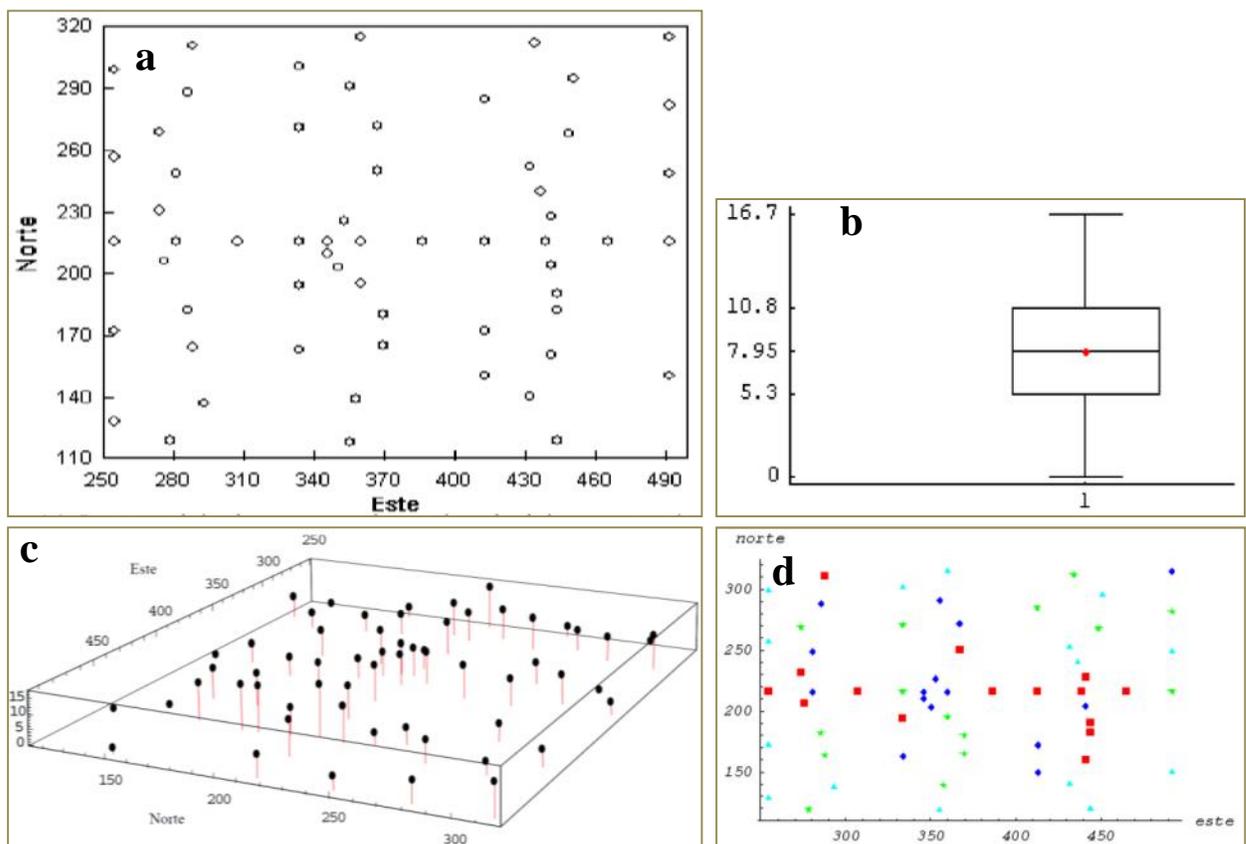


Figura 3. Análisis exploratorio de datos **a.** Mapa de datos; **b.** Box Plot; **c.** Scatter Plot Tridimensional, **d.** Post Plot según Funes (2004).

Díaz y Casar (2009) apoyados con el diagrama de caja (b), señalan que se deben de identificar los datos extremos ó que salen de los parámetros mínimo y máximo, una posibilidad es eliminar dichos valores cuando se tiene una densidad de muestra alta,

en caso contrario se debe de regresar a campo para realizar una nueva toma de muestra que permita la revisión y comprobación del proceso de análisis en laboratorio.

Para Gallardo (2006) la explicación del comportamiento de una variable en diferentes direcciones del espacio se facilita con el uso de una técnica de interpolación como el kriging, el cual se basa en la función continua que permite asociar la variabilidad de la estimación e inicia con el cálculo del semivariograma o variograma.

El variograma se define como la media aritmética de todos los cuadrados de las diferencias entre pares de valores experimentales separados por una distancia h , describiendo la dependencia espacial para una variable (Webster y Oliver, 2007 y Heisel *et al.*, 1999). Se caracteriza por su función de distribución m -dimensional, que en su conjunto constituyen la “ley espacial de probabilidad” del campo aleatorio. En geoestadística son suficientes los momentos de los dos primeros órdenes: a) la esperanza matemática que es el momento del primer orden, y b) la varianza, la covarianza de dos variables aleatorias y el variograma se consideran como los tres momentos del segundo orden (Funes, 2004).

La ecuación del semivariograma experimental se define:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{\sum_{n=1}^{N(h)} (Z(\mu_i) - Z(\mu_i+h))^2}{2N(h)}, \quad h = \text{dist}(\mu_i, \mu_i) \in R^1 > 0, \quad \text{donde } \hat{\gamma}(h) \text{ es la}$$

representación del semivariograma experimental, $N(h)$ es el número de pares separados por h , $(\mu_1 + h)$ es la densidad de muestreo (Matheron, 1962, Cressie, 1991, Heisel *et al.*, 1999, Clark, 2001, Krasilnikov y Sidorova, 2008).

La covarianza, por su parte, se define $\hat{\gamma}(h) = C(0) - C(h)$, que en forma teórica y gráfica es como la representación de la Figura 4.

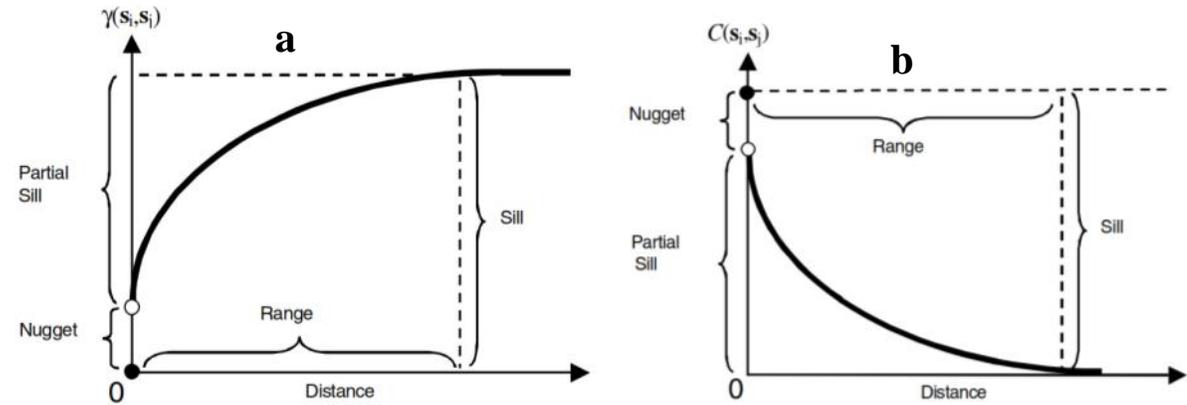


Figura 4. Representación teórica del **a**. Semivariograma; **b**. Covarianza (ESRI, 2003).

Componentes del semivariograma:

- Nugget o efecto pepita (C_0) indica la discontinuidad del semivariograma para distancias que sean inferiores que la menor distancia que se da entre los puntos muestrales. Parte de esta discontinuidad puede ser dividida en errores de medición, una pobre precisión analítica, o más a menudo por mineralización altamente errática a baja escala. Por definición debe ser nulo en el origen, puesto que la variancia de dos puntos separados por 0 m debería ser cero (Gallardo, 2006).
- Sill, umbral, o meseta ($C_t=C+C_0$) es el valor límite máximo constante que alcanza el semivariograma, se corresponde con la variancia de una observación, es decir, es el valor de $\hat{\gamma}(h)$ para el cual, con el aumento de h , el valor de sill permanece constante. Un alto cociente indica una variable espacialmente muy predecible.
- Range, rango o alcance (a) es la distancia dentro de la cual las muestras están correlacionadas espacialmente o son independientes, también se define como la distancia en la cual se alcanza la meseta, cuando los valores de h son superiores al rango la correlación es nula (ESRI, 2003, Funes, 2004 y Navarro, 2010). Además, representa el tamaño de grano o mancha que muestra la variable (Paramá, 2006), por ejemplo, el rango de la materia orgánica del suelo es aproximadamente 8 m para suelos del Colegio de Postgraduados y alrededores (Navarro, 2010).

El análisis de los datos, a través del semivariograma, generalmente busca que el software ajuste al “mejor” modelo y calcule los valores de los componentes, basado en los menores residuales o en el mayor grado de correlación R^2 (Gallardo, 2006).

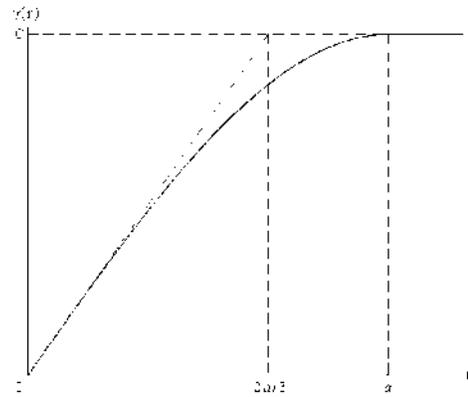
Los criterios para seleccionar un modelo u otro dependen de los objetivos del trabajo. Cuando se tiene información a priori del comportamiento de la variable es necesario realizar un ajuste manual de los modelos al semivariograma empírico, mediante el uso de algún software. Se inicia fijando el nugget, sill o rango dependiendo del tipo de información que se tenga de la variable y los parámetros se ajustan cuando no se cuenta con la información. Si el objetivo del trabajo es comparar los parámetros de los semivariogramas entre distintas variables o cambios en el semivariograma con el tiempo o en el espacio, la utilización de modelos diferentes resulta poco útil. Por ejemplo, los rangos del modelo esférico y el exponencial no son directamente comparables, el esférico es el único que tiene un sill verdadero, ya que tanto el exponencial como el gaussiano alcanzan el sill de forma asintótica (Krasilnikov *et al.*, 2008 y Hengl, 2007).

Los tres modelos anteriores se conocen como transicionales, porque en ellos se pueden estimar el sill, sea verdadero o no. El lineal ni siquiera tiene sill, no es transicional. El esférico es el más usado porque tiene verdadero sill, en segundo lugar es el exponencial sobre el gaussiano, aunque este último refleja muy bien la continuidad espacial. La interpolación de puntos basada en este modelo es muy exigente con respecto a los valores de entrada, produciendo frecuentemente representaciones gráficas alejadas de la realidad. Por último, el modelo lineal es usado para reflejar una pobre estructura espacial, o una estructura espacial cuya dimensión supera la de la parcela de estudio (Gallardo, 2006, Kerry y Oliver, 2008, Pozdnyakova y Zhang, 1999).

Los modelos más utilizados en el semivariograma son los que se presentan en las figuras siguientes y se deben a que estos realizan el diseño de muestras y estimación de pequeñas áreas (Giraldo, 2008, Iglesias, 1998).

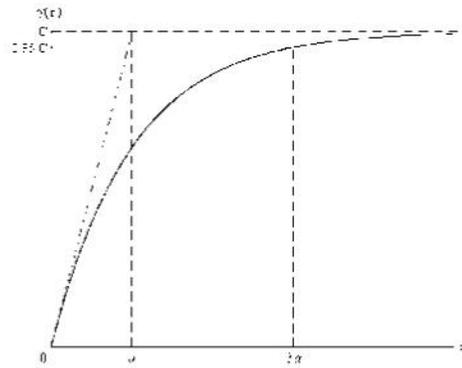
$$\gamma(r) = \begin{cases} C \left(\frac{3r}{2a} - \frac{1}{2} \frac{r^3}{a^3} \right) & \text{para } 0 \leq r \leq a \\ C & \text{para } r \geq a \end{cases}$$

Figura 5. Modelo esférico



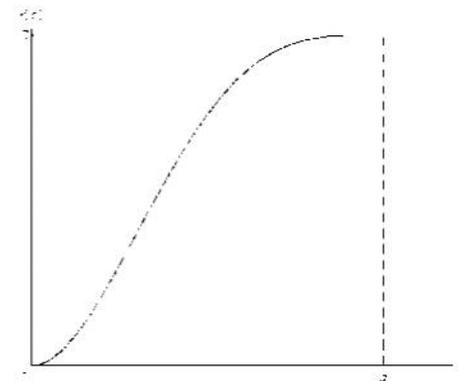
$$\gamma(r) = C \left(1 - \exp\left(-\frac{r}{a}\right) \right)$$

Figura 6. Modelo exponencial



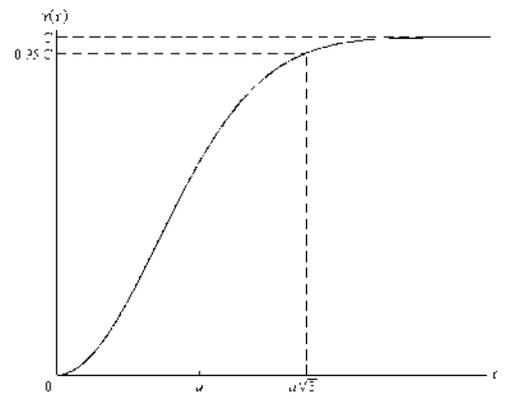
$$\gamma(r) = \begin{cases} C \left(7 \frac{r^2}{a^2} - \frac{35}{4} \frac{r^3}{a^3} + \frac{7}{2} \frac{r^5}{a^5} - \frac{3}{4} \frac{r^7}{a^7} \right) & \text{para } 0 \leq r \leq a \\ C & \text{para } r \geq a \end{cases}$$

Figura 7. Modelo cúbico



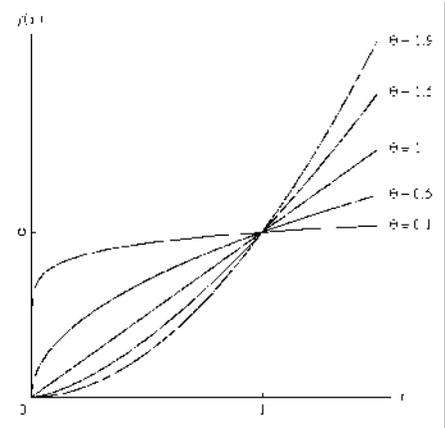
$$\gamma(r) = C \left(1 - \exp\left(-\frac{r^2}{a^2}\right) \right)$$

Figura 8. Modelo gaussiano



$$\gamma(r) = \omega r^\theta \text{ con } 0 < \theta < 2.$$

Figura 9. Modelo potencial



El Kriging es un método de gran fortaleza en el conocimiento del comportamiento de la variable en el espacio, posee un semivariograma que tiene la capacidad predictora de cada punto en función de la distancia que lo separa con otro punto. Cuando se realiza un kriging hay que suministrar los parámetros del semivariograma isotrópico o los anisotrópicos, y decidir la estrategia adecuada para la selección de puntos para la interpolación. Kriging en la mayoría de los casos, la interpolación por bloques correlaciona mejor con los valores verdaderos, siendo generalmente más exacta que la interpolación puntual (Isaaks y Srivastava, 1989).

2.3.3. Control y aplicación de riego a precisión

Smith *et al.* (2010) consideran que la reasignación de entradas y el ajuste de la gestión del riego a escalas temporales y espaciales son componentes esenciales de un sistema de riego a precisión. La aplicación de láminas diferenciales de agua sobre un campo depende de la naturaleza del sistema de riego y se puede conseguir de dos maneras: variando la tasa de aplicación o el tiempo de aplicación. La utilización de controladores automáticos con datos en “tiempo real” a partir de sensores o interpolación de información georeferenciadas, son los medios más fiables y precisos que podrían llegar a controlar las aplicaciones de riego.

El nuevo enfoque para los sistemas de riego de movimiento continuo de riego (principalmente pivotes y avances) controla electroválvulas de tipo solenoide, conectados independientemente o formando grupos de boquillas accionadas en base a mapas de propiedades del suelo y/o cultivo (Chávez *et al.*, 2010a). Este enfoque empezó

a modificarse desde la década de 1990, apoyando la idea del riego de tasa variable utilizando los PLC³¹, que es una tecnología de buen desempeño para el control in situ, que en su momento fue muy costosa. Hoy en día se ha solucionado por el monitoreo a distancia, en tiempo real y aspectos de control, apoyados con redes de sensores inalámbricos e internet.

Para Holan *et al.* (2008), la falta de conocimientos básicos sobre la respuesta espacial del cultivo y el suelo, dificulta la gestión del riego y el análisis económico para el sitio específico de la agricultura, por lo que es necesario el uso de modelos matemáticos que permitan establecer la aplicación de tasa variable de agua y fertilizantes.

Por otro lado, Sadler *et al.* (2005a) y Evans *et al.* (2000) indican que desde 1990 en Estados Unidos de América existen grupos de técnicos que han modificado los sistemas de riego para obtener precisión, principalmente de movimiento continuo: lineal (LM³²) y pivote central (CP³³) que controlan la aplicación variable de caudal en las válvulas solenoides (Evans *et al.*, 2000).

Vilela (2005) y Hedley *et al.* (2010b) consideran al CP como el equipo de riego por aspersión más automatizado que existe en el mercado, que puede ir desde un simple accesorio en el sistema de abastecimiento a sistemas que les permitan manejar la distancia a través de ondas de radio o teléfono celular, considerando que la automatización no sólo está destinado a ahorrar tiempo y mano de obra, sino aplicar agua en función de la información de sensores en el suelo, atmósfera y cultivo que definan el riego y un horario programado. Mientras que, Evans (2010) manifiesta que el CP y LM tienen el potencial de regar y de ser un excelente vehículo para aplicar algunos productos químicos que coincidan exactamente con los requeridos por las plantas. Este autor, menciona que en zonas del centro - sur de Washington existen suelos muy ligeros, por lo que el CP juega un papel primordial debido a que el 80% del fertilizante nitrogenado se aplica a través de este sistema, con la finalidad de la detección temprana de las tensiones debidas al agua, nutrientes, enfermedades e insectos, así como la

³¹ Programmable Logic Controllers, con su acrónimo en español CLP (Controladores Lógicos Programables)

³² Linear Move o su acrónimo en español ML (Movimiento lineal)

³³ Center Pivot o su acrónimo en español PC (Pivote Central)

identificación de especies de arvenses. Los CP disponen de una plataforma adecuada para montar varios tipos de sensores que podrían recorrer cualquier parte del campo como dispositivos de video a color, infrarrojo y medidores de longitud de onda reflejada, junto con el software de reconocimiento de patrones y GPS.

Chávez *et al.* (2010a) trabaja la caja de control - bajo la tecnología SBC³⁴ conectado a una red de sensores vía frecuencia de radio, un GPS, y bajo una Ethernet-, que permite crear una conexión inalámbrica con un servidor remoto en el que corre un software para controlar el encendido/apagado de cada boquilla o grupo de boquillas definido en el “mapa de aplicación”, todo esto operado en forma remota. El SBC interactúa con una red de sensores, registra las mediciones en el sistema de riego, y en campo monitorea el rendimiento, las propiedades del suelo y de los cultivos, finalmente, rellena automáticamente una base de datos remota en el servidor en tiempo real que proporciona información al software para monitorear y controlar el sistema de riego a través de internet.

En los últimos ocho años, Bordovsky y Lascano (2003), Perry *et al.* (2002) y Perry *et al.* (2004) identificaron tres aspectos con respecto a los variantes de riego en los sistemas autopropulsadas, a saber: **a)** se requiere de algún tipo de comunicación inalámbrica entre los controladores de riego y un centro de control y monitoreo con el fin de optimizar el funcionamiento del sistema de riego (Stone *et al.*, 2006 y Coates *et al.*, 2006). **b)** Se debe monitorear la aplicación de la lámina del agua y la demanda territorial de humedad del suelo en áreas específicas dentro del campo, bajo un enfoque integrado de control de riego y sistema de monitoreo (Evans *et al.*, 2000). **c)** Es necesario incluir la mejora de los sistemas de toma de decisiones, seguimiento y retroalimentación para el control de riego en tiempo real (Sadler *et al.*, 2006b).

Lindsay (2007) afirma que el VRI³⁵ ofrece una flexibilidad total, en función de las necesidades específicas del cultivo, permitiendo así la aplicación de agua a lo largo de cualquier parte de la longitud del brazo irrigador y en cualquier momento, lo que se

³⁴ Single Board Computer, con su acronimo en español UOB (Unico Ordenador a Bordo)

³⁵ Variable Rate Irrigation, con su acronimo en español RTV (Riego de Tasa Variable)

consigue de manera individual, accionando el encendido y apagado de los rociadores. El VRI también controla la velocidad del sistema para modificar la profundidad de aplicación de riego. Cabe señalar que es compatible con el pivote central, avance frontal de movimiento lateral y reverso. Se puede instalar en nuevos sistemas de riego o como un complemento de los sistemas actuales.

2.3.3.1. Software de control y comunicación

En la actualidad existen varios software desarrollados para el riego a precisión, como el software **PivoRF** que fue desarrollado por el Departamento de Ingeniería de Biosistemas de la Escuela Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" de la Universidad de São Paulo, Brasil (LEB-ESALQ-USP), éste se caracteriza por la disposición de varias pantallas que permiten ingresar las especificaciones del puerto serial de conexión, datos sobre el terreno, del pivote y el tensiómetro transductor. Los datos límites que utiliza son la humedad a CC, humedad a PMP, mínimo de lámina aplicada por el pivote, altura de lámina por sector, número de sectores de riego, pendiente de la ecuación de calibración de los transductores, coeficiente lineal de la misma ecuación y la longitud de los tensiómetros en cm. Este software es capaz de identificar la posición del pivote y transmitirla, utilizando un transmisor de radiofrecuencia (315 MHz) y un codificador ("encoder" MC 145 026), controlado por el puerto paralelo del ordenador, montado como un sistema de control de ocho dispositivos vía RF (RR3 E RT4) (Mesías, 2005). El circuito de recepción de las señales de tensiómetros es simplemente un receptor de RF a 433,9 MHz (De Queiroz *et al.*, 2008).

Por su parte, Chávez *et al.* (2010a) desarrollaron el software **WSU-CPAS RIMCS** que controla un LM, el cual se basa en la simple modificación en la configuración de tiempo de aplicación en un área "homogénea", en función a un archivo de mapas. La información de un mapa se transfiere de forma inalámbrica a la CBS desde un ordenador-servidor remoto a través de la radio, la información del mapa puede actualizarse en cualquier momento durante el riego. Este software opera bajo el sistema operativo Linux, por otro lado, fue diseñado para aceptar información

actualizada de archivos usando un ordenador portátil conectado vía Ethernet situado, en el módulo de control del sistema. Para activar este software es necesario hacer una configuración del puerto serial de comunicación con parámetros definidos del sistema de control, sistema de riego, y del área de campo. WSU-CPAS RIMCS está escrito en lenguaje de programación C y gestiona el controlador de tarjeta de relé basado en mapas comparados con los datos de ubicación de la unidad GPS, maneja datos de presión, caudal, y humedad del suelo. Este software permite el uso de memoria flash, para almacenar y transmitir los datos a una base de datos MySQL en el servidor remoto. Es importante señalar que se puede acomodar a un máximo de ocho controladores de relé, con 256 válvulas de solenoide que pueden ser controlados individualmente.

Otro software para la PC³⁶ fue desarrollado por Lindsay International Ltd. (2007), el cual denominaron **AccuFlow VRI**. Éste usa el programa **FieldMAP** y permite planear el riego de acuerdo al previo mapeo. La información se carga en el controlador, a través de una memoria USB o de forma inalámbrica usando otros medios, o el usuario puede hacer una programación remota utilizando una conexión inalámbrica o GSM³⁷, donde puede cargar y seleccionar los planes de riego, supervisar las acciones del sistema en tiempo real en cualquier lugar. Por otro lado, la página web empresarial de Zimmatic VRI permite el registro del usuario para ubicar el mapa del área de interés, además de almacenar registros de riego históricos, actuales posiciones, distancias a puntos de cambio de hidrantes, sistema de presión, caudales calculados, planes de riego en ejecución desarrollados, operados y evaluados por la empresa proveedora.

Mientras que técnicos de la empresa Valley y asociados desarrollaron los programas **CropMetrics ® VRI Optimization** y **CropMetrics Virtual Agronomist Pro (VA Pro)**, que juntos permiten la identificación del número óptimo y la ubicación de las zonas o secciones de control de velocidad para generar la aplicación de agua precisa. VA Pro presenta una tecnología totalmente automatizada del VRI, en respuesta a la

³⁶ Personal Computer o su acrónimo en español Laptop o Computadora Personal

³⁷ Global System for Mobile Communications su acronimo en español Sistema Global de Comunicaciones Moviles

combinación de las características del suelo, cultivo, labores agrícolas, clima que permite precisar una óptima solución de VRI. Por otro lado, el CropMetrics VRI Optimización inicia con datos del escaneo y procesamiento de la CE, modelo de elevación del suelo y colección de datos del cultivo, después de esto hace un completo y complejo procesamiento de datos por capas, finalizando con un avanzado diseño de control de la zona y su recomendación de riego, permitiendo así el establecimiento del régimen de velocidades compatible a paneles de control de la marca Valley –Valley Pro2 y Select2 Control Panel– (Valley, 2008).

Al-Karadsheh *et al.* (2002) desarrollaron un control, mediante el uso de los dispositivos de salida eléctricos (electroválvulas y codificador de posición) y un PLC³⁸ desarrollado en el FAL³⁹ y montado en la unidad de riego móvil a 3 m del punto de pivoteo. La integración del PLC incluye la PC con el software para leer un archivo de datos guardado, permite cambios en la información del sistema, y convierte el mapa a un sistema de control de activación/desactivación de las solenoides. Cuando las coordenadas polares del mapa se interceptan con la posición del GPS en un límite de zona, el programa comprueba el mapa de aplicación previsto y las solenoides, de esta manera actualiza su control basado en la posición.

Robert G. Evans y su equipo desarrollaron un software para un PLC, que permite la programación, activación, seguimiento en campo, comunicación inalámbrica a un ordenador base, y cambio entre dos sistemas de riego en un solo equipo. La parte de captura de la señal del GPS fue desarrollada por Harting (1999) y Evans y Harting (1999), la misma que requiere de una PC para el ingreso de datos, aunque algunas de sus funciones se puedan establecer en su propio display de control del PLC. La aplicación del VRI se basa en coordenadas GPS, que determinan la alternancia del uso del sistema de riego MESA⁴⁰ o LEPA⁴¹ en diferentes parcelas y al mismo tiempo, bajo el área de riego del ML. El software de la PLC se fundamenta en la

³⁸ Programmable Logic Control o su acrónimo en español CLP (Controlador Lógico Programable)

³⁹ Federal Agriculture Research Centre su acrónimo en español Centro Federal de investigación Agrícola en Alemania

⁴⁰ Mid-Elevation Spray Application, su acrónimo en español APEM (Aspersor de Aplicación de Elevación Media)

⁴¹ Low-Energy Precision Application, su acrónimo en español APCBE (Aplicación Precisa de Consumo Bajo de Energía)

comparación de la lectura del GPS con una lista de valores límite introducidos y transformados al sistema binario. La elección de encendido y apagado de un sistema u otro (MESA o LEPA) está en función del tipo de cultivo a regar. Y la opción de manipular el temporizador y ajustar el tiempo de duración del ciclo de riego individualizado de cada válvula es a 60 s (Evans *et al.*, 2010).

Profesionales del Farmscan Group (Perth, Western Australia) y la University of Georgia formaron el equipo de agricultura de precisión de la NESPAL⁴² en Tifton, Georgia, quienes desarrollaron el software **Farmscan Irrigation Manager**TM para aplicación de VRI en un CP, basado en la división radial del círculo en secciones de 2 a 10° y hasta 48 tramos a lo largo del brazo, permitiendo definir un mapa de aplicación diferenciado a base de la digitalización, aplicando diferentes porcentajes de láminas de 0 a 200% de la aplicación media propuesta de un riego necesario (Perry y Pocknee, 2003).

2.3.3.2. Hardware de operación y control

En los últimos años, se han implementado hardware para el riego a precisión, es así que Lindsay International Ltd. (2007) construyó el hardware de un sistema de VRI basado en una configuración modular que consta de: **a)** un controlador colocado junto al panel principal del pivote, el cual requiere de 12 voltios para operar y cambiar la velocidad de la máquina a la vez que envía una señal inalámbrica para encender y apagar cada nodo de manera individual, **b)** nodos inalámbricos que son responsables del control individual de cuatro rociadores, a su vez, las electroválvulas de encendido/apagado son activadas por el software de VRI, **c)** las válvulas solenoides en cada aspersor están controladas individualmente para la retención conectada a una de las cuatro salidas en cada nodo, la bobina de la válvula es de 24 V y requiere un pulso en una polaridad para abrir, y otro en la polaridad opuesta para cerrar, **d)** el cableado de alimentación, desde la torre de control hasta cada nodo, el mismo que controla cada válvula, **e)** la unidad GPS en el extremo del pivote (o junto al controlador en el movimiento lateral), envía una señal de vuelta a través del nodo

⁴² National Environmentally Sound Production Agriculture Laboratory

de red inalámbrica para indicar la posición. Por su parte, el controlador utiliza este dato para calcular la forma de ejecutar el sistema.

Con el fin de controlar la lámina de agua aplicada a lo largo del radio de un sistema Al-Karadsheh *et al.* (2002) instalaron las solenoides de forma individual, las que fueron conectadas a un interruptor en el panel principal de control que abre/cierra en cada posición, a partir de la segunda torre hacia el extremo del brazo del pivote. Por otro lado, cada válvula solenoide opera sobre los valores de la base de datos y la ubicación en el campo. La ubicación en el campo se determina usando un codificador de posición contando el número de gradas, lo que da una clara ventaja en la lectura de la ubicación exacta del pivote con respecto a un círculo de 360°, mientras que la tasa de aplicación se determina por el ciclo de trabajo de las válvulas solenoides que suministran agua a cada aspersor, éstas se pulsan conmutando las solenoides de encendido/apagado para diferentes porciones de un ciclo de trabajo de 10 min.

Chávez *et al.* (2010a), por su parte, considera la aplicación de agua variable con la apertura (intermitente) de válvulas solenoides individuales en un LM, para una parte de un ciclo de riego preseleccionado corresponde a una tasa de aplicación, para ello se usa un ciclo de 60 s, por lo anterior estos autores desarrollaron un hardware que mantiene cada válvula en el sistema “ON” para una fracción del ciclo de riego 60 s, según la definición de tiempo en el mapa, en el efecto práctico. El mapa del sistema de riego del LM es una matriz de columnas que corresponden a las trayectorias de las boquillas alineadas con los tramos de riego y las filas que coinciden la proyección de coordenadas UTM⁴³ (norte-este), dentro del campo de regadío. En el caso de la PC, el tiempo de apertura de las válvulas configura el mapa de comparación en un sistema de coordenadas polares. Finalmente, para el control se elabora un mapa en el servidor remoto y se envía al CBS, aunque podría ser producido en tiempo real mediante un sistema de soporte de decisiones.

Los componentes físicos del sistema de riego desarrollado por De Queiroz *et al.* (2008) empiezan dividiendo el área en sectores (rebanadas), esquema común

⁴³ Universal Transversal de Mercator

utilizado en el regadío preciso en CP (Javier *et al.*, 2004), para esto, cada sector tiene un conjunto de tensiómetros y la lámina de riego se calcula de forma individual y sobre la base de estas lecturas se aplica el riego, para ello el diseño del sistema es capaz de obtener la lectura de los tensiómetros con un interfaz inalámbrico, implementado por medio de módulos de radio frecuencia al controlador. Por otro lado, el software del sistema hace los cálculos y comunica al microcontrolador que ejecuta el riego en base a restricciones. Por ejemplo cuando la lámina que se necesita es menor a la que puede aplicar el equipo, automáticamente la cantidad de riego requerida se convierte en cero, lo que implica el apagado del sistema de abastecimiento de agua y el pivote se mueve a toda velocidad sin aplicar agua. Este sistema usa tres microcontroladores: **a)** para identificar la posición del pivote y enviarlo a la computadora, **b)** para recibir el valor de “percentímetro” y el control de la velocidad de la última torre del pivote, y **c)** para hacer el seguimiento del tensiómetro y enviar las lecturas al ordenador, a través del radio frecuencia, cabe indicar que los circuitos permanecen apagados hasta recibir el impulso de un circuito auxiliar que recibe la señal del control remoto de origen en el equipo y activa sólo el segmento de interés, de acuerdo con la posición del pivote.

Para una aplicación efectiva del VRI en CP, la empresa Valley Irrigation ha trabajado en dos aspectos de manera principal: **a)** el cambio de la velocidad operado en el panel de control y definido por secciones (rebanadas) de mínimo 2° haciendo un total de 180° en todo su recorrido y **b)** en el agrupamiento de válvulas solenoides a lo largo del brazo del equipo para la apertura y cierre simultanea, llegando hasta 30 nodos en sus equipos más largos (aprox. de 1 km), permitiendo así, establecer más de 5 000 zonas diferentes de aplicación de riego con tasa variable en el área que irriga un pivote y que pueden ser controladas individualmente (Valley, 2008).

Los componentes de hardware desarrollados por Evans *et al.* (2010) se basan en el uso de un PLC modelo S7-226 (Siemens AG, Germany), como central de procesamiento y control de VRI, que actúa como controlador de las electroválvulas de solenoide, que están agrupadas en 30 bancos de 5 a 10 cada uno, el accionamiento se lleva a cabo mediante el control de encendido/apagado de las boquillas de

aspersión. El panel de interfaz del operador (UniOp BKDR-16-0045.Sitek SpA, Verona, Italia) proporciona un medio para controlar y monitorear el PLC sin necesidad de un ordenador portátil, además la pantalla LCD del panel muestra el estado de cada banco de rociadores, la posición GPS y los parámetros asociados al cultivo que permiten definir los ajustes de la tasa de aplicación con el temporizador incorporado, en este caso el PLC actualiza la posición GPS (WAAS-enabled Garmin 17HVS) en el LM, cada segundo permite la comparación “instantánea” con las coordenadas pre establecidas.

Perry y Pocknee (2003) consideran el inicio de los componentes principales del sistema **NESPAL VRI**, que es la especificación de tasas de aplicación variable de riego con software Farmscan Irrigation ManagerTM, el cual transfiere la información a la tarjeta de datos Canlink 3000 con el uso de una PC de escritorio. Este controlador compara la información del mapa de aplicación variada con el ángulo que forma la posición del GPS, con su ubicación inicial del pivote. Además, optimiza la velocidad del pivote y/o define los ciclos de apertura y cierre de los rociadores, estableciendo así el VRI en los quince bancos o grupos de rociadores que van de 2 a 4, conocidos como nodos y ocupan un tramo de unos 50 pies o 15.24 m por longitud de nodo.

2.3.4. Evaluación del riego a precisión

De Queiroz *et al.* (2008) indican que no se cuenta con variables ni parámetros estandarizados que permitan evaluar la calidad de un sistema de riego con VRI. Sin embargo, se trabaja en formas de comunicación remota de la aplicación real del riego preciso y se compara con la programación sectorizada que se realiza previamente. El software que fue desarrollado por él tiene el potencial de guardar los datos de la operación de riego de cada sector, el momento y valor leído de los tensiómetros, calcular el potencial mátrico de cada tensiómetro, la humedad en base al volumen, y el espesor de lámina que se debe aplicar. La información puede ser exportada y comparada con un software de uso común (por ejemplo: Excel), a través de un equipo de computo remoto en “tiempo real”, se debe considerar que hay una diferencia de pocos segundos

entre el envío de datos y el registro, a pesar de operar con radio frecuencia, que es una herramienta para la adquisición de datos.

Por su parte, Valley Irrigation permite una gestión del riego centralizado en la PC, diseñado a medida para el control y vigilancia de los pivotes, bombas, válvulas y otros dispositivos sin tener que ir al campo. También incluye la vigilancia de la humedad del suelo con sensores que transmiten información por radio frecuencia y pueden ser incorporados a la programación del VRI. Lo más novedoso de Valley Tracker Mobile es un software que da la oportunidad a los regantes de acceder, mediante el uso de teléfono inteligente y operar de manera remota sus pivotes lineales y auxiliares, evaluando de esta manera su operación en forma práctica (Valley, 2008).

Chávez *et al.* (2010b) manifiestan que los sistemas de riego a precisión están diseñados para controlar bancos de boquillas que aplican “láminas uniformes” dentro de una zona específica de riego o área experimental, por lo que su evaluación ha sido determinada mediante pruebas estándares de uniformidad, utilizando pluviómetros de captura de agua por grupo de boquillas de aplicación del VRI, tomando como referencia que las modificaciones a los sistemas de riego en general, no deben afectar la “uniformidad” de aplicación de agua. Considerando este criterio Perry *et al.* (2004), mediante colectores, indicaron que la tasa de riego en ciclos no afecta la uniformidad, obteniendo un CUC_C ⁴⁴ de 89% para CP y de 50% a 92% para LM. Otro estudio de Perry *et al.* (2002) informaron de un CU_C de 89% y un CU_{HH} ⁴⁵ de 89% para una velocidad de operación del CP de 100% y 50%. Mientras tanto, Camp *et al.* (1998) evaluó un sistema de PC con VRI donde encontró que el CU_C varió de 91,8% a 92,2%, con datos de 50 pluviómetros, separadas a 3 m a lo largo del radio del sistema.

King y Wall (2001) obtuvieron CU_C para un sistema de riego de sitio específico entre 92% y 97% para velocidades de aplicación relativas de 33% y 100% respectivamente, en general la uniformidad de aplicación en equipos con VRI tiene una variación menor del 10%. Por otro lado, Al-Kufaishi *et al.* (2005) encontraron que aplicaciones con boquillas de pulverización y láminas diferenciadas mínimas de 47% a 50%, con una

⁴⁴ Coeficiente de Uniformidad de Christiansen

⁴⁵ Coeficiente de Uniformidad de Heermann y Hein

presión nominal de 147 kPa obtuvieron un CU_C de 90% a 95% superiores a los resultados reportados para un CP de riego uniforme (CU_C de 78% a 89%).

Chávez *et al.* (2010b) reportó CU_C de 96.5%, en su evaluación hecha en un mini LM en Oregón, EE.UU. (2 brazos de 36 m cada uno), operado con un sistema de control de riego de precisión situado en la torre central a través de un único ordenador a bordo. En la comparación entre el mapa programado en el SBC y el obtenido de la colección de agua de pluviómetros (ubicados entre 2 y 5 líneas espaciadas, 2 a 3 m entre sí y de 2 a 3 m entre colectores), encontraron una desviación de posicionamiento media de $2.5 \text{ m} \pm 1 \text{ m}$ atribuibles al error del GPS, además hallaron que cuando el viento duplica su velocidad de 0.9 a 1.8 m/s, el CU_C disminuye a 88%.

Lindsay International Ltd. (2007) considera que la evaluación de un VRI programado en función a la topografía y tipo de cultivo, se puede hacer correlacionando la medición del rendimiento del cultivo en cada zona de riego diferente con el agua aplicada, además de la precisión en la liberación de obstáculos. Las áreas que no se deben regar se evalúan observando de forma directa la superficie libre de riego. Esto ha sido comprobado en Otane, Nueva Zelanda donde riegan cultivos de guisantes, maíz, trigo, cebada y papa, en estos estudios determinaron que con la utilización del VRI se ahorra un tercio del agua, que se utilizaría en un riego uniforme y se reduce hasta en 30% el costo de bombeo en un CP con 8 torres que cubre 92 ha. Otra forma de evaluar es el uso de cultivos sensibles al sobre o sub riego como la papa, y empleando indicadores de la eficiencia de riego a precisión.

Por su parte, Chávez *et al.* (2010b) proponen que la evaluación de un sistema de precisión es mediante el monitoreo y control instalado, que funcione, sea de total flexibilidad y capaz de integrar una serie de láminas de agua aplicadas, de acuerdo a la medición de sensores en tiempo real o mapas de características del suelo, cultivo y clima. Una forma de llevar a cabo esta evaluación es la comparación de los SIG programados y ejecutados y la muestra de un buen desempeño, operando las solenoides (On/Off) de acuerdo con los mapas incluidos. Sin embargo, se producen algunas desviaciones por el error de posicionamiento del DGPS, aunque se considera pequeño

(2.5 m \pm 1 m) cuando se compara con los tamaños de la parcela, además el programa de riego debe ser capaz de cambiar los patrones cerca de los lugares especificados con un error de 4.5 m, que es verificado mediante señales en la zonas fronterizas.

Stone *et al.* (2006) realizaron una evaluación de un CP modificado, para aplicar VRI dividieron el radio regado en 13 segmentos de 9.10 m cada uno (6 válvulas de solenoides a cada 1.5 m), y diseñado para aplicar aproximadamente 12.5 mm de agua cuando se opera a una velocidad de viaje 50%. Éstos reportaron que 7 de los 77 pluviómetros tienen un volumen colectado 10% superior al volumen programado, indicando que cuando los colectores se pusieran en zonas de riego combinadas se compensan entre sí, de esta manera se reduce la brecha entre la lámina de riego programada y la colectada. Por otro lado, encontraron que el mantenimiento y control frecuente del sistema son esenciales para el suministro de agua precisa.

Perry y Pocknee (2003) evaluaron el riego de los nodos (grupos de 2 a 4 válvulas solenoides) para ello colocaron pluviómetros o colectores de 3.58 pulgadas (9.09 cm) de diámetro ubicados en una fila paralela al paso del brazo del pivote, a una distancia de 5 pies (1.52 m) entre sí y a 18 pulgadas (45.72 cm) sobre la superficie, para evitar la interferencia por efecto de rebote del agua en el suelo, la velocidad de operación del CP fue al 11% con 22 pulgadas/min (0.56 m/min) en la última torre y una presión de operación 15 psi. Los bancos de válvulas fueron configurados en pequeños segmentos, proporcionando un control preciso del riego y del software y hardware asociado (mangueras, solenoides, nodos), también se incluyeron evaluaciones con aspersores **a)** de ciclo 100% abiertas, se encontró un CU_C de 89% y CU_{HH} de 87%, la ⁴⁶ de 9.43 mm una DS ⁴⁷ de 5.9 y un CV ⁴⁸ de 0.096. **b)** del ciclo 50% abiertas 50% cerradas, se encontró un CU_C de 89% y CU_{HH} de 88%, la de 3.82 mm una DS de 4.2 y un CV de 0.148, confirmando con esto que no existe variación de los CU_C , CU_{HH} , , DS , CV entre el riego de lámina uniforme y el VRI.

⁴⁶ Lamina media

⁴⁷ Desviación estándar

⁴⁸ Coeficiente de variación

2.4. Futuro del riego a precisión, oportunidades y limitantes

Smith *et al.* (2010), manifiestan que las herramientas y tecnologías que componen los sistemas de riego de precisión están disponibles, no obstante, se requiere de importantes investigaciones que estandaricen procesos, auto-controlen, permitan el monitoreo y aseguren la eficiencia en la aplicación del agua en el lugar, momento, cantidad y la forma más adecuada, de esta manera la planta lo pueda usar de forma eficiente. No obstante, se ha trabajado poco en la prueba, aprobación y adopción por la comunidad de regantes, ya que son los que definen si existe oportunidad para usar de forma masiva esta tecnología o todavía presenta limitantes para su implementación.

Lindsay International Ltd. (2007) y Lindsay (2007) resaltan las ventajas del RP al: **a)** ahorro de agua, **b)** disminución del gasto de energía, **c)** aplicación de láminas de agua de acuerdo al suelo, cultivo y su estado vegetativo, manejando un número infinito de zonas de riego, **d)** incremento y uniformización del rendimiento, **e)** libramiento de áreas que no se deben regar (por ejemplo caminos, cuerpos de agua, obstáculos, etc.), **f)** reducción de escorrentía, erosión y lixiviación. **g)** riego optimizado con la velocidad y tiempo de aplicación, **h)** software con mapas variables de cualquier parámetro medido o estimado de las condiciones del suelo o cultivo, **i)** funcionamiento en todos los modelos y marcas de CP y LM, **j)** ahorro en costo de fertirrigación y la aplicación de pesticidas, **k)** automatización y control remoto de equipos de riego, **l)** control y monitoreo vía internet.

Smith *et al.* (2010), por su parte, señalan algunas incertidumbres del RP, como el valor real de la relación costo/beneficio que justifique su adopción, desde un análisis de sistemas que incluya una gama de cultivos, suelos y la aplicación de insumos que determinen el máximo beneficio optimizando el uso de estos. Así como la posibilidad de una completa automatización que tome en cuenta el monitoreo de propiedades del suelo, cultivo, clima y defina el riego preciso en tiempo real. También propone que dicha incertidumbre se supera a través de mecanismos de ensayos y simulación que demuestren los beneficios sustanciales para motivar la adaptación y cambio de sistemas de riego tradicionales.

Detractores del riego de precisión sostienen que esta tecnología todavía no ha demostrado un incremento económico para los agricultores, debido a los altos costos de los equipos

informáticos, del software SIG, el precio del DGPS, sensores de humedad, temperatura foliar, intercepción infrarroja y captador de rendimiento, en su conjunto vuelven demasiado costoso para un agricultor individual e imposibilita su adopción (Traxco, 1991).

Para Evans (2001), el reto del RP es desarrollar un sistema de comando inteligente, que permita el monitoreo en tiempo real y control de equipos de movimiento continuo de riego, además de integrar redes de sensores inalámbricos que controlen la humedad del suelo, cultivo, clima y operen de manera individual las boquillas que aplican el agua y el fertilizante.

En la actualidad, se proponen varios diagramas de sistemas de RP, pero es el de McCarthy *et al.* (2010), el que incluye la mayoría de procedimientos y monitoreo de variables de suelo, cultivo, clima, hasta la aplicación precisa del riego e insumos, tal como se muestra en la Figura 10.

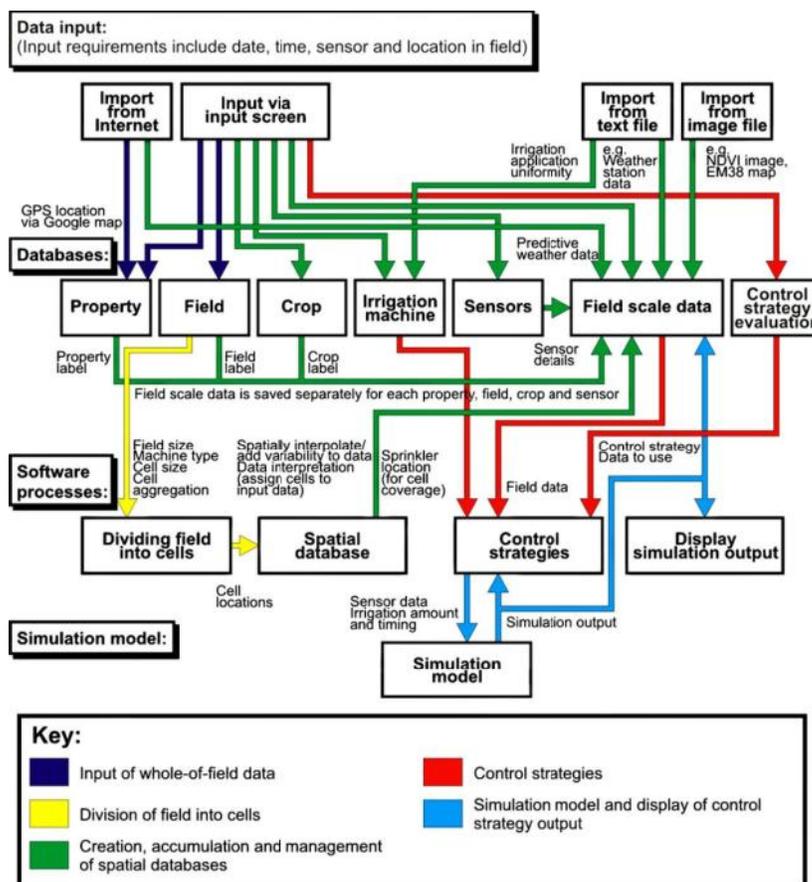


Figura 10. Diagrama del flujo de RP del software VARIwise, desarrollado por (McCarthy *et al.*, 2010).

El desarrollo del diagrama se tendría un sistema completo de riego a precisión capaz de retroalimentarse, afinar sus procedimientos de aplicación de agua, por monitoreo de variables o simulación del comportamiento de las mismas. En la actualidad, falta lograr la integración de algunos componentes, a pesar de esto cuenta con la patente US005927603A del 27 de julio de 1999 (Closed Loop Control System, Sensing Apparatus and Fluid Application System for a Precision Irrigation Device), que tiene como inventor a Gerald J. McNabb y está asignado a J. R. Simplot Company que protege los derechos de invención de un sistema de irrigación automático. Dicha tecnología está incluida en un equipo de irrigación móvil que tiene una boquilla de suministro de fluido y un colector adaptado para recibir agua de riego desde una fuente de suministro. El sistema incluye 1) detector del nivel de humedad con transmisor de información, 2) dispositivo de almacenamiento electrónico que tiene una unidad de direccionamiento y reproducción de una pluralidad de señales de mando almacenados, 3) primer circuito electrónico acoplado al dispositivo de almacenamiento para señales de control de mando, 4) segundo circuito electrónico que compara el nivel de humedad detectado que coincida con el nivel de humedad indicado en el sistema de control, los dos circuitos electrónicos producen señales para controlar la boquilla de fluido en respuesta a la señal de realimentación procedente del detector, impartiendo una aplicación deseada del fluido de irrigación en el campo agrícola, y 5) aspersor con sensor de flujo de fluido para detectar el caudal descargado por la boquilla (McNabb, 1999).

Dentro de la factibilidad técnica del RP es necesario establecer dos niveles conceptuales y prácticos: **a)** en el plano conceptual, la simulación puede establecer las escalas espaciales óptimas para la gama de cultivos y sistemas de aplicación, teniendo en cuenta sus limitaciones espaciales. Las restricciones impuestas por las necesidades de detección, y la capacidad de las herramientas de simulación para predecir con exactitud los efectos sobre el crecimiento y rendimiento del cultivo. Se debe determinar si las herramientas de diagnóstico necesarios para definir las causas de la reacción de los cultivos particulares están disponibles y suficientemente probados. **b)** en el plano práctico, los sistemas de RP deben ser probados y demostrados en ensayos de campo en toda su amplitud de aplicación (Smith *et al.*, 2010).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación

El proyecto de investigación se realizó en pivote central del Colegio de Postgraduados, ubicado en el Campo Experimental del Campus Montecillo, localizado en el km. 36.5 de la carretera federal México-Texcoco, Estado de México, de manera exacta el centro del pivote se encuentra a $19^{\circ} 27' 51.5''$ de latitud norte, $98^{\circ} 54' 54.4''$ de longitud oeste y 2245 msnm, como se muestra en la figura 11.

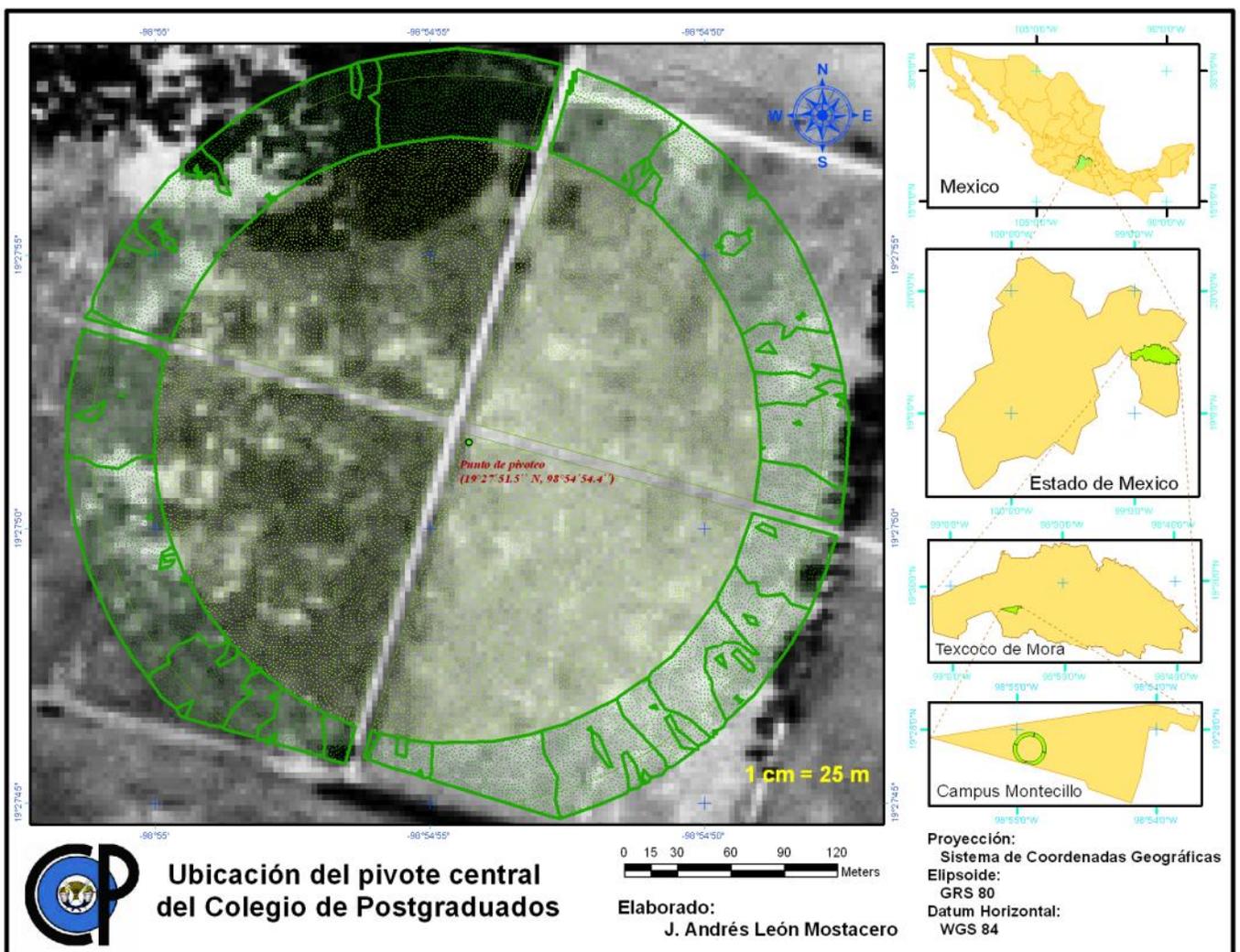


Figura 11. Mapa de Ubicación del área de pivote central en el campo experimental del Colegio de Posgraduados, Campus Montecillos

Las evaluaciones abarcaron el área de los lotes 17 a 20 del bloque E y F del campus, que es donde opera el pivote central, tal y como se muestra en la Figura 12.

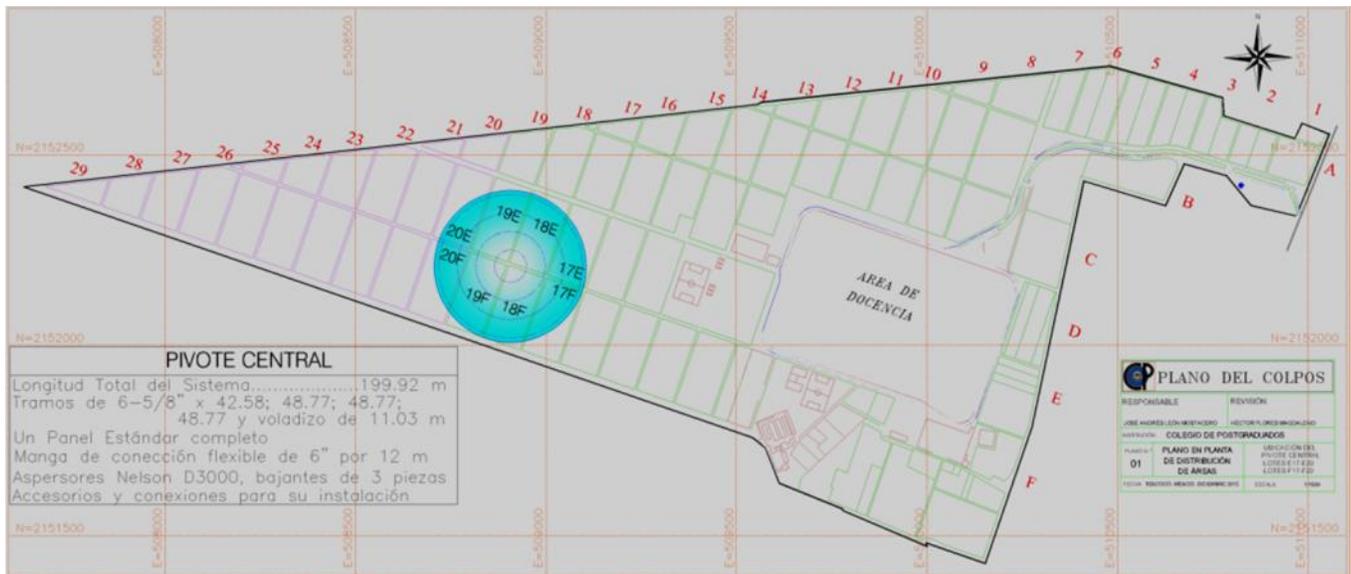


Figura 12. Plano de la ubicación del experimento en el Colegio de Posgraduados, Campus Montecillos, (Ascencio H., 2009).

El croquis de la figura 12 muestra los lotes en que opera el equipo de riego (pivote central) y donde se realizaron las diferentes evaluaciones del suelo como de aplicación del riego, su acceso es por una desviación del circuito interno del campus a dirección oeste por una vía de asfalto y una entrada de terracería de 1 km aproximadamente.

3.2. Materiales

Primero se describe el equipo de riego: pivote central, de la marca Valley que fue instalado en el año 2007 como parte de un plan de implementación laboratorio de riego del Colegio de Postgraduados (Ascencio H., 2009), el mismo que consiste en una estructura de tubos y ángulos de acero galvanizado acoplado a componentes de rodamiento, alineación, energía eléctrica, abastecimiento de agua, freno y operación, entre otros, a continuación se muestra el diseño y las imágenes del pivote, figura 13.

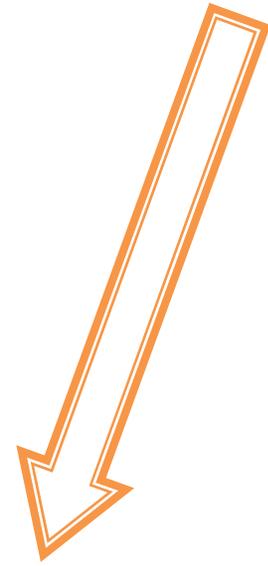
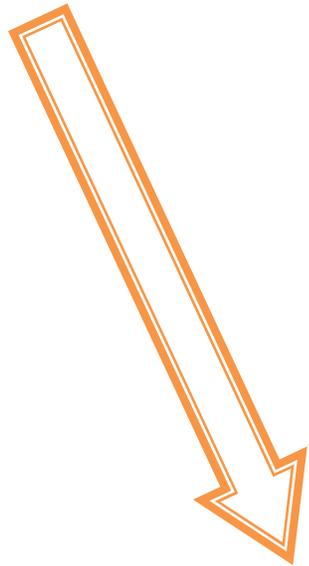


Figura 13. Equipo de riego, pivote central del Colegio de Posgraduados.

La Figura 13, muestra un esquema del equipo así como la imagen panorámica e imagen en perspectiva, además se tiene imágenes del inicio y parte final del brazo del pivote del Colegio de Postgraduados, seguido la tabla 2 muestra los componentes principales y especificaciones técnicas.

Tabla 2. Especificaciones técnicas del sistema pivote central de riego por aspersión

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Número de torres	4 (1° torre = 42.58 m; 2° torre = 48.77 m; 3° torre = 48.77 m; 4° torre = 48.77 voladizo = 11.03 m)
Longitud total del sistema	199.92 m de brazo
Altura máxima	4.96 m (de la superficie del suelo a la altura de la salida del bajante del aspersor)
Diámetro de tubería del sistema	6 '' de Ø interno, 6 5/8'' de Ø exterior; tubo de pivoteo de 8'' de Ø interno y 8 7/8'' Ø externo en tubería de acero galvanizado.
Manguera de abastecimiento	Manga flexible de 6'' de diámetro y 12 m de longitud
Numero de aspersores	72 bajantes con 1 ó 2 aspersores D3000 Nelson, regulador de presión, contrapeso, manguera flexible y garza cada uno
Energía requerida	Mínimo 350, máximo 505 Voltios (promedio 440 v.)

Elaboración propia

Los componentes mencionados del equipo de pivote central, se encuentran debidamente ensamblados y operativos para el riego de una superficie total de 12,57 ha y con la capacidad de aplicar láminas de agua desde 10.06 mm a una velocidad de 100% (135 m/s en la ultima torre), gasto de 52 l/s y presión de operación de 17 psi (Ascencio H., 2009).

Para el caso del sistema de riego a precisión se ocuparon materiales eléctricos, electrónicos, mecánicos y equipos como una laptop, GPS, todos estos se enumeran y describen en la tabla

3, y la mayoría de ellos se visualizan en la figura 14. Los materiales fueron adquiridos en el mercado local o confeccionados a partir de otros.

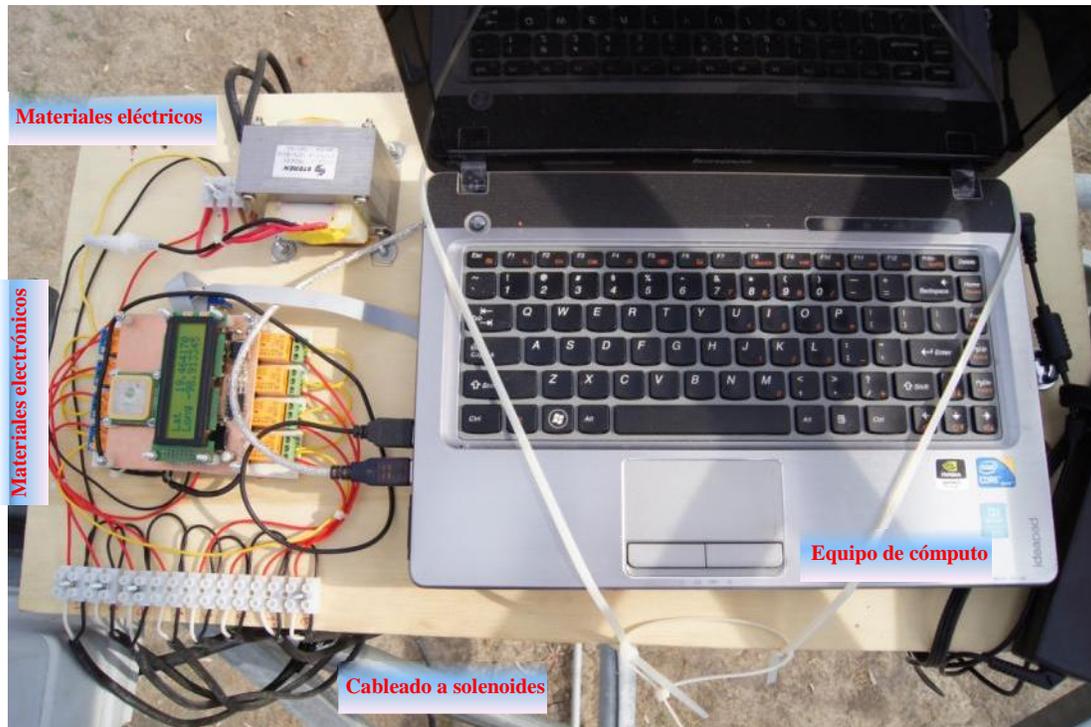


Figura 14. Materiales y equipos del sistema de riego a precisión

En el caso materiales mecánicos, se considera electroválvulas, cables para su conexión, niples, base de ubicación del sistema, protección, ventilador y demás accesorios, en el caso de los materiales eléctricos se trata de los típicos para pequeñas conexiones así como productos aislantes y de transformación a menor voltaje, dentro de los productos electrónicos se consideran los necesarios para la construcción de dos tablillas que son las que reciben la información y ejecutan las ordenes de control, como equipos se puede mencionar al equipo de computo básico con mínimo un puerto USB, memoria de 256 Mhz, 560 MB de Ram, con sistema operativo Windows y opcionalmente con capacidad para manejar Google Earth. Finalmente se requirió de materiales para la evaluación y medición de la aplicación del riego a precisión y herramientas básicas para todo el montaje y ensamble del sistema. Seguido se detalla los materiales para la construcción de un sistema capaz de controlar 8 válvulas consecutivas del final del brazo del pivote central.

Tabla 3. Especificaciones técnicas, cantidad y precio de los materiales usados para el sistema de riego a precisión (control de 8 válvulas)

Descripción del producto	Unidad	Cantidad	Precio unit. (pesos)	Precio total (pesos)
Materiales electromecánicos				
Electroválvulas de 3/4" de salida	Unid.	8	450.00	3,600.00
Cable de uso rudo n° 18	M	100	7.00	700.00
Niples de PVC de 3/4"	Unid.	8	20.00	160.00
Tabla o base de material aislante de 0.8*0.5 m	Unid.	1	50.00	50.00
Caja de protección de policarbonato u otro material aislante y semitransparente	Unid.	1	500.00	500.00
Ventilador 4" 117 V C.A. Metálico	Unid.	1	224.14	224.14
Múltiple de para 3 conectores	Unid.	1	40.00	40.00
Tornillos de 2*3/8	Unid.	4	8.00	32.00
Pintura y otros para acabado de base	Lote	1	200.00	200.00
Materiales electrónicos				
Relevador compacto 1P/2T bobina de 1	Unid.	8	14.66	117.28
Circuito integrado lineal	Unid.	8	16.38	131.04
Relevador compacto 1P/2T 10 AMP	Unid.	8	14.66	117.28
Terminal C/2 tornillos P/C impreso en G	Unid.	8	5.17	41.36
Micro switch push 2 terminal 50 MA	Unid.	8	3.45	27.60
Conector tipo DB-9 hembra para ángulo	Unid.	2	10.34	20.68
Transformador 24 Volts 5 AMP C/TAP y 25	Unid.	1	284.28	284.28
Porta fusible de cartucho tipo Europeo	Unid.	1	6.03	6.03
Fusible tipo europeo de 2.5 AMP y 25 PVP	Unid.	3	3.45	10.35
Punta destornillador P/Cautín W60P 1	Unid.	1	19.31	19.31
Malla desoldadora 2 MM*1.50 m	Unid.	1	16.38	16.38
Kit de termofit 5 colores 1/8" 3.2 m	Unid.	1	20.69	20.69
Kit de termofit 5 colores 3/16" 4.8 m	Unid.	1	25.00	25.00
Banco de terminales 2 filas 8 tornillos	Unid.	1	12.07	12.07
Banco de terminales 2 filas 24 tornillos	Unid.	2	33.62	67.24
Capuchón de Rosca Metálica Color Azul	Unid.	20	3.45	69.00
Toma Corriente p/Chasis cara plana P0	Unid.	2	7.76	15.52
Toma Corriente p/Chasis cara plana	Unid.	1	11.21	11.21
Porta fusible automotriz C/Cable	Unid.	8	6.90	55.20
Fusible tipo americano de 0.5 APM	Unid.	8	3.45	27.60
Pasacable D/Nylon para cable redondo	Unid.	1	2.59	2.59
Pasacable de Hule 5.5 mm de diámetro	Unid.	1	1.72	1.72
Termofit negro 1/4 6.4 mm rollo 50 m	m	1	5.17	5.17
Termofit negro 3/8 9.5 mm rollo 25 m	m	1	6.90	6.90
Termofit negro 1/2 12.7 mm rollo 25 m	m	1	7.76	7.76

Continúa...

Continúa...

Tablilla 1 (GPS)				
GPS (66 Channel LS20031 GPS 5 Hz Receiver)	Unid.	1	1000.00	1000.00
Condensadores cerámicos multicapa con chip	Unid.	9	2.50	22.50
Capacitores electrolíticos de aluminio	Unid.	1	6.60	6.60
Diodo recuperador sencillo	Unid.	11	3.20	35.20
LED amarillo verde HI BRT USS 0603	Unid.	4	7.20	28.80
Conectores con pines macho para alimentación	Unid.	5	23.10	115.50
Conectores con pines macho	Unid.	4	38.10	152.40
Resistencias generales para chip	Unid.	30	0.60	18.00
Conector serial hembra	Unid.	1	78.75	78.75
Diodo de pequeña señal para montaje en transistor	Unid.	2	2.80	5.60
Microchip tipo flash	Unid.	1	42.00	42.00
Controlador de línea	Unid.	1	12.15	12.15
Controlador de línea doble	Unid.	2	16.20	32.40
Regulador de voltaje positivo	Unid.	1	13.00	13.00
Regulador de voltaje lineal	Unid.	1	20.70	20.70
Display LCD 16*2	Unid.	1	320.00	320.00
Placa fenólica de 10 x 15 cm, con una cara de cobre	Unid.	2	17.00	34.00
Tornillos de 2*1/16		8	2.00	16.00
Soldadura (limpiador, pasta, soldadura, removedor...)	Kit	1	300.00	300.00
Ácidos para fabricación de tablillas	Kit	1	200.00	200.00
Tablilla 2 (Relevadores)				
Condensadores cerámicos multicapa con chip	Unid.	3	2.50	7.50
Capacitores electrolíticos de aluminio 1u	Unid.	4	7.80	31.20
Capacitores de aluminio 50V	Unid.	1	7.65	7.65
Capacitores electrolíticos de aluminio 100u	Unid.	1	11.50	11.50
Focos de 3 mm de diámetro, color verde claro	Unid.	9	5.10	45.90
Terminal block 5.08 mm 3 POS PCB	Unid.	10	12.90	129.00
Relés para generador de SPDTA 5A 12 V	Unid.	8	20.40	163.20
Conector serial tipo hembra de 9 pines	Unid.	1	14.25	14.25
Filamentos de resistencia de carbono (1.0 =8 y 10=12)	Unid.	20	1.02	20.40
Swicht táctil de 0.02 A, 15 V	Unid.	8	4.35	34.80
Fotocopler oscuro externo	Unid.	8	10.65	85.20
Microchip con memoria flash	Unid.	1	60.00	60.00
Terminal de regulador de voltaje positivo	Unid.	2	10.35	20.70
Tornillos de 3*1/16	Unid.	24	3.00	72.00
Otros materiales *				
Mini laptop básica de 256 MB de memoria Ram, 1.66 GHZ...	Unid.	1	3000.00	3000.00
GPS (de uso convencional Garmin Etrex Vista)	Unid.	1	5000.00	5000.00
Herramientas para conexión y fijado de sistema	Kit	1	300.00	300.00
Materiales para evaluación (canaletas, cubetas, libretas)	Lote	1	500.00	500.00
TOTAL (Incluye IVA)				\$ 9,710.30

* Materiales no considerados en el costo de materiales.

Elaboración propia

3.3. Métodos

Para dar mayor claridad a la explicación del estudio realizado, la metodología se dividió en cuatro partes: **1. Propiedades físico-químicas del suelo**, **2. Interpolación y elaboración de mapas**, **3. Sistema de riego a precisión** y **4. Evaluación del sistema**, tal como se muestra en la Figura 15.

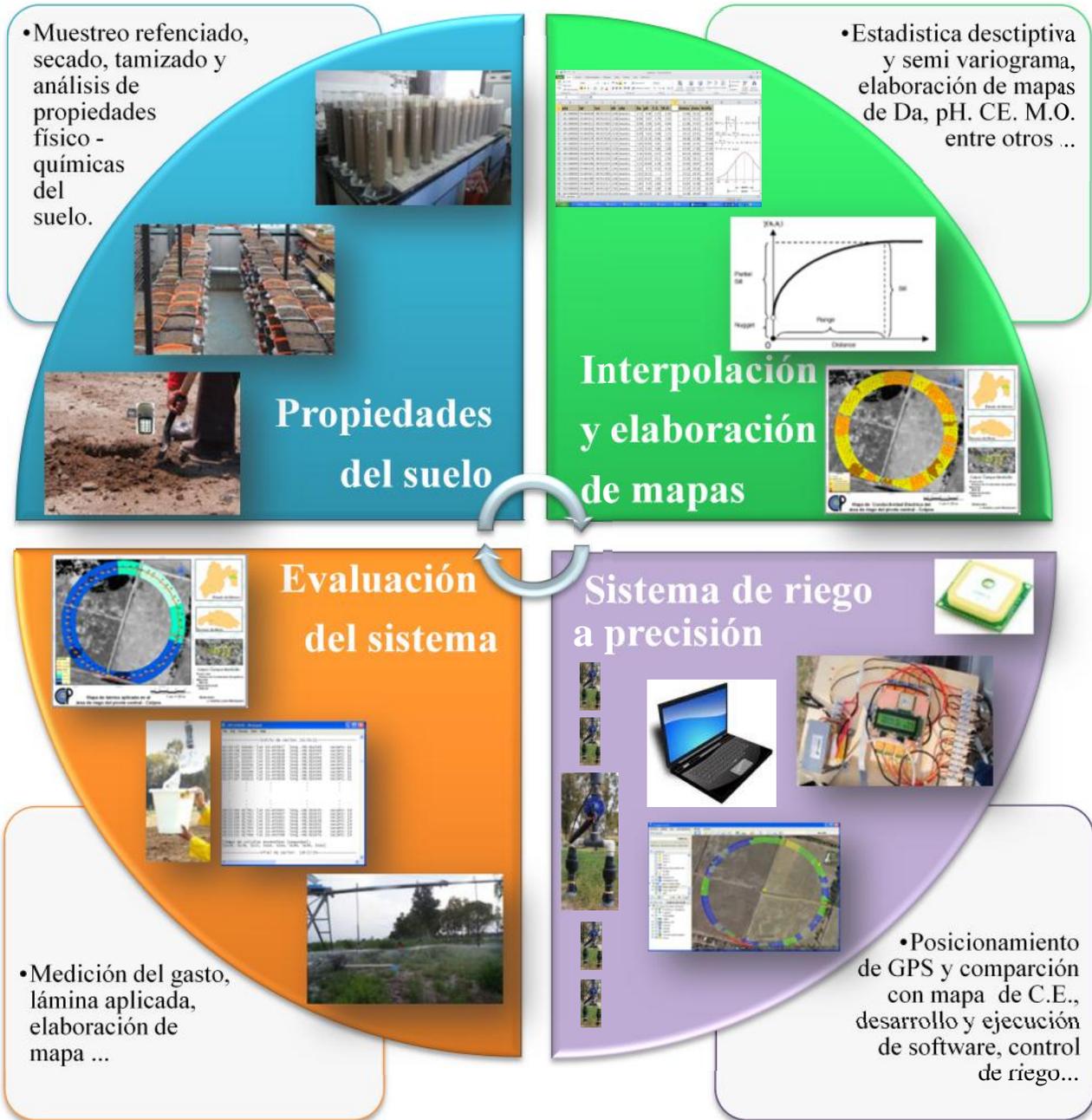


Figura 15. Diagrama de operación y evaluación del riego a precisión.

3.3.1. Propiedades físico-químicas del suelo:

Se inicio con la ubicación del área para lo que se propuso el muestreo de suelo y posterior análisis en laboratorio de algunas variables físicas y químicas como densidad aparente, pH, conductividad eléctrica, textura y materia orgánica, así como, la estimación de la capacidad de campo y punto de marchitez permanente a partir de la textura y materia orgánica.

3.3.1.1. Muestreo

Como un procedimiento que busca la representación heterogénea del suelo presenta sus diferencias de un muestreo tradicional para fertilidad, salinidad o clasificación de suelos que busca el valor promedio con una muestra compuesta y que surge como resultado de varias sub muestras, la Figura 16 resume el procedimiento de toma de muestras en una “cuadrícula” aproximada que busca la representación de la máxima variación de las propiedades físicas del suelo.

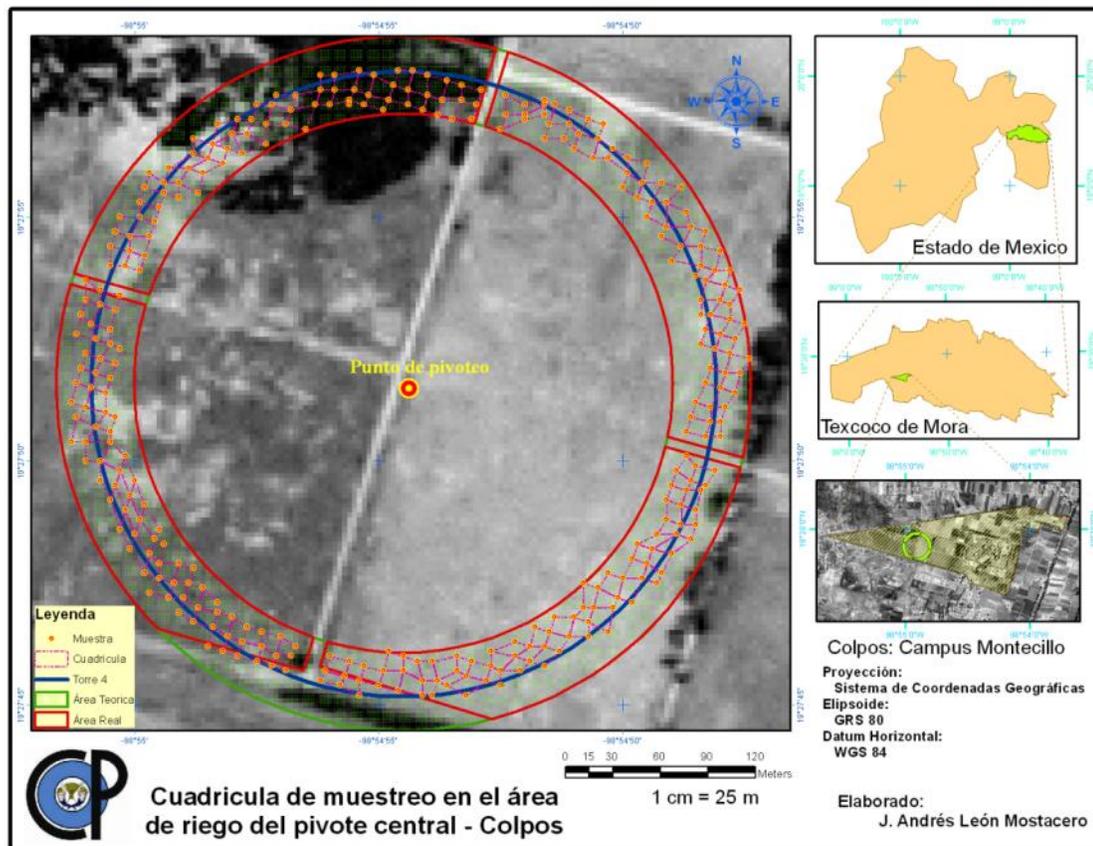


Figura 16. Metodología de muestreo de suelos con fines de riego a precisión.

Definiendo el área a muestrear basado en dos aspectos: a) la ubicación exacta del sistema de precisión desarrollado (para este caso la cuarta torre o final del brazo, que es la parte que recorre mayor perímetro y tolera el error del GPS) y b) los recursos económicos que sólo permitieron el desarrollo del sistema para controlar 8 válvulas. Seguido se tomamos como referencia la huella de la torre 4 del pivote y hasta una distancia aproximada de 25 m a cada lado, cubriendo el área que irrigan los últimos 8 aspersores del pivote central, esto es un anillo de diámetro entre los 160 y 210 m logrando con un área igual a 5.81 ha, de la que se extrajeron 323 muestras guiados por una cuadrícula de 10*10 m, se descontó el área de las calles, extrayendo así muestras de 600 gramos en promedio siguiendo la metodología que se describe en el Anexo 1 (SEMARNAT, 2002).

3.3.1.2. Preparación de la muestra.

Se trató de un proceso tan importante como el muestreo y análisis de las muestras, el mismo que empezó con el traslado, recepción, registro, secado, molienda, tamizado, homogenizado y almacenamiento para su análisis o conservación. Para evitar su contaminación y asegurar mayor precisión y exactitud en el resultado del análisis se realizó en un ambiente especial y limpio acondicionado para tal fin. Este proceso se detalla en el Anexo 2 (SEMARNAT, 2002).

3.3.1.3. Determinación de la Densidad Aparente (Da).

Es la relación de los parámetros: masa y volumen total del suelo, es decir el ocupado por los sólidos y el espacio poroso. Se realizó utilizando el método de la probeta, recomendado para estimar la densidad de una muestra de suelo disturbado en laboratorio. El cálculo se basa en la división del peso de 50 gr de suelo entre el volumen de este encontrado en una probeta debidamente “compactada”, como se detallada en el Anexo 3 (Blake, 1965). La fórmula utilizada se basa en la relación de la masa con el volumen como se muestra $Da = \frac{Pt}{vt} = \frac{50\text{ g}}{vt\text{ (ml)}}$ y su valor generalmente se expresa en g/cm^3 . Para la interpretación de las densidades consideramos hasta cuatro tipos de suelo conforme a la Tabla 4.

Tabla 4. Clasificación del suelo en función a la Da.

Tipos de suelo	Da (g/cm³)
Suelos orgánicos y volcánicos	<1.00
Arcillosos	1.00-1.19
Francosos	1.20-1.32
Arenosos	>1.32

Fuente: (SEMARNAT, 2002)

3.3.1.4. *Determinación del pH (pH).*

La determinación del pH basado en la actividad de ion H⁺, mediante el uso de un electrodo cuya membrana es sensitiva al H⁺, se mide potencio métricamente en la suspensión sobrenadante de una mezcla suelo: agua de relación 1:2 (peso del suelo (w):volumen del agua(v)), tal como se detalla en el Anexo 4. (SEMARNAT, 2002)

Para la interpretación de resultados se usó la clasificación propuesta por la Secretaria del Medio Ambiente en su Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2002 que establece las especificaciones para análisis de suelos conforme a la Tabla 5.

Tabla 5. Clasificación del suelo en función al valor de su pH

Clasificación	pH
Fuertemente acido	<5
Moderadamente acido	5.1-6.5
Neutro	6.6-7.3
Medianamente alcalino	7.4-8.5
Fuertemente alcalino	>8.5

Fuente: (SEMARNAT, 2002)

3.3.1.5. *Determinación del Conductividad Eléctrica (C.E.).*

Basada en el método de sales solubles en agua en una relación 1:2 (v:v) suelo: agua no es más que la determinación de la conductividad eléctrica de la disolución de las sales de un suelo por medición electrolítica utilizando una celda de conductividad como sensor. El método de la estimación de la C.E. en la mezcla 1:2 (v:v) suelo: agua, se recomienda como un método de laboratorio para suelos que se sospecha

van a dar valores muy altos y hasta fuera del rango de medición del conductímetro usado. (Gartley, 1995 and revied 2011). Dicho método se detalla en el Anexo 5.

El principio de medición es simple y se basa en 2 placas de conductividad o electrodos que se sumergen a la muestra, se aplica un potencial o voltaje a través de las placas y se mide la corriente que fluye entre las placas, determinándose así que la conductancia (C) se determina a partir de los valores de voltaje (V) y la corriente (I); $C = \frac{I}{V}$ y la C.E. se obtiene multiplicando la conductancia por la constante de la celda la misma que resulta de dividir la longitud de la columna de liquido de los electrodos (l en cm) entre el área de los electrodos (A en cm^2), siendo $C.E. = C * \frac{l}{A}$, y reportándose en decisiemens por metro (dS m^{-1}). (SEMARNAT, 2002).

Los valores obtenidos en el conductímetro tipo Sonda de Conductividad/TDS de 4 anillos de platino con sensor de temperatura (el mismo que permite ajustar la temperatura a 25 °C), por lo que no es necesario corregir las lecturas presentan los valores de manera directa los mismos que son comparados con la Tabla 6 propuesta por (Dellavalle, 1992) citado por (Gartley, 1995 and revied 2011).

Tabla 6. Clasificación de suelos en función a la conductividad eléctrica medidos en una solución suelo: agua, relación 1:2 (v:v)

Grados de salinidad	Conductividad eléctrica (mmhos cm^{-1})
No salino	<0.40
Muy ligeramente salino	0.40-0.80
Moderadamente salino	0.81-1.20
Salino	1.20-1.60
Fuertemente salino	1.60-3.20
Muy fuertemente salino	>3.20

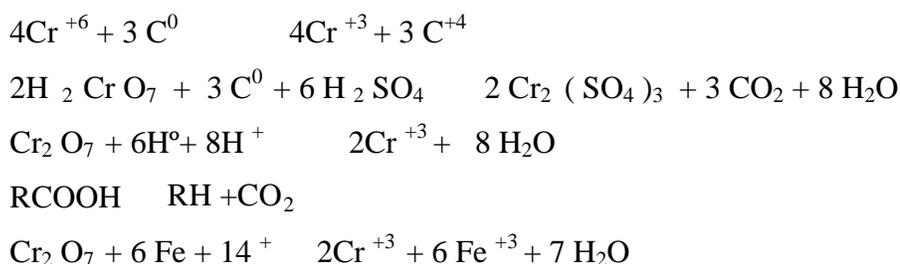
Fuente: (Dellavalle, 1992)

3.3.1.6. *Determinación de la Materia Orgánica (MO).*

Usando el método Walkley y Black modificado por Walkley, la materia orgánica se evalúa a través del contenido de carbono orgánico, basado en la oxidación de este por medio de una disolución de dicromato de potasio y el calor de reacción que

genera al mezclarla con el ácido sulfúrico concentrado, después de cierto tiempo de espera la mezcla se diluye y al adicionar ácido fosfórico para evitar las interferencias de Fe^{3+} ; el dicromato de potasio residual es valorado como sulfato ferroso, con este procedimiento se detecta entre un 70 y 84% del carbón orgánico por lo que se usa un factor de corrección que para el caso de suelos de México es el 77% con un factor de 1.299 ó (1/0.77) (SEMARNAT, 2002)

Las reacciones simplificadas de manera químicas son:



El calor necesario para la reacción proviene del calor de dilución del ácido sulfúrico. El procedimiento completo para la MO se describe en el Anexo 6.

Después de la obtención del volumen de sulfato ferroso gastado para valorar la muestra (T) así como el volumen gastado para valorar el blanco (B) y la definición del peso de la muestra (g) se procedió al cálculo del % de materia orgánica como sigue: $\% M.O. = \left[5 - \left(T * \frac{5}{B} \right) \right] * \frac{0.6717}{g}$, El factor 0.6717 resulta de multiplicar $(0.5 N) * \frac{12}{4000} * \frac{1}{0.77} * \frac{1}{0.58} * \frac{100}{g}$, donde se usa (0.5 N) por solo usar 5 ml de dicromato de potasio en lugar de 10; $\frac{12}{4000}$, es el peso mili equivalente del C, $\frac{1}{0.77}$, es el factor de oxidación (77%) del C y 100 conversión a porcentaje; $\frac{1}{0.58}$, se considera que el 58% de la MO es C^0 por lo que es necesario multiplicar por este factor y finalmente g es el peso de la muestra. (Fernández, 1976). Obtenidos estos resultados utilizamos los valores de referencia para clasificar las muestras de acuerdo a su porcentaje de materia orgánica conforme a la Tabla 7.

Tabla 7. Valores de referencia para clasificar los porcentajes de materia orgánica.

Clase	Materia Orgánica (%)
Muy bajo	<0.50
Bajo	0.60-1.50
Medio	1.60-3.50
Alto	3.60-6.00
Muy alto	>6.0

Fuente: (SEMARNAT, 2002)

3.3.1.7. Determinación de la textura.

Determinado por el método de Bouyoucos, una determinación rápida y aproximada de la proporción relativa de grupos dimensionales de partículas. Este método elimina la agregación debida a la materia orgánica y la floculación debida a los cationes de calcio y magnesio, pero no eliminan otros cementantes como carbonatos. Los tiempos de lectura de 40 segundos para partículas mayores a 0.05 mm (arena) y de 2 horas para partículas mayores a 0.002 mm (limo y arena) han sido establecidos por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos y se han usado para construir el triangulo de texturas. El procedimiento se detalla en el Anexo 7.

Obtenidos los valores del hidrómetro y termómetro es necesario corregir la lectura adicionando 0.36 por cada grado centígrado arriba de 19.5 °C y restando la misma cantidad debajo de dicha temperatura. La lectura a los 40 segundos multiplicada por 2 (factor necesario por utilizar 50 g de suelo), es igual al porcentaje de arcilla mas limo, que restado de 100 resulta ser el porcentaje de arena, la lectura obtenida a las 2 horas es el porcentaje de arcilla que de la misma manera se tiene que multiplicar por 2 y el porcentaje de limo se obtiene por diferencia. Los valores se pueden clasificar en hasta 12 clases texturales conforme al Tabla 8. (SEMARNAT, 2002)

Tabla 8. Clases texturales en función a los porcentajes de arena, limo y arcilla

Clave	Clase de textura	% arcilla	% limo	% arena
R	Arcillosa	> 40	< 40	< 45
Rl	Arcillo limosa	40-60	40-60	< 20
Ra	Arcillo arenosa	35-55	< 20	45-65
Cr	Franco arcillosa	27.5-40	15-52.5	20-45
CrI	Franco arcillo limosa	27.5-40	40-72.5	< 20
Cra	Franco arcillo arenosa	20-35	< 37.5	> 45
C	Francosas	7.5-27.5	17.5-50	22.5-52.5
Cl	Franco limosa	< 27.5	50-87.5	< 50
L	Limosa	< 12.5	> 87.5	< 20
Ca	Franco arenosa	< 20	< 50	42.5-85
Ac	Areno francosa	< 15	< 30	> 70
A	Arenosa	< 10	< 15	> 85

Fuente: (United States Department of Agriculture, 1938)

3.3.1.8. Estimación de la Capacidad de Campo (CC).

Obtenidos los resultados de las variables físicas y químicas: MO y textura se procedió a la estimación de la variable capacidad de campo (% de humedad contenida en el suelo a 33 kPa) por el método propuesto por (Saxton & Rawls, 2006) donde:

$$CC = CC' + [1.283 * (CC')^2 - 0.374 * (CC') - 0.015], \text{ donde}$$

$$CC' = -0.251 * (\%A) + 0.195 * (\%Ar) + 0.011 * (\%MO) + 0.006 * (\%A * \%MO) - 0.027 * (\%Ar * \%MO) + 0.452 * (\%A * \%Ar) + 0.299, \text{ donde } A = \text{Arena}, Ar = \text{Arcilla}.$$

Esta ecuación está basada en la regresión múltiple y la correlación de los datos de textura (A=% Arena, Ar=% de Arcilla) y MO con la CC de una amplia base de datos de la United States Department of Agriculture (aprox. 2000 horizontes de suelos tipo A y 2000 de horizontes B y C, de una BD⁴⁹ de 6700 muestras), analizados por el método estándar del laboratorio de la USDA-SCS, 1982

⁴⁹ Base de Datos o su acrónimo en inglés DB (Data Base)

propuesto por (Klute, 1986). La BD sufrió una primera depuración considerando algunos parámetros extremos como la $D_a > 1.0$ y $< 1.8 \text{ g/cm}^3$, $MO < 8\%$, % arcilla $< 60\%$, reduciéndola de 2149 a 1719 para encontrar la CC, seguido se estimó los valores de $\%H^{50}$ a capacidad de campo con las ecuaciones mencionadas para luego estimar el coeficiente de determinación para la correlación $\%H$ del suelo a CC con $\%H_{Est}^{51}$, con la ecuación resultando $R^2=0.63$ bajo una regresión lineal ($H^{\circ}_{Est.} = 0.84H^{\circ}_{Med.} + 0.04$), y una $R^2 = 0.91$ cuando se agrupó y promedió los valores de las muestras de suelos en sus 12 clases texturales y se comparó el $\%H^{\circ}$ del suelo a CC con el $\%H^{\circ}_{Est.}$ (Saxton & Rawls, 2006).

3.3.1.9. Estimación del Punto de Marchitez Permanente (PMP).

De la misma BD se obtuvo 1719 muestras con valores “normales” de textura (% Arena, % de Arcilla), MO y PMP (% de humedad contenida en el suelo a 1500 kPa), con los que por regresión múltiple se estimó los coeficientes de la ecuación propuesta por (Saxton & Rawls, 2006):

$PMP = PMP' + (PMP' * 0.14 - 0.02)$, donde

$$PMP' = -0.024 * (\%A) + 0.487 * (\%Ar) + 0.006 * (\%MO) + 0.005 * (\%A * \%MO) - 0.013 * (\%Ar * \%MO) + 0.068 * (\%A * \%Ar) + 0.031$$

El coeficiente de determinación para la correlación $\%H$ del suelo a PMP con $\%H_{Est}$, con la ecuación resultó ser de $R^2=0.86$ bajo una regresión lineal ($H^{\circ}_{Est.} = 0.86H^{\circ}_{Med.} + 0.02$) y $R^2=0.98$ después de agrupar y promediar los valores de las muestras de suelos en sus 12 clases texturales comparando $\%H^{\circ}$ del suelo a PMP con el $\%H^{\circ}_{Est.}$ (Saxton & Rawls, 2006).

Con los valores estimados de CC y PMP, debidamente georeferenciados se procedió a la interpolación y obtención de mapas de capacidad de almacenamiento de agua usando valores arbitrarios en su clasificación.

⁵⁰ Humedad Volumetrica

⁵¹ Humedad Volumetrica estimada con la ecuación de (Saxton & Rawls, 2006)

3.3.2. Interpolación y elaboración de mapas

Teniendo los datos analizados de Da, pH, CE, MO, Textura, y estimados de CC y PMP debidamente georeferenciados de las 323 muestras obtenidas en el área de riego de precisión del pivote central del Colegio de Postgraduados, entre el 10 y 13 de abril del 2012 se inició presentando los datos en un mapa para verificar las posiciones, luego mostramos los valores de cada variable en cada punto y aplicando un análisis descriptivo utilizando el programa de computo ArcGIS 10.0 de (ESRI, 2010), esto nos permitió discriminar valores extremos que se encontraban fuera de los límites máximos y mínimos que superaban el 50% adicional a la distancia al ancho de cada lado de la caja (box) conocidos también como los límites inferior y superior, los que nunca se superaron el 10%, siendo la Da el caso más atípico que se eliminaron hasta 32 valores de 323 (equivalente al 9.91 %), seguido se aplicaron otras herramientas de análisis exploratorias que determinaron medias: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k x_i$, medianas: $Me = a + \frac{(b-a)(0.5-c)}{d}$, desviación estándar: $s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$, kurtosis: $k = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2]^2} - 3$, coeficiente de variación: $C.V = \frac{s}{\bar{x}} * 100$, de forma univariable (Funes, 2004).

Obtenida la BD depurada con valores “típicos”, dentro de una distribución normal se procedió a la estimación de los componentes del semivariograma bajo el método de Kriging ordinario: $g(r) = C \left(1 - \exp\left(-\frac{r^2}{a^2}\right) \right)$, definido por su predictor espacial que minimiza el error cuadrático medio esperado, y el modelo gaussiano con la característica especial de no requerir la media, además de ser un interpolador “exacto”, (Matheron, 1962), mencionado por (Cressie, 1991).

Por el desconocimiento del comportamiento de las variables (medidas y estimadas) y la influencia de gradientes no medidos como humedad en el área de muestreo se permitió que el complemento especializado Geostatistical Wizard del software

ArcGIS 10.0 estimará los valores de Nugget, Sill, Range, Lag (longitud), número de Lag (en este caso 12), influencia anisotropía, análisis sectorial (1 sector), función de regresión, error, estandarización del error y normalización de datos (Kerry & Oliver, 2008).

El mapa obtenido del procesamiento de interpolación de las geovariables: Da, pH, C.E., M.O., CC y PMP se presentan en el capítulo de resultados, el mismo que fue desarrollado bajo un modelo automatizado que permitió tomar los datos de longitud (x), latitud (y), y la variable de interés (z) y llegó no solo a definir las áreas con valores similares en un mapa sino entregar los valores límite de cada área en forma de una que tenga por lo menos la intersección del numero de válvula, ángulo de posición y límite de zona homogénea. En la Figura 17 se muestra un ejemplo del modelo programado en el modelador ModelBuilder de ArcGIS 10.0 para la variable Conductividad Eléctrica.

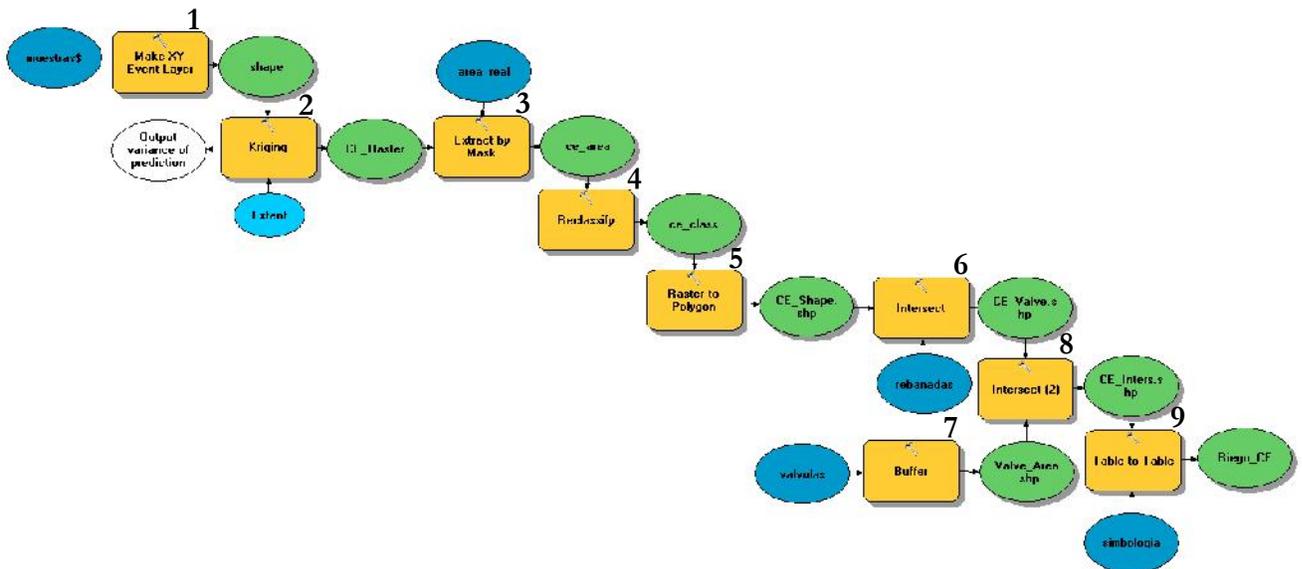


Figura 17. Modelo de interpolación e intersección de un mapa de C.E. del suelo

El modelo presentado en la Figura 17 desarrollado en ModelBuilder bajo el entorno de Python (ESRI ©, 2010) se describe en 10 pasos:

1. **Obtención de la base de datos**, con la herramienta “*Make XY Event Layer*”, la misma que nos permite importar la BD en “cualquier” extensión o formato como .txt, .xls, .dbf, .shp, entre otras, seguido se especifica el nombre de archivo y la ruta de ubicación (XY Table), la longitud en el cuadro “X Field”, latitud en el cuadro “Y Field” y de forma opcional la altitud en “Z Field”, especificamos el nombre del shape de salida y la ruta en el cuadro “Layer Name or Table View” y de forma opcional podemos seleccionar la proyección en que se encuentran nuestros datos en el cuadro “Spatial Reference”, tanto la base de datos como la ubicación de estos y la creación del raster se presentan en la Figura 18.

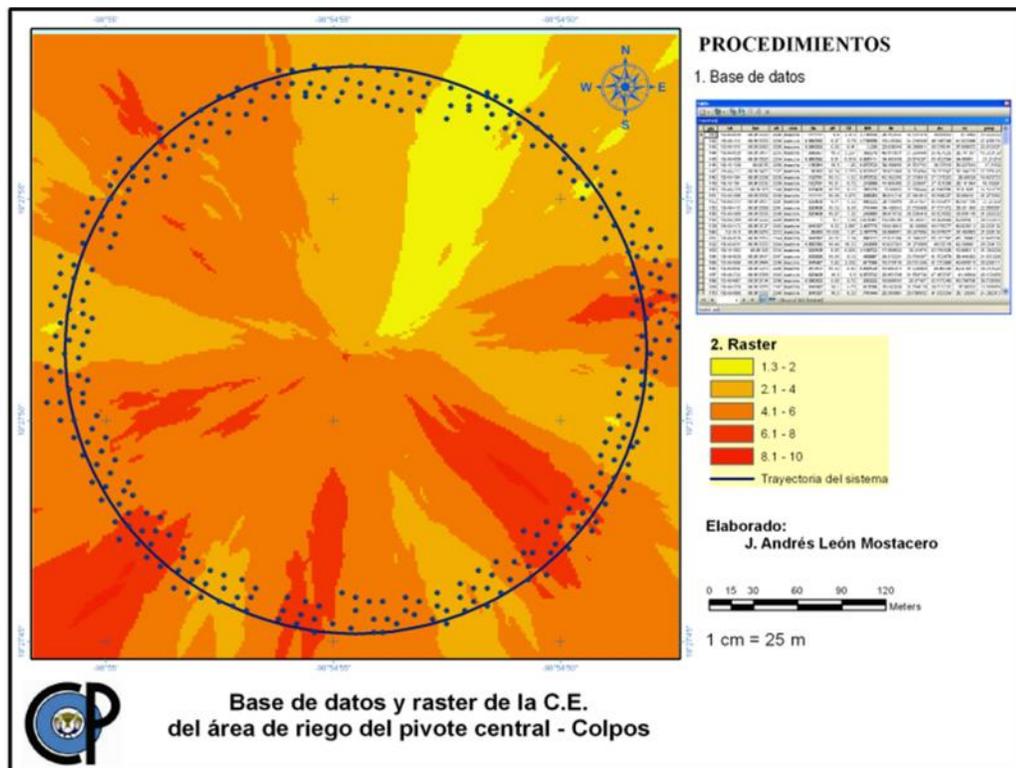


Figura 18. Procedimiento de presentación de base de datos e interpolación

2. **Interpolación**, usando la herramienta “*Kriging*” iniciamos seleccionando el shape creado en el paso 1 y especificamos el campo de la variable de interés en el cuadro “Z value field”, el método de Krigado entre Ordinario o Universal y su respectivo modelo de semivariograma que para nuestro caso usamos el método Ordinario con el modelo Gaussiano, de la misma forma tenemos la opción para especificar la longitud del Lag, Rango, Sill y Nugget, tamaño de celda de interpolación, número

de puntos de referencia y hasta la máxima distancia de interpolación que en caso de omitirse el programa tomara datos por default, también se debe especificar el tamaño del raster para cubrir el área total de interés ya que por default se toma la posición de los puntos incluidos en la interpolación. Es necesario finalmente nombrar y ubicar el archivo de salida que será un modelo de extensión raster.

3. **Delimitación del área de interés**, apoyados de la herramienta “*Extract by Mask*” ingresamos el raster creado en el paso 2 en la ventana “Input raster” y el shape o raster que servirá para limitar el área de interés en la ventana “Input raster or feature mask data”, para nuestro caso se usó el shape límite de un anillo de círculo perfecto (160 m de Ø interno y 210 m de Ø externo) georeferenciado en el que se recortaron el área de las calles y zonas sin cultivar, este fue creado en el software AutoCad 2012 y exportado a ArcGIS 10.0 para su conversión en shape. Finalmente se establece el nombre y ubicación del nuevo raster de interés, como se muestra en la Figura 19.

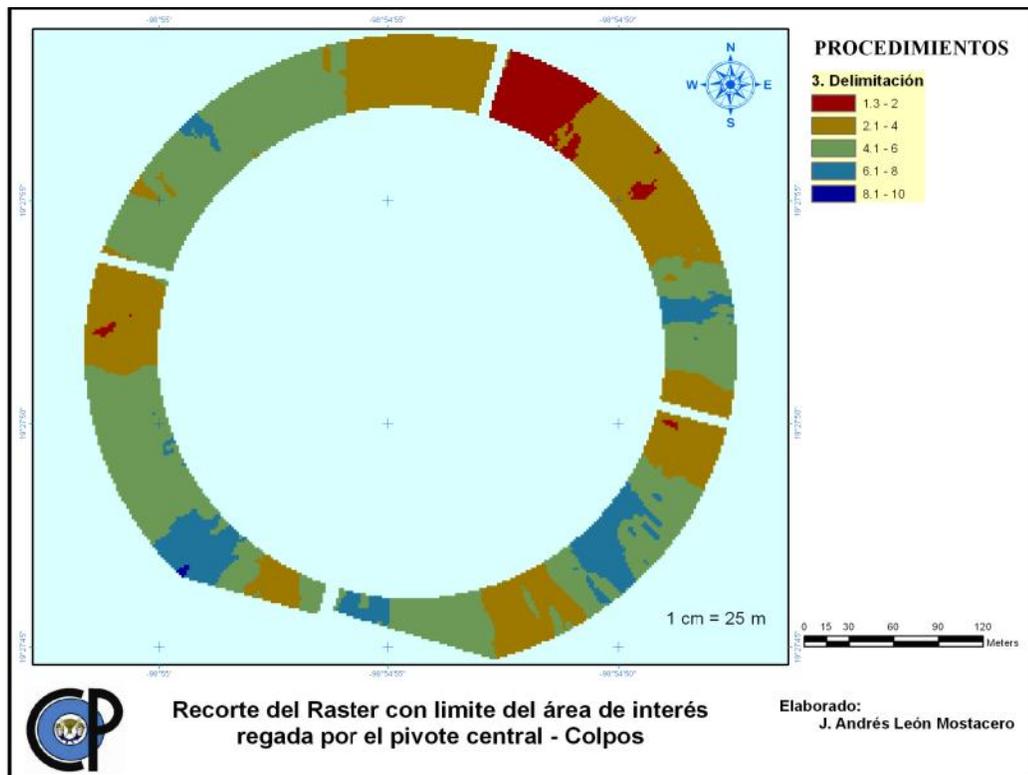


Figura 19. Procedimiento para la limitación del raster creado

4. **Clasificación y obtención de áreas homogéneas**, usando la herramienta **“Reclassify”** ingresamos el raster a reclasificar en **“Input raster”** y especificamos el campo de clasificación que generalmente es Value en **“Reclass field”**, luego es necesario también especificar un sistema de clasificación que puede ser manual, automático, de intervalos iguales, intervalos definidos, intervalos geométricos, desviación estándar u otro, así como los valores límites y/o número de clases de acuerdo al rango de interés deseado que se mostrará en el mapa, tenemos también opciones gestionar, guardar, modificar tablas que contienen los valores límites, finalmente se especifica el nombre y ubicación del raster reclasificado.

5. **Conversión de raster a shape**, con **“Raster to Polygon”**, especificamos el raster a convertir en **“Input raster”** y el campo de conversión de manera opcional en **“Field”**, incluimos el nombre y la ubicación en **“Output polygon features”**. Esta herramienta nos convierte el raster de interés reclasificado en información vectorial de tipo polígono, el resultado del proceso se resume en la Figura 20.

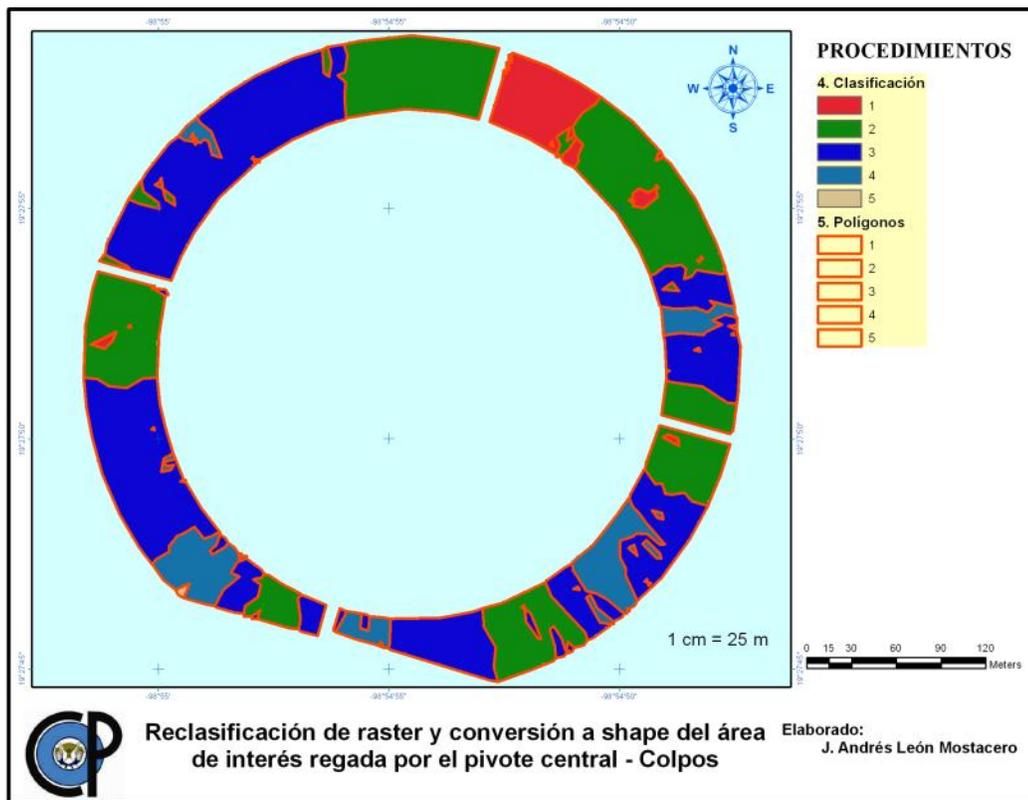


Figura 20. Clasificación y conversión de raster a shape.

6. **Intersección de las zonas con la posición del equipo**, definidas las áreas “homogéneas” de la variable de interés es preciso interceptar con la posición del equipo, que para nuestro caso consideramos secciones angulares de 1° que por la longitud de brazo del equipo (199.92 m) equivale a una distancia curva de 3.49 m aproximadamente en el final del equipo, la creación de esta información vectorial se facilita en software de diseño como el AutoCad 2012 que luego se exporta a ArcGIS 10.0 para su conversión en un shape de 360 líneas de ángulo consecutivo. Utilizando la herramienta “*Intersect*” interceptamos el shape de polígonos homogéneos creados en el paso 5 con el shape de secciones de ubicación angular del brazo, para ello ingresamos los shapes en la ventana “Input Features”, especificamos el nombre y ubicación del nuevo shape de líneas seccionadas de acuerdo al área de cada polígono, por otro lado, de forma opcional podemos especificar los campos de la tabla a interceptarse “JoinAttributes”, la tolerancia “XY Tolerance” y el tipo de vector de salida “Output Type”

7. **Área de riego de aspersores**, iniciamos creando la trayectoria de las válvulas como círculos concéntricos, que en nuestro caso fueron 8, el mayor fue de 198.0 m de radio y los siguientes fueron disminuyendo en 2.70 m hasta los 179.10 m, utilizando el software AutoCad 2012, del que se exportaron a ArcGIS donde se convirtió en shape de polilíneas. Seguido utilizamos la herramienta “*Buffer*” que nos permite crear polígonos a partir de las polilíneas con un ancho especificado, que para nuestro caso fue de 1.30 m, primero ingresamos el shape de polilíneas en “Input Features”, especificamos nombre y ubicación del nuevo shape de polígonos en “Output Feature Class” así como el valor de la distancia que será el semi espesor del nuevo polígono que puede ser como “Linear unit” o “Field”, opcionalmente podemos especificar si se quiere la creación del polígono a un lado o ambos lados de la polilínea en “Side Type” si el final se quiere redondeado o cuadrado “End Type”, si se desea recortar la superposición de los polígonos “Dissolve Type” respetando un campo en específico “Dissolve Field(s)”, tanto el límite de las zonas de las secciones como la trayectoria de las válvulas se precisan en la Figura 21.

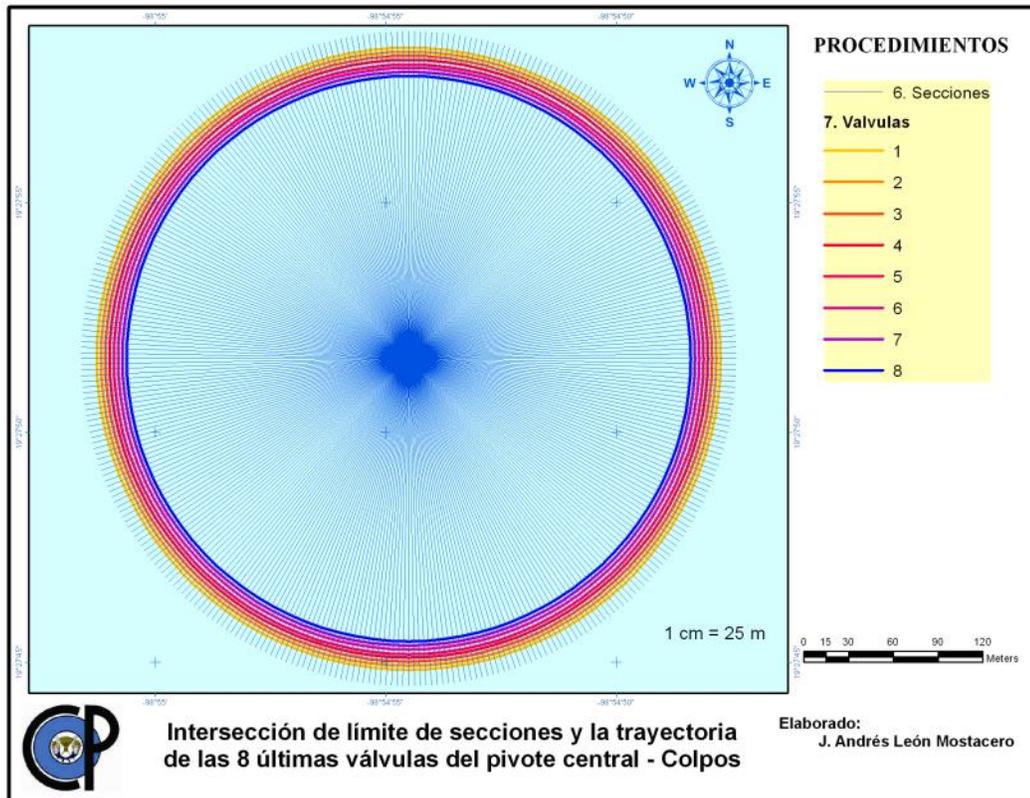


Figura 21. Límite de secciones y trayectoria de las válvulas.

8. **Intersección de las zonas de riego**, posición del equipo y trayectoria de válvula, utilizando la herramienta “*Intersect*” por segunda vez interceptamos el shape obtenido en el paso 7 y 8, obteniendo así un shape de secciones de línea en el que se diferencia la posición del equipo (360 posiciones) la trayectoria de las válvulas (en nuestro caso 8 válvulas) y las zonas homogéneas de riego dependiendo de la variable interpolada.
9. **Definición de límites de área homogéneas**, usando la herramienta “*Table to Table*” importamos la tabla del shape obtenido en el paso 8 “Input Rows”, a la que especificamos una simbología “Output Location” un nombre de la nueva tabla “Output Table” y opcionalmente si se desea realizar operaciones matemáticas o lógicas entre o inter campos se tiene la ventana “Expression”, finalmente se puede seleccionar solo los campos que se quiere que aparezcan en la tabla “Field Map”, la Figura 22 muestra los límites de intersección de las zonas de riego a precisión.

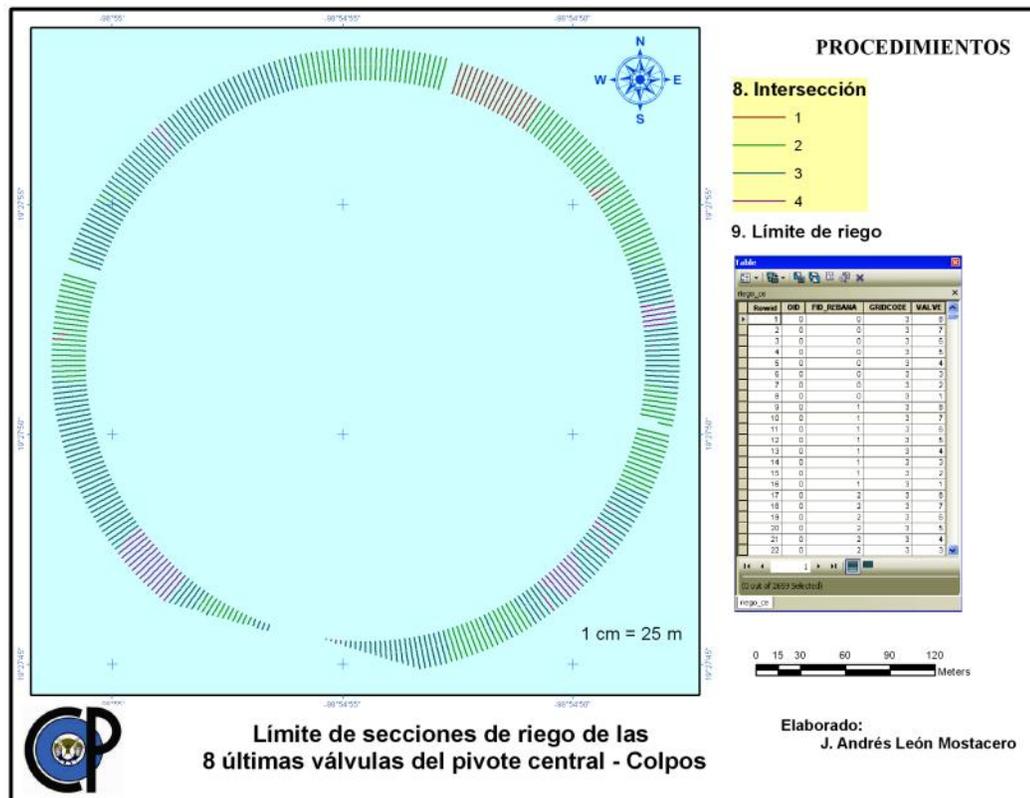


Figura 22. Límite de secciones de riego y base de datos.

Finalmente el resultado de los pasos se resume en el ejemplo de un mapa de conductividad eléctrica que se presenta en la Figura 23, es decir ejecutando el programa desarrollado en ModelBuilder partir de una tabla de x,y,z, donde “x” es la longitud, “y” es la latitud y “z” corresponde a la variable medida o estimada en este caso del suelo.

El programa desarrollado además de tener las opciones de presentar los mapas obtenidos por interpolación e intersección tanto de las secciones como las trayectorias construye una base de datos con los parámetros de valor del ángulo en grados decimales, numero de válvula y valor de la variable analizada que son los que finalmente definen la cantidad de agua a aplicar y los que se consideran en el software de riego desarrollado.

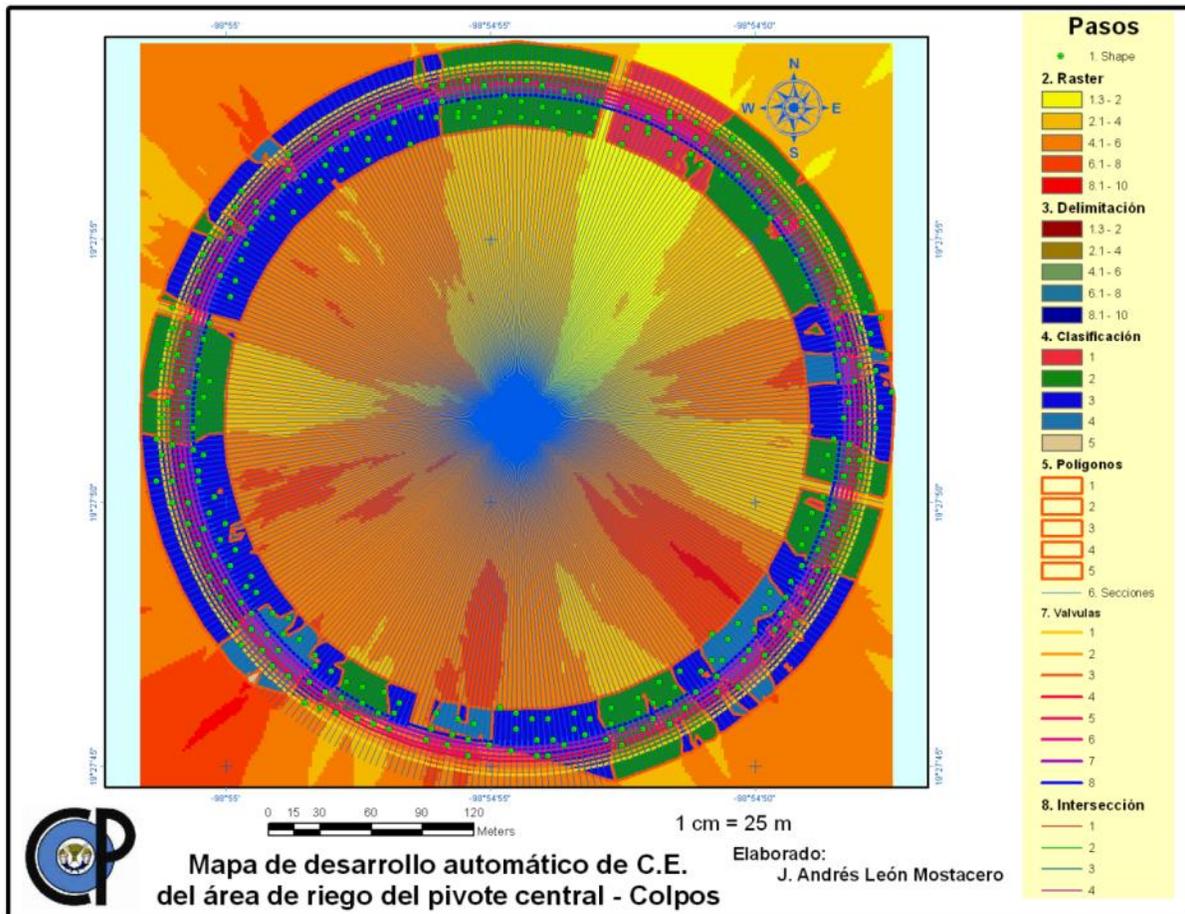


Figura 23. Pasos seguidos del proceso automático en la creación de mapas temáticos

3.3.3. Sistema de riego a precisión

Podemos manejar hasta tres componentes que son: **1.** Componente electrónico **2.** Desarrollo del software, y **3.** Componente electromecánico.

3.3.3.1. Sistema electrónico

Iniciamos la integración de los componentes electrónicos y con estos la ubicación del GPS LS20031 (Electronics, 2012a), y la adaptación de 5 cables soldados a la tablilla desarrollada, como se muestra en la Figura 24, se tuvo en cuenta que siempre el GPS quede expuesto en la parte superior para facilitar la ubicación de satélites y evitar interferencias, en la imagen también se puede ver la función de los diferentes conectores en la tablilla (Electronics, 2012b), y las partes de sujeción y fijado a esta por medio de pernos.

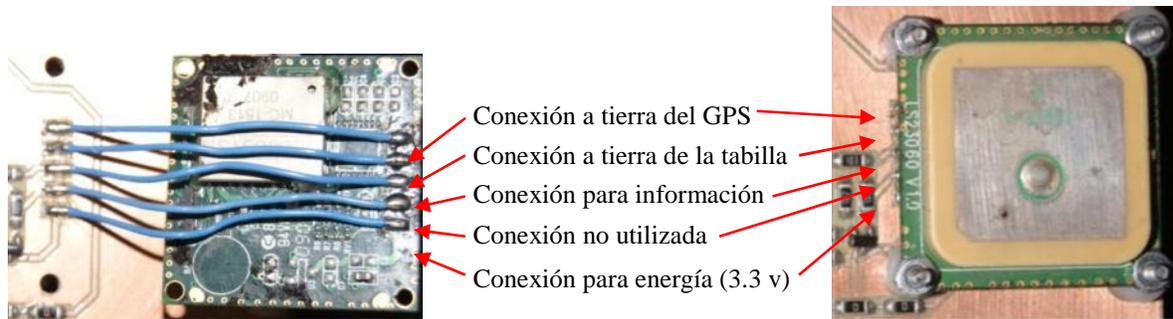


Figura 24. Montaje del sistema de posicionamiento.

El GPS LS20031, es un completo receptor GPS de antena inteligente, que se incluye a circuitos del receptor GPS, es de bajo costo que genera una asombrosa cantidad de información de la posición a una velocidad de 5 veces por segundo su tecnología Locosys que ha sido probada para hacer un seguimiento de hasta 66 satélites o torres de corrección en tierra. La navegación y la actualización lo hacen con bajo consumo de energía, considerándolo de sensibilidad superior para operar en zonas urbanas, equipos en movimiento, ambientes densos de follajes y otras aplicaciones basadas en localización en zonas con interferencia. (Electronics, 2012a).

El módulo GPS LS20031, no tiene un conector unido por lo que para obtener los datos de la unidad se necesita conectar algunos cables, a un dispositivo de almacenamiento y display, que permita además mantener la antena de cerámica cuadrada de manera que apunte hacia el cielo.

Después de las conexiones del GPS a la tablilla tenemos una derivación a la pantalla digital para presentar los datos de latitud y longitud en grados de hasta 6 decimales, gracias al uso de 7 conectores macho en ángulo, como se muestra en la Figura 25.

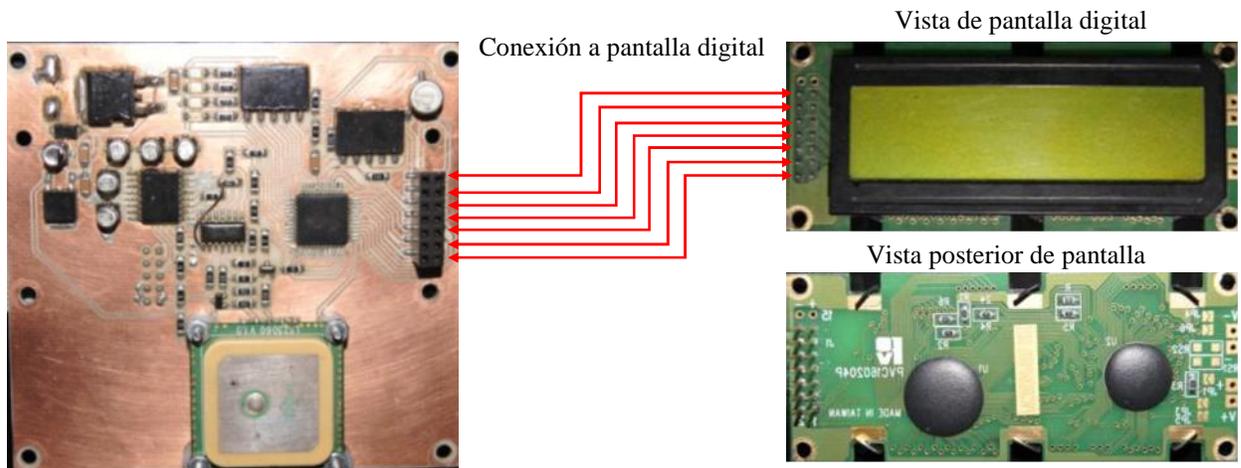


Figura 25. Conexión de GPS a pantalla digital.

La tablilla construida en bronce conforme al diseño de la Figura 25, integra el sistema de posicionamiento (GPS), punto de comunicación (puerto serial) para conexión a la computadora, abastecimiento de energía con una intensidad de hasta 5 voltios que puede ser dado por un puerto serial de la computadora con el uso de un adaptador de 110 a 5 voltios y por último la conexión de la tablilla a la pantalla digital, esto se detalla en la imagen de la Figura 26.

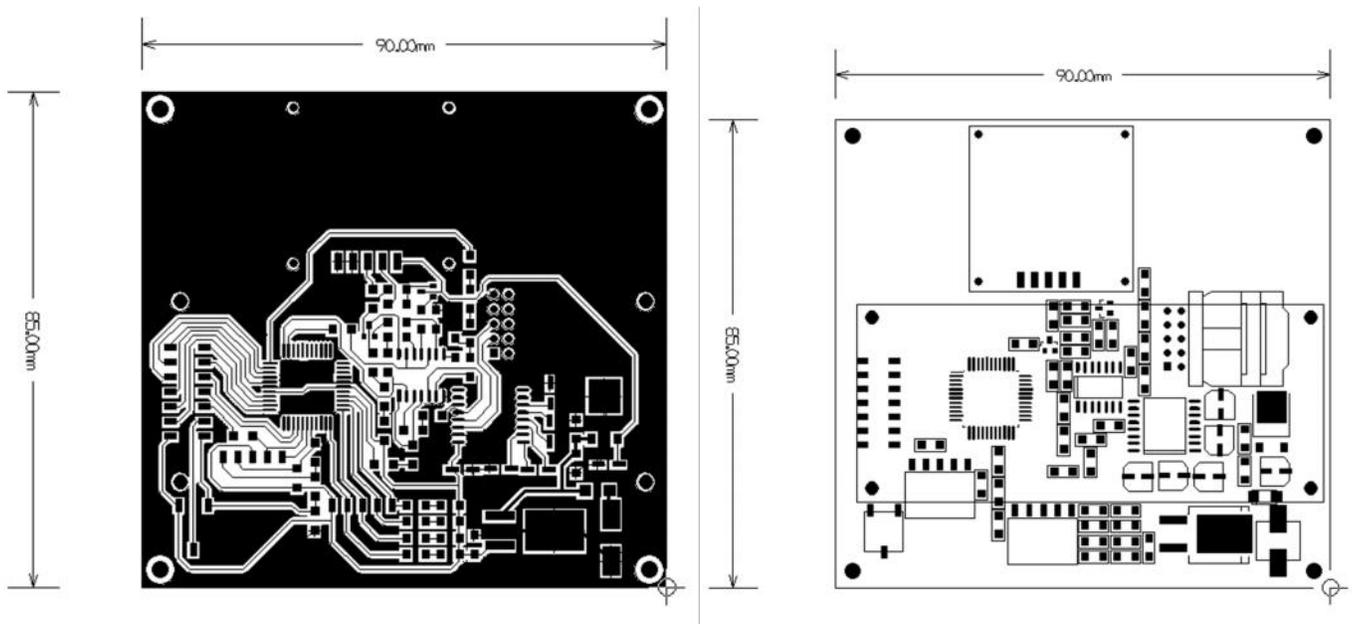


Figura 26. Diseño electrónico de la tablilla 1

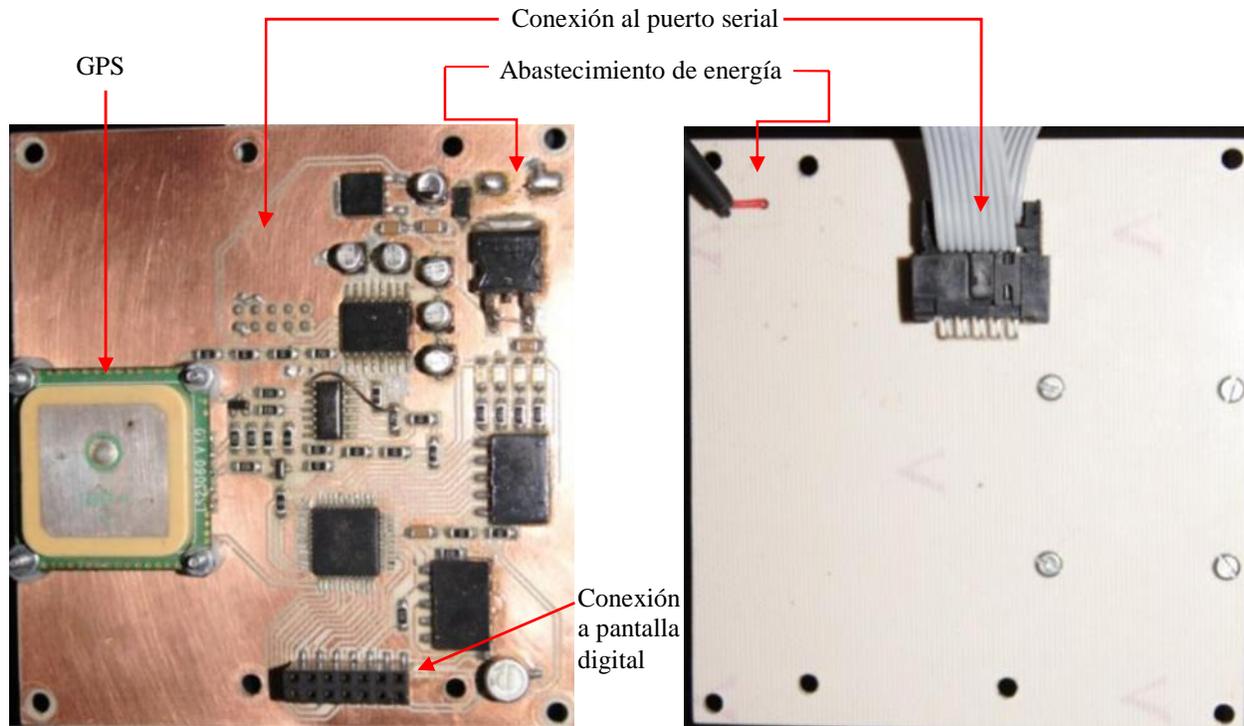


Figura 27. Diseño de la tablilla e integración de sistemas.

El mapa eléctrico de la tablilla 1 es conforme a la Figura 28, este muestra los circuitos y terminales donde fluye la energía para su funcionamiento.

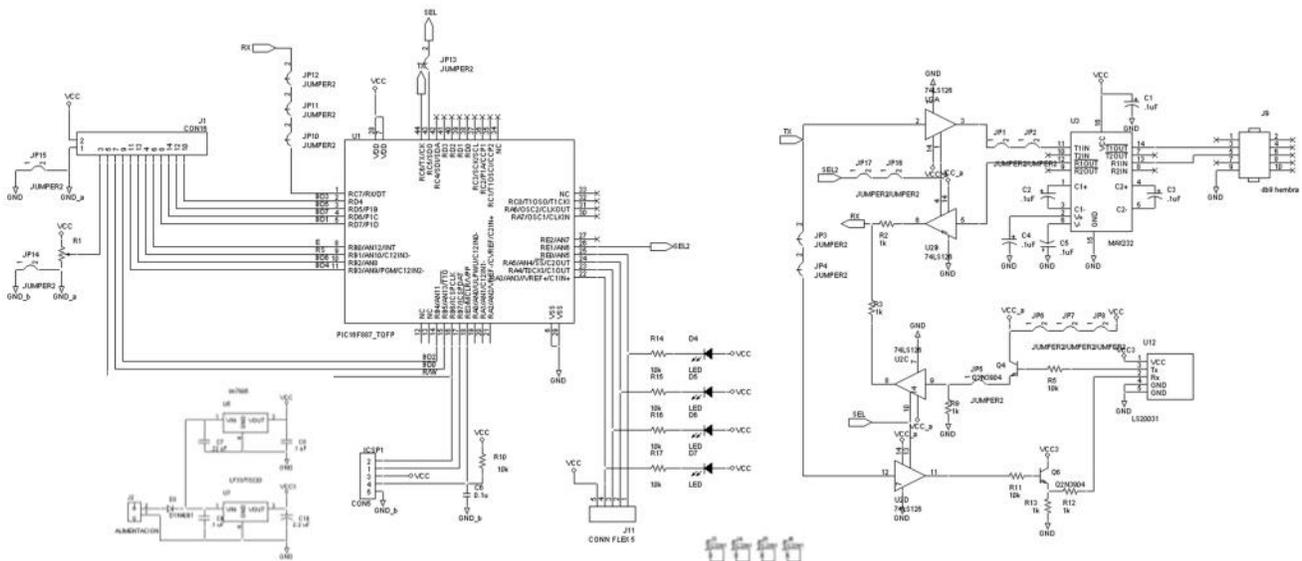


Figura 28. Mapa eléctrico de la tablilla 1

Los circuitos de la tablilla 1 se conectan a una segunda tablilla también vía puerto serial, que es donde se recibe la información de la computadora para la operación de las válvulas. Esta tablilla 2 desarrolla los circuitos para la operación de cada válvula en forma independiente por lo que se tiene sus conexiones al switch de cada control, como lo muestra el diseño de la Figura 29.

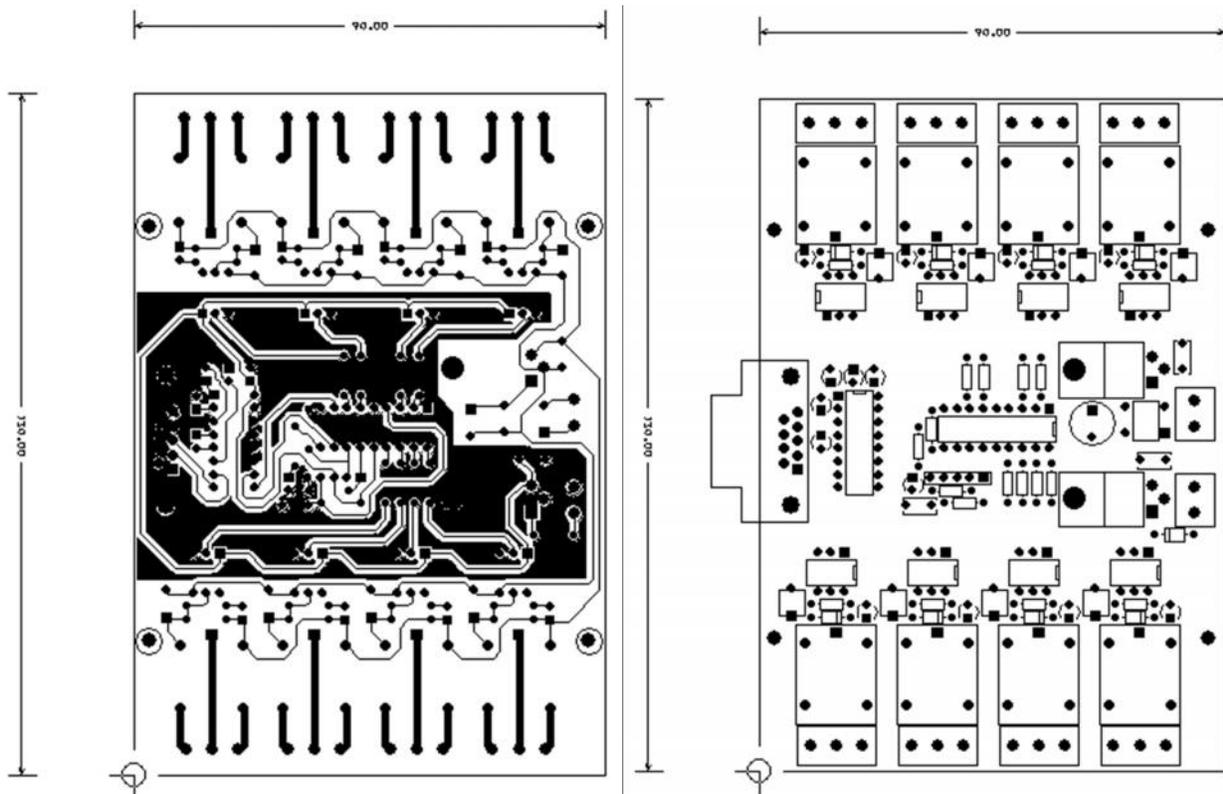


Figura 29. Diseño electrónico de la tablilla 2

El diseño de la tablilla 2 (Figura 29) también muestra la ubicación de los relevadores capaces de recibir la energía para operar las válvulas (24 voltios), además de tener las resistencias necesarias como se muestra en el mapa eléctrico de la Figura 30, su ubicación física de las tablillas en este caso esta “sobre puestas” la tablilla 2 en la parte inferior y la tablilla 1 en la parte superior que permita su libre recepción de ubicación por parte del GPS.

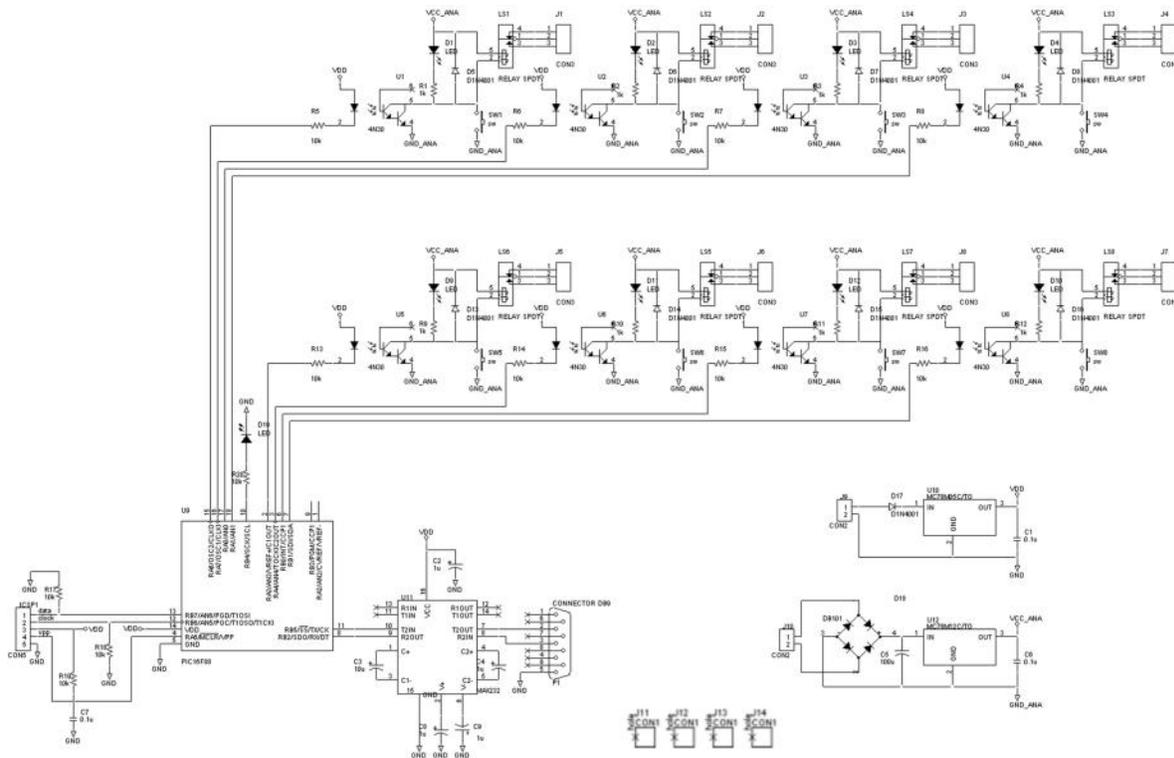


Figura 30. Mapa eléctrico de la tablilla 2

A partir del control de las válvulas y los relevadores para obtener la potencia necesaria para el cierre y apertura (on/off) de cada electroválvula se tiene la conexión eléctrica a los cables de cada válvula, como se muestra en las figuras 29 y 30, se consideraron además accesorios para el funcionamiento del sistema de riego como un convertidor de conexión serial a USB, para hacerlo funcional con los equipos de computo actuales, transformador de energía de 110 v a 24 v, energía necesaria para la operación de válvulas; accesorios de seguridad como un fusible para evitar sobre cargas de energía y un ventilador para evitar calentamiento de todo el sistema de riego y computadora que es necesario dejar junto al equipo de riego mientras este opera, caja de protección hecha en policarbonato y reforzada con marco de hierro para evitar contaminantes como polvo, agua de lluvia daños humanos, entre otros pero a la vez evitar la interferencia con el GPS.

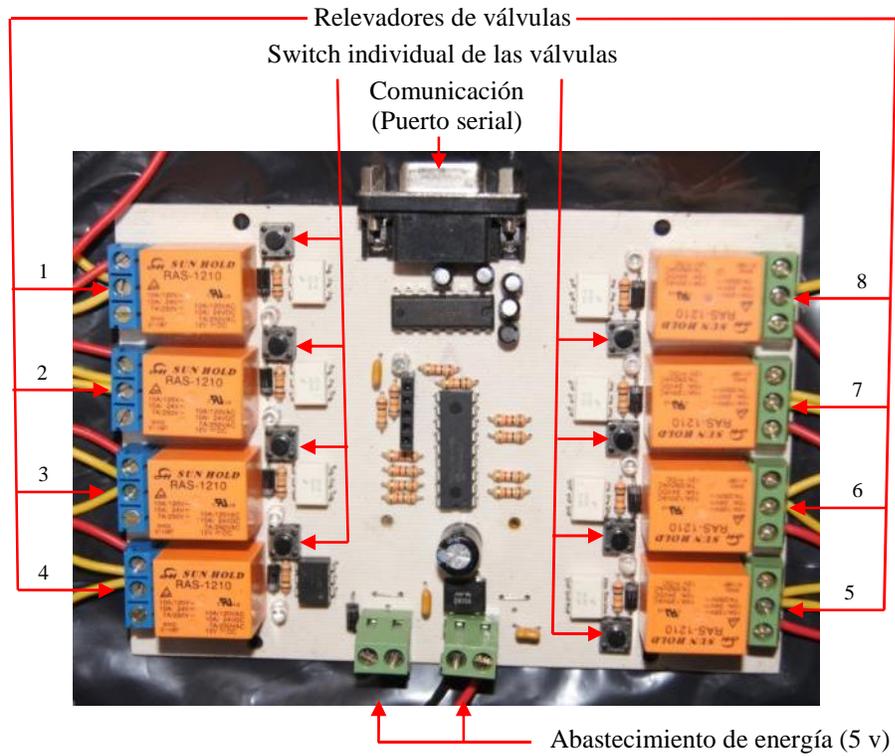


Figura 31. Diseño de la tablilla de control individualizado de las válvulas.

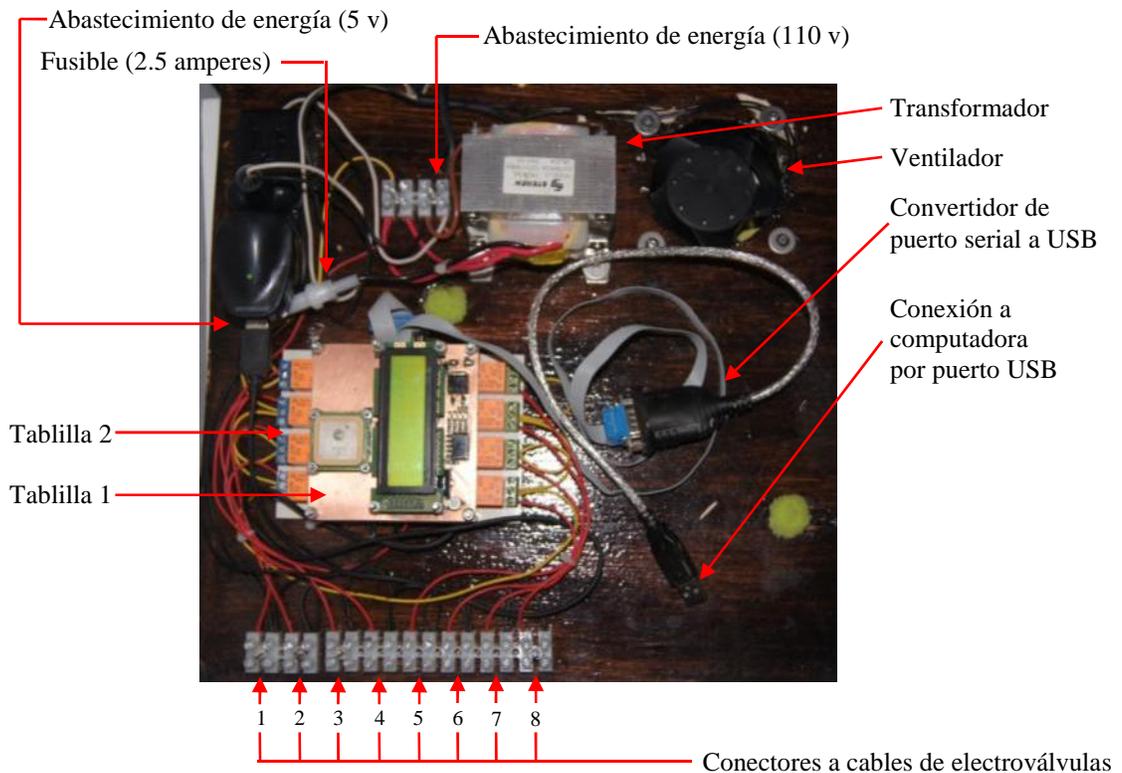


Figura 32. Diseño de la tablilla de control individualizado de las válvulas.

Todo este sistema fue montado en el pivote central aprovechando una base perforada integrada al brazo de riego junto a la caja de control de la torre 4, en esta se emperno la base del sistema de riego asegurando su fijación.

Finalmente debemos clarificar el flujo de información y energía de los componentes del sistema de riego diferenciado en el diagrama, Figura 33; empezamos con la información obtenida por el GPS, la misma que es transmitida a la tablilla 1 de donde es transferida a la computadora. Por otro lado se elaboran mapas en forma independiente con datos de la medición de variables físicas del suelos en puntos debidamente georreferenciados, con los que gracias a un proceso de interpolación se puede definir zonas “homogéneas” que son las que finalmente determinan el riego diferenciado, de la misma manera esta información es procesada e integrada al programa, después de la comparación de la posición del GPS en el mapa pre establecido se envía la orden de tiempo de apertura y cierre de válvulas según el agua que se quiera aplicar a la tablilla 2, esta recibe la información del tiempo y envía el impulso a los relevadores los cuales tienen la energía necesaria para operar las válvulas. De esta tablilla 2 también se regresa el cálculo del tiempo que permanecen abiertas las válvulas para poder hacer el control de tiempo de apertura. Para el caso de la energía esta es tomada de la estructura del pivote en su sistema de control de la torre 3 en este caso, la misma que es de 110 voltios y tiene que ser variada a 24 voltios para la operación de las válvulas o usada para el funcionamiento de la computadora la misma que puede dar los 5 voltios mediante un puerto USB para el funcionamiento de las tablillas y por ende para el GPS y su respectivo display, o una forma alternativa es el uso de un adaptador para el abastecimiento de los 5 voltios.

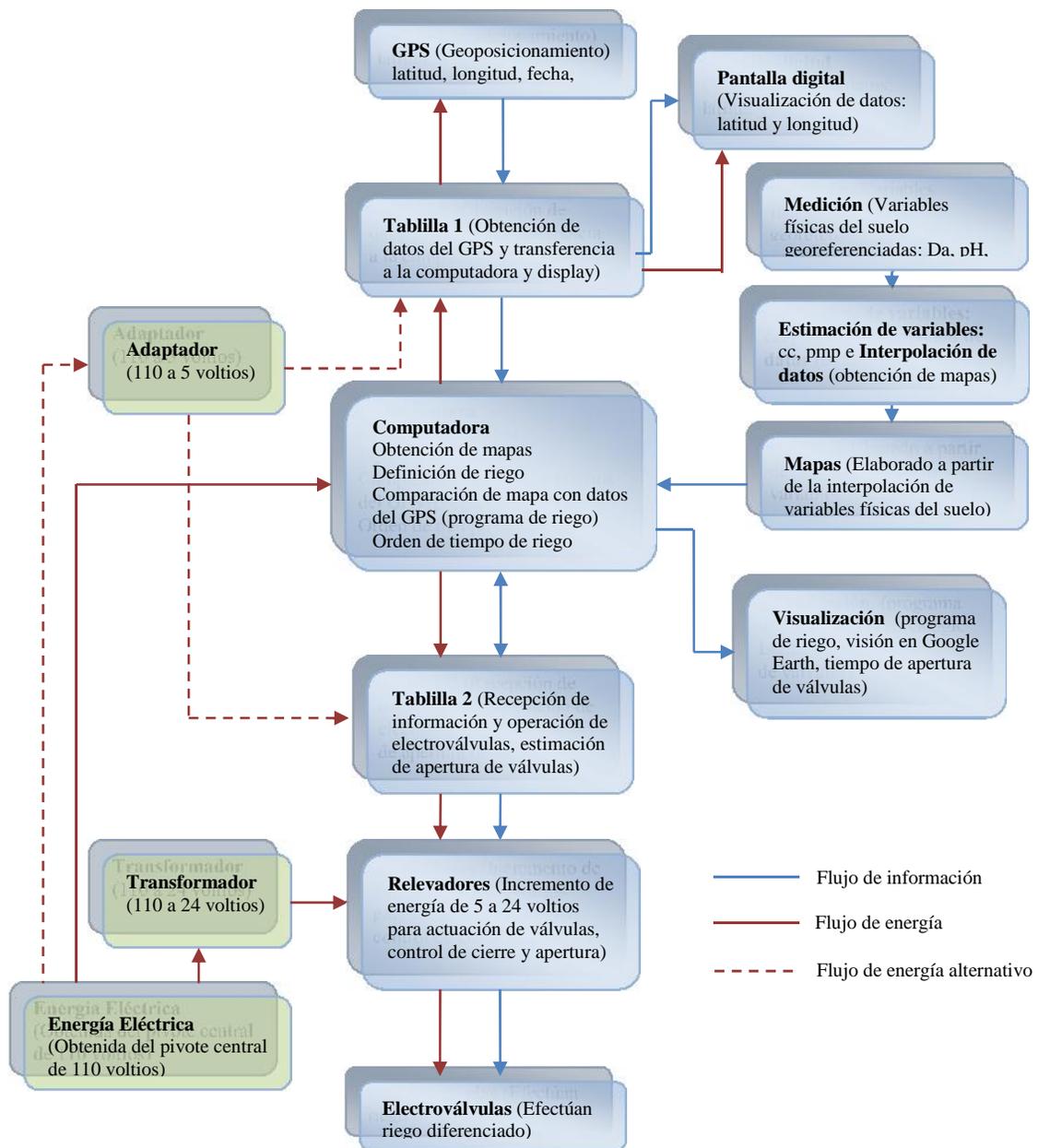


Figura 33. Diagrama de flujo de información y energía del sistema de riego diferenciado.

3.3.3.2. Software del sistema de riego

Se trata de un programa desarrollado en Python Ver. 2.7.3 (Python, 2012) utilizando las librerías de imágenes de Python, PIL Ver. 1.1.7 (Python, 2009) y algunas librerías de programas como el PyQt Ver. 4.8 (Limited, 2007), librerías para soportar conexiones a puertos seriales como Pyserial (Python, 2010) y

compiladores como el Py2.exe Ver. (Phyton, 2007). Para facilitar la programación se escribió el código en el programa de apoyo Aptana Studio 3 Ver 3.1.3 (Appcelerator, 2009).

El programa fue estructurado conforme el diagrama de flujo de la Figura 34, donde iniciamos con la creación de la forma gráfica o pantalla del programa, la misma que es importada al programa en Python, de la misma manera a forma de importación es necesario activar las librerías de imágenes, funciones matemáticas, puerto serial, tiempo; seguido declaramos las variables a usar y activamos el puerto serial que servirá para conexión a la computadora, solicitamos luego la operación de objetos.

El cuerpo del programa lo hemos definido hasta en 3 tiempos o sub rutinas, siendo la primera la definición de los ciclos de riego mostrados en la pantalla 4, la segunda sub rutina muestra una imagen de barra en la pantalla 1 o principal que indica la actualización del programa cada 1 segundo que es tiempo en el que el programa solicita una nueva posición al GPS, la sub rutina 3 hace la comparación de la posición del GPS con el mapa diferenciado, para esto es necesario la creación de tabla de áreas es decir el límite de las zonas donde cambia el patrón de ciclos de riego y el ancho de acuerdo al porcentaje de error (franja) que se considere para que los puntos sean considerados, para esto es necesario la creación de dos tablas; “tabla de datos” en los que se especifica la coordenada de cambio de los límites de cada sección y la “tabla de riego”, que especifica el ciclo de riego adoptado para cada sección y por cada electroválvula.

Obtenidas las tablas de datos, de riego, y la del GPS estas son convertidos en archivos de extensión .kml, los mismos que son mostrados en el programa Google Earth y en el caso de la ubicación del GPS tiene la capacidad de actualizar su posición a medida que obtiene otro dato de su nueva posición (1 segundo). Por último al cerrar el programa esta completará la impresión de la latitud, longitud, hora, sección de riego así como la sumatoria del tiempo de apertura de cada válvula y hora exacta de inicio y fin de riego en una tabla de texto creada para tal fin y archivada con el nombre que coincide con el año, mes y día del riego. La Figura 34

muestra la estructura del programa de riego diferenciado y el Anexo 8, el código del programa.

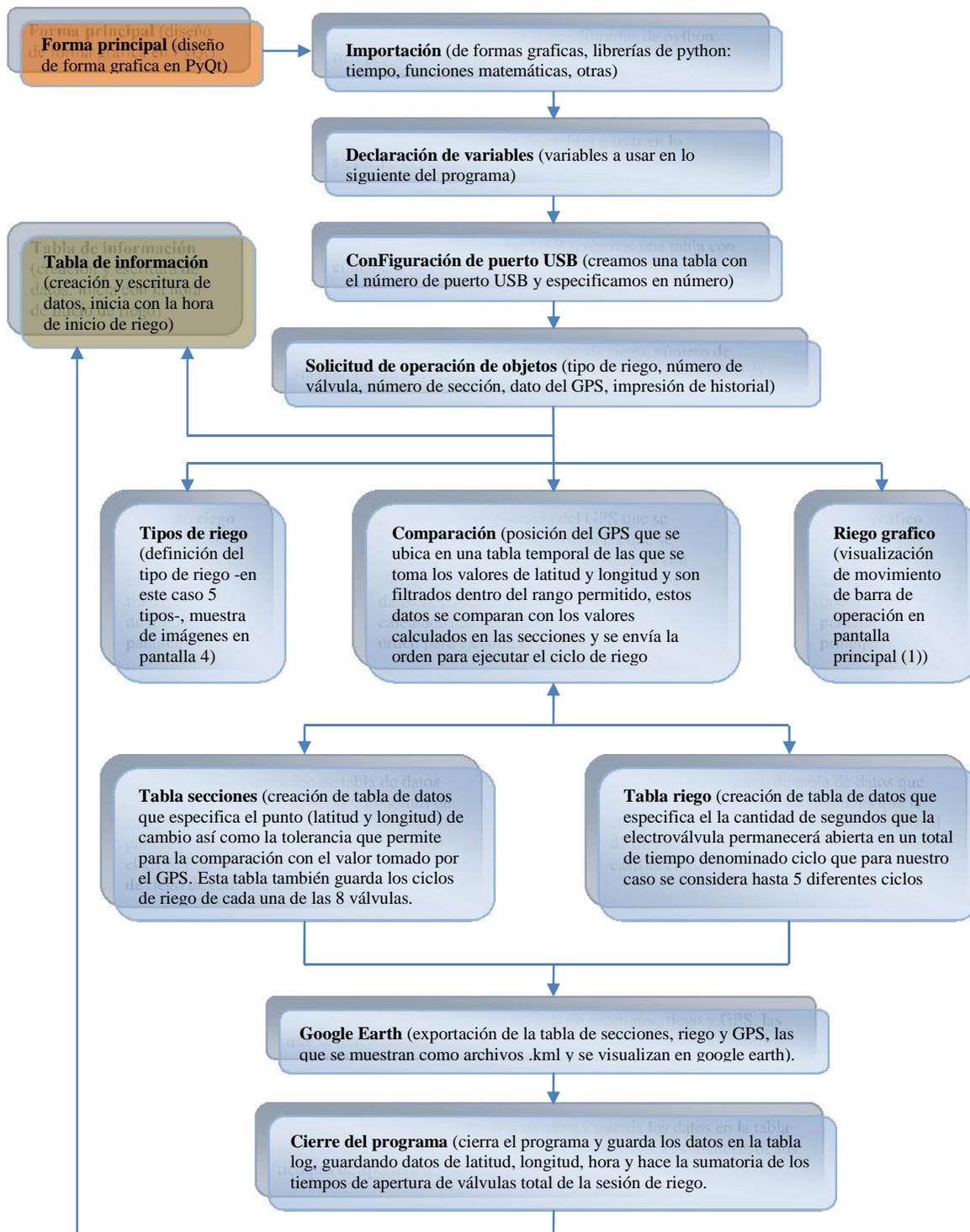


Figura 34. Diagrama de flujo del sistema de riego diferenciado.

3.3.3.3. *Componente electromecánico*

Para este componente iniciamos con la ubicación exacta del sistema de control o cabezal del sistema y se definió que sería junto al sistema de control de rodamiento de la tercera y última torre, esto para la facilidad y cercanía para abastecerse de energía eléctrica, evitar la interferencia del funcionamiento del GPS, facilitar el cableado a cada electroválvula y aprovechar una base fija incorporada al sistema de riego donde fijamos la base del sistema de riego a precisión desarrollado. En la Figura 35, se puede ver de manera exacta donde es su ubicación del sistema de control en el pivote central.



Figura 35. Ubicación del sistema de control de riego diferenciado

Posterior se hizo el cableado (Cable de uso rudo n° 18) desde el sistema de control a cada una de las electroválvulas con la finalidad de tener un control individualizado de

cada salida, para esto se aprovechó el cable adjunto que conduce la energía del panel central del pivote y las mangueras bajante para fijar el cable a estos, Figura 36.

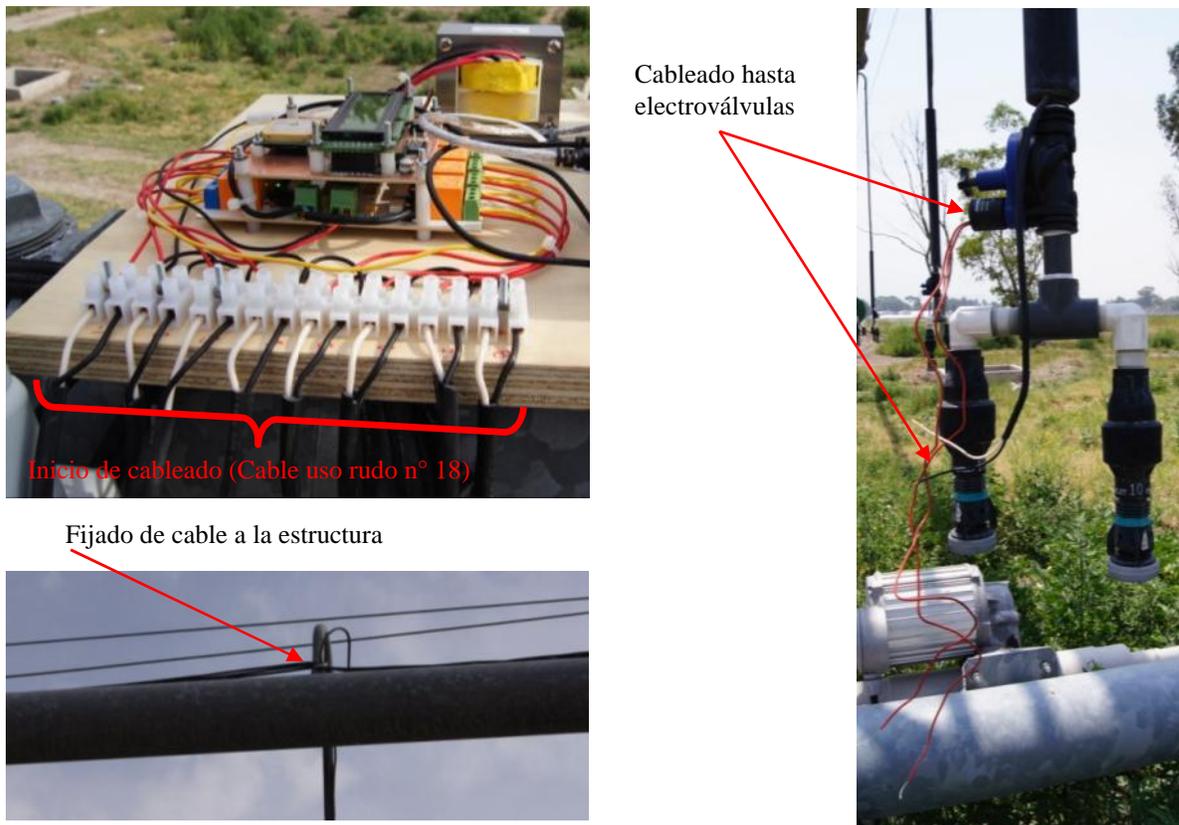


Figura 36. Cableado de sistema de control a electroválvulas.

La longitud total para la conexión a 8 válvulas equidistantes en 2.70 m y con el sistema de control intermedio fue de 90.0 m.

Las válvulas utilizadas fueron de la marca NaanDanJain de diámetro interno de $\frac{3}{4}$ de pulgada, regulador de flujo y seguro manual de operación, con conexión hembra ambos lados, operada con 24 voltios y una presión máxima de operación de 10 bars (145 psi) (NaanDanJain, 2012). Estas electroválvulas se ubicaron en cada bajante de las 8 en operación, antes de la “T” de distribución, regulador de presión y sistema de rociado de las salidas, Figura 37.

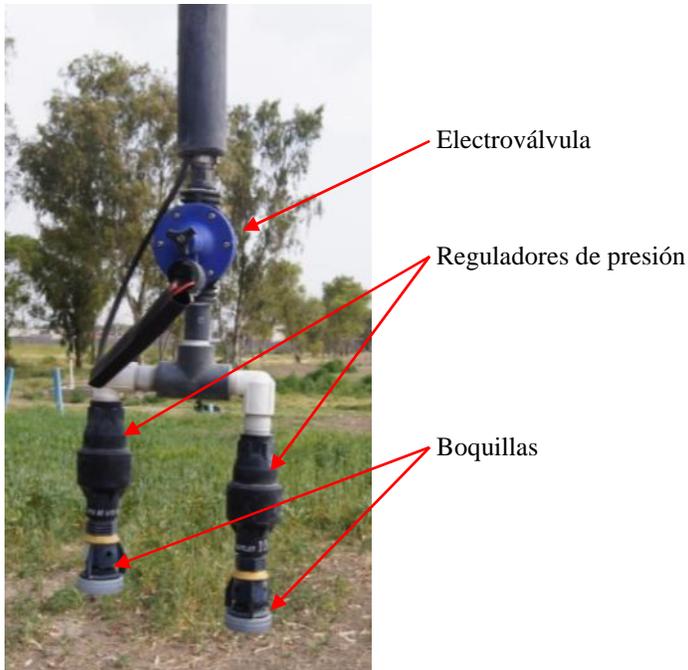


Figura 37. Ubicación de electroválvula NaanDanJain de $\frac{3}{4}$ de \varnothing interno.

3.3.4. Evaluación del sistema

Consideramos dos evaluaciones que fueron; **1.** Medición del gasto de los aspersores y **2.** Medición de lámina de agua recibida en el suelo

3.3.4.1. Medición del gasto de los aspersores

Para esta medición escogimos una sección con riego de ciclo completo es decir las válvulas siempre abiertas, luego se colocó una bolsa plástica transparente en cada uno de las boquillas de 0.60 * 0.40 m de la que se le corto una esquina para que saliera el agua en forma de chorro, después de esperar a que este estabilizara la presión, la que llegó a ser de 18 PSI, se empezó a coleccionar el agua en una cubeta de 12 litros, tomando el tiempo que demoraba en llenarse dicho recipiente, esto se lo hizo por cinco ocasiones en cada aspersor en el total de aspersores en estudio (8 salidas), Figura 38.

De los datos obtenidos se calculó el gasto por salida en l/s para las 8 salidas a una presión de 18 PSI (León, 2008).



Figura 38. Medición del gasto de las salidas del riego diferenciado.

3.3.4.2. Medición de la lámina aplicada

Se midieron distancias de 21.50 m aproximadamente, tomando como guía la rodada de la torre 4 de pivote central y se colocaron “canaletas pluviométricas” alternado su posición es decir dentro y fuera de la rodada en toda la circunferencia trazada por la huella de la torre 4.

Como canaletas pluviométricas se utilizaron mitades de tubos de plástico de 8” de \varnothing externo y 0.185 m de \varnothing interno por 2.64 m de largo ubicadas a 0.40 m de altura, esto con la finalidad de reducir el efecto de rebote de agua del suelo y el ladeo y caída de esta al momento de la aplicación de riego, siendo necesario la elaboración de fijadores de madera, capaces de sostener la canaleta y permitir el vaciado a la cubeta de colección (de 0.26 m de diámetro por 0.40 m de altura), llegando a un área de colección total de 0.5415 m^2 , el paso del equipo se muestra en la Figura 39.

Una vez instaladas las canaletas, se aplicó el riego diferenciado a la velocidad del 100% (159.44 m/h en la punta del brazo de 199.92 m) y (145.95 m/h en la última rodada donde se ubica el sistema, 183 m del brazo); para evitar el efecto de la

evaporación del agua colectada se midió lo más pronto posible después del riego en la cubeta de colección y de inmediato se cambio a la canaleta a su nueva posición.

Se instalaron en 54 sitios de muestreo a lo largo del perímetro, se tomó la posición georeferenciada del centro de la canaleta, tiempo de inicio y final, volumen de agua capturado registrándose en el formato de campo elaborado para esta evaluación.



Figura 39. Canaleta pluviométrica instalada para medición de lámina aplicada.

La instalación de la canaleta tiene que ser perpendicular a la rodada de la torre y paralela al paso del brazo del pivote con un desnivel de 3% a favor de la ubicación de la cubeta para favorecer el escurrimiento.

En el centro de la canaleta se toma la posición georeferenciada con el GPS en la opción toma de datos como media de un mínimo de 120 segundos o puntos permitiéndonos disminuir el error posicional.

Obtenidos los datos de gasto de las salidas y el tiempo que permanecieron abiertas cada una de las válvulas pudimos estimar la lámina aplicada en cada sección así como el volumen de agua total aplicado en todo el tiempo que duro el riego.

Obtenido el valor del volumen de agua que llega al suelo en cada sección se comparó con los valores de agua aplicada, estimándose la pérdida por efectos del viento y retraso o desfase de la operación de las electroválvulas por efecto de magnetismo u obstrucción de basura en la salida de las válvulas.

Finalmente teniendo el tiempo sincronizado de la hora de inicio y final de riego por la caleta con el programa de riego y sabiendo el ciclo de la sección específica se estima la lámina descargada pudiéndose comparar con la lámina colectada en las canaletas en 2 mapas comparativos. También se hace un comparativo entre el total de agua aplicada por el riego diferenciado con la suposición de un riego uniforme en todo el área definiendo así la eficiencia de riego a precisión.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Se ha dividido en tres partes el capítulo para un mejor entendimiento: **1.** Propiedades físicas del suelo, **2.** Sistema de riego diferenciado, y **3.** Evaluación del sistema.

4.1. Propiedades físicas del suelo.

4.1.1. Densidad aparente.

Obtenidos los valores de densidad aparente de cada una de las muestras georeferenciadas se aplicó un análisis con herramientas estadísticas exploratorias (Tabla 9), y se definió que solo 291 de 323 muestras se encuentran dentro del rango del mínimo y máximo (0.9091 y 1.1364 g/cm^3) del valor típico de la variable que presenta una media de 1.0254 g/cm^3 y desviación estándar de 0.0548 , con estos datos se realizó el mapa de Da del suelo con previo análisis de semivariograma y uso del método de interpolación kriging bajo un modelo gaussiano, Figura 40, muestra además el mapa de Da Figura 41.

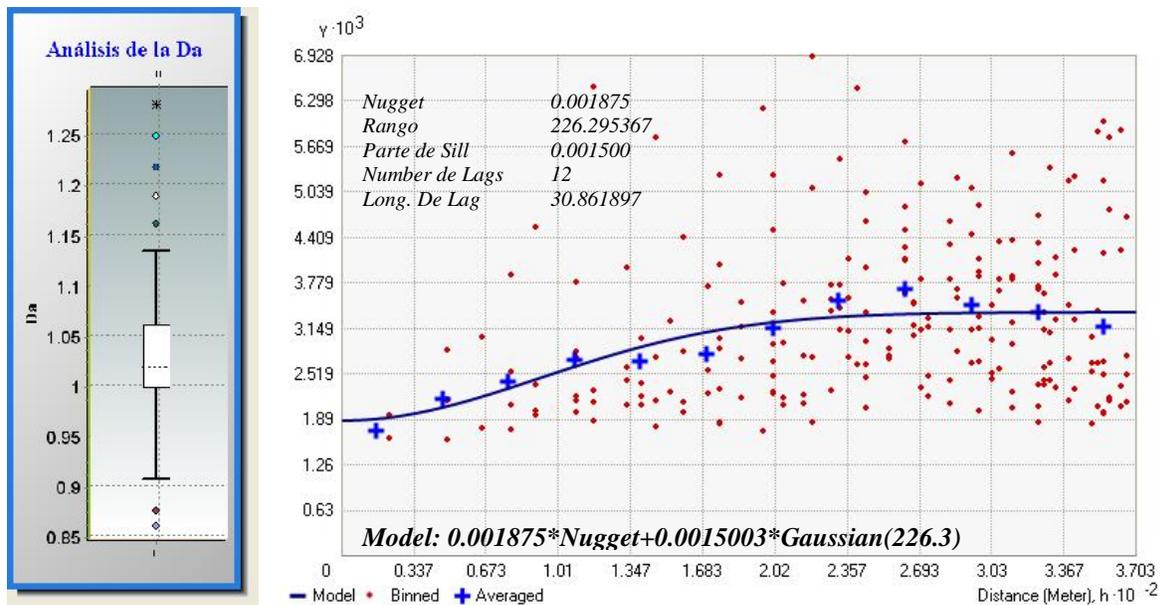


Figura 40. Diagrama de caja y semivariograma de la Da.

El modelo usado (gaussiano) predice los “datos faltantes” a partir de los medidos, además calcula los datos normalizados para cada dato medido, permitiendo estimar la

ecuación de regresión $Y=0.463778 X + 0.54932$, (donde, Y es el valor estimado, y X el valor medido), el valor de correlación $R^2= 0.9436$ considerándose aceptable para el modelo propuesto.

Tabla 9. Parámetros descriptivos de la Da.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Numero de datos	291	Desviación estándar	0.0548	Regresión	$0.463778 x + 0.54932$
Valor Mínimo	0.9091	Skewness (asimetría)	0.1373	R^2	0.9436
Valor Máximo	1.1364	Kurtosis	2.5173	Mediana	1.0204
Valor Medio	1.0254	1 ^{er} cuartíl	1.00	3 ^{er} cuartíl	1.0638

Fuente: Análisis de datos de Da

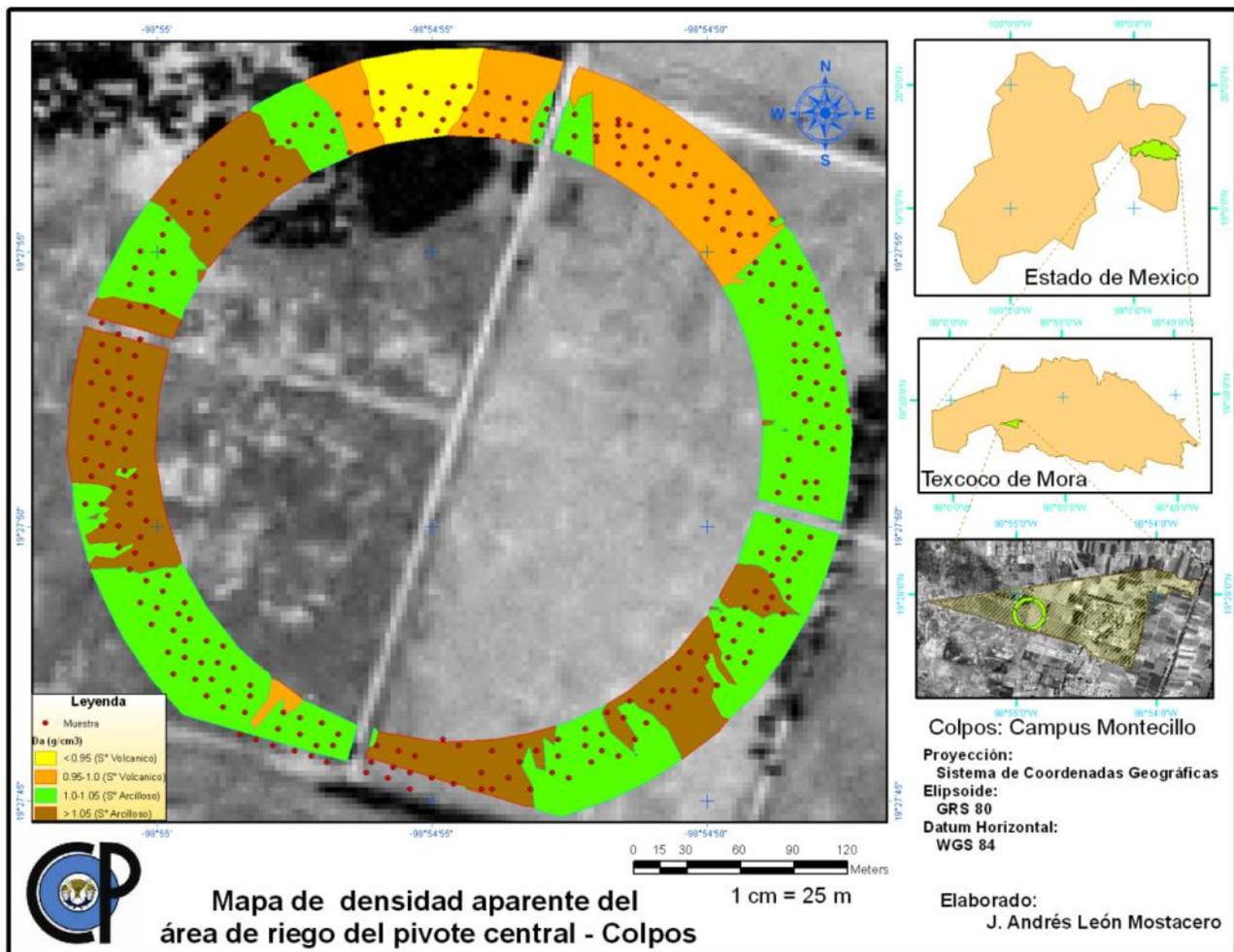


Figura 41. Mapa de densidad aparente

De este mapa y su análisis espacial se puede definir el suelo como especial, es muy liviano y tiene densidades inferiores a 1 g/cm^3 , típico de suelos orgánicos o volcánicos (SEMARNAT, 2002), sin embargo, hablamos de un suelo formado por la sedimentación de un lago salino.

El uso del mapa de Da con fines de riego requiere de su validación y comprobación, ya que es una variable física de fácil medición y que está afectada por variables como la composición mineral (textura) y materia orgánica contenida en el suelo.

4.1.2. pH

Los valores de pH con un análisis de herramientas estadísticas descriptivas (Tabla 10), se encontró que los datos de las 323 muestras estaban incluidas dentro del rango mínimo y máximo (8.31 y 11.01), del valor típico de la variable de media 9.8986 y desviación estándar de 0.66651, el modelo se puede ver en la Figura 42, que define el mapa de pH bajo el método ordinario de interpolación Kriging con el modelo gaussiano que presenta su ecuación de regresión $Y=0.72636 X + 1.65351$, (donde, Y es el valor estimado, y X el valor medido), el valor de correlación $R^2= 0.8794$ es considerándose aceptable para el modelo, para el caso especial del suelo trabajado también se tiene valores de pH preocupantes ya que el valor mínimo encontrado en todo el muestreo es de 8.31 y valor máximo de hasta 11.01 lo que nos muestra áreas definitivamente no aptas para el crecimiento y desarrollo de ninguna especie vegetal de aprovechamiento alimenticio.

Tabla 10. Parámetros descriptivos del pH

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Numero de datos	323	Desviación estándar	0.6665	Regresión	$0.729636 x + 1.65351$
Valor Mínimo	8.31	Skewness (asimetría)	-0.4037	R^2	0.8794
Valor Máximo	11.01	Kurtosis	2.1266	Mediana	10.01
Valor Medio	9.8986	1 ^{er} cuartíl	9.3625	3 ^{er} cuartíl	10.46

Fuente: Análisis de datos de pH

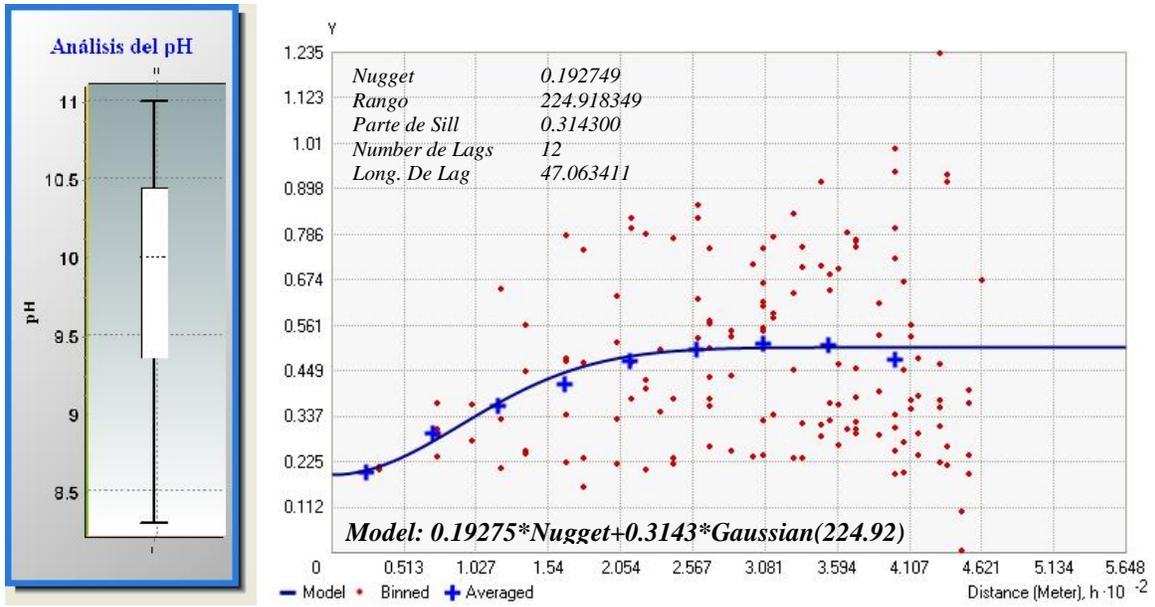


Figura 42. Diagrama caja y semivariograma del pH

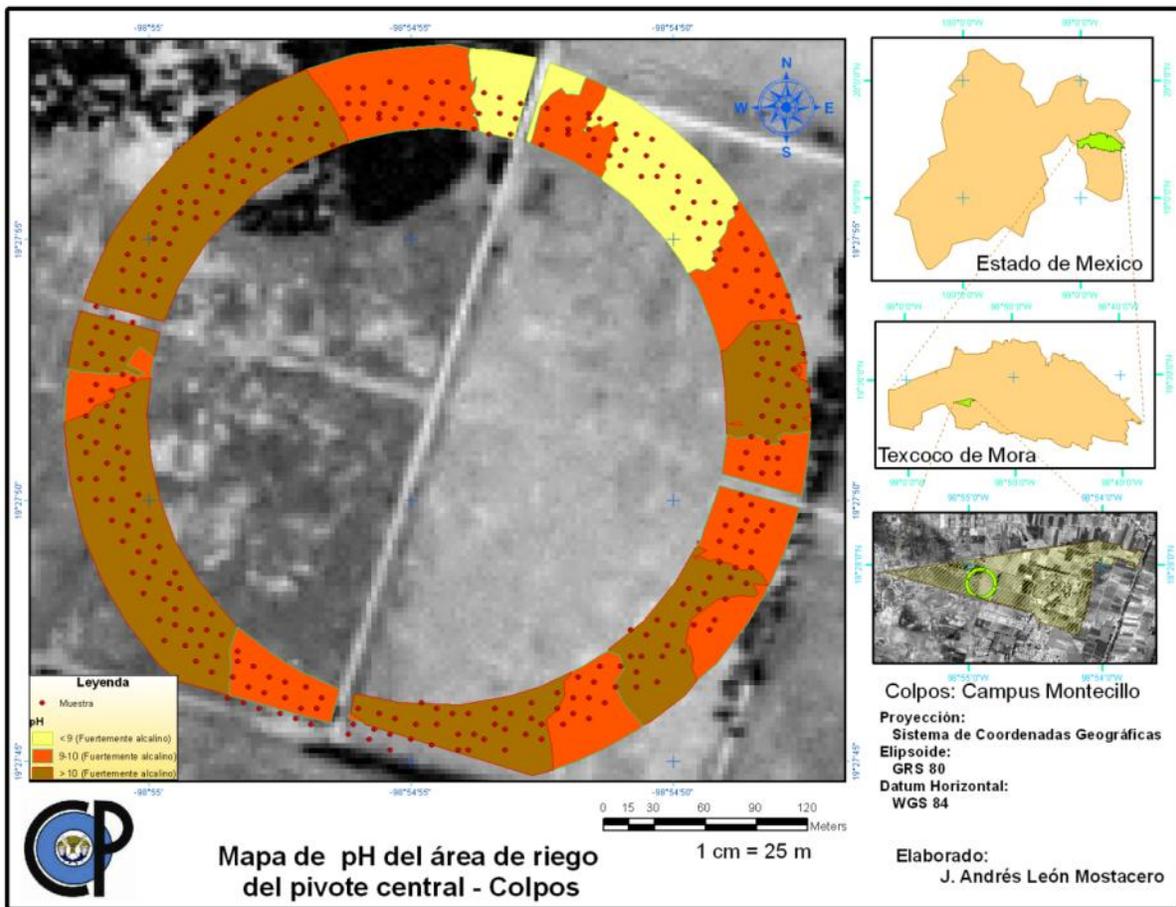


Figura 43. Mapa de pH

La Figura 43 muestra los valores de pH muy altos, sobre 8, indicándonos un suelo entre alcalino y fuertemente alcalino (Yagodin, et al., 1982), que evita el crecimiento de cualquier especie aparentando sequedad y necrosis en la margen de las hojas, debido al pH extremo también se tendrá siempre deficiencia de nutrientes (Instituto de la Potasa y el Fósforo (INPOFOS), 1996)

La utilización de la variabilidad de pH en un suelo es una alternativa para la aplicación diferenciada de agua sobre todo si se trata de hacer tratamientos que disminuyan la concentración de sales por medio de lavado de suelos. Debemos recordar también que fueron los mapas de variabilidad espacial de la acidez del suelo los primeros que se elaboraron para corregir el pH en un enfoque de Agricultura de precisión para el manejo diferenciado de áreas por los investigadores de la Estación Experimental Agrícola de la Universidad de Illinois Linsley y Bauer en el año 1929, citado por (Elias & Camargo, 1999)

4.1.3. Conductividad eléctrica

Del análisis exploratorio (Tabla 11) y la elaboración del semivariograma Figura 44, se encontró que 317 datos se encuentran dentro del rango mínimo y máximo (0.494 y 12.26 mmhos/cm) del valor típico de la variable de media 4.216 mmhos/cm con desviación estándar de 2.9023, de estos se elaboró el mapa de conductividad Figura 45, que si bien se trata de un parámetro que no afecta directamente al crecimiento y rendimiento de los cultivos, la C.E. proviene de las relaciones con otras propiedades íntimamente asociadas con la productividad de una cosecha, estas son capacidad para almacenar agua, profundidad del suelo, capacidad de intercambio catiónico, drenaje del suelo, nivel de materia orgánica, niveles de nutrientes, salinidad y características del subsuelo (Doerge T., 1999).

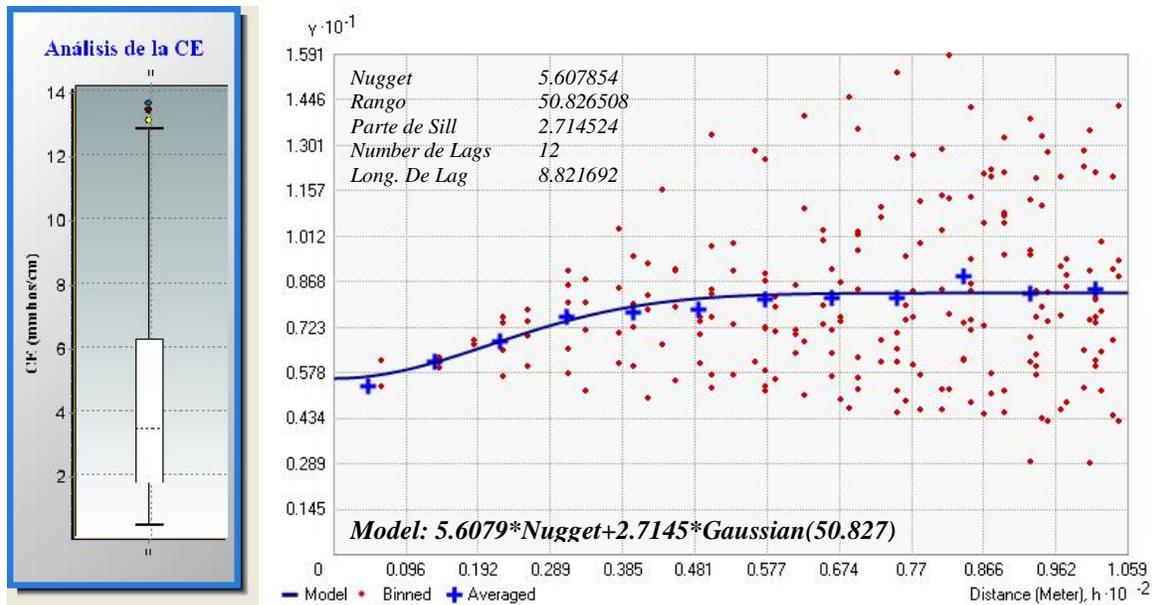


Figura 44. Diagrama de caja y semivariograma de la CE

Tabla 11. Parámetros descriptivos del CE.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Numero de datos	317	Desviación estándar	2.9023	Regresión	$0.299251 x + 2.771682$
Valor Mínimo	0.494	Skewness (asimetría)	0.78378	R ²	0.9964
Valor Máximo	12.16	Kurtosis	2.6311	Mediana	3.508
Valor Medio	4.216	1 ^{er} cuartíl	1.8308	3 ^{er} cuartíl	6.0525

Fuente: Análisis de datos de CE.

La CE es uno de los parámetros que hasta hoy es el más usado con fines de riego diferenciado básicamente por su facilidad de obtención con instrumentos de inducción electromagnética, que no destruyen las muestras y lo hacen muy rápidamente, llegando a obtenerse en poco tiempo un gran volumen de datos.

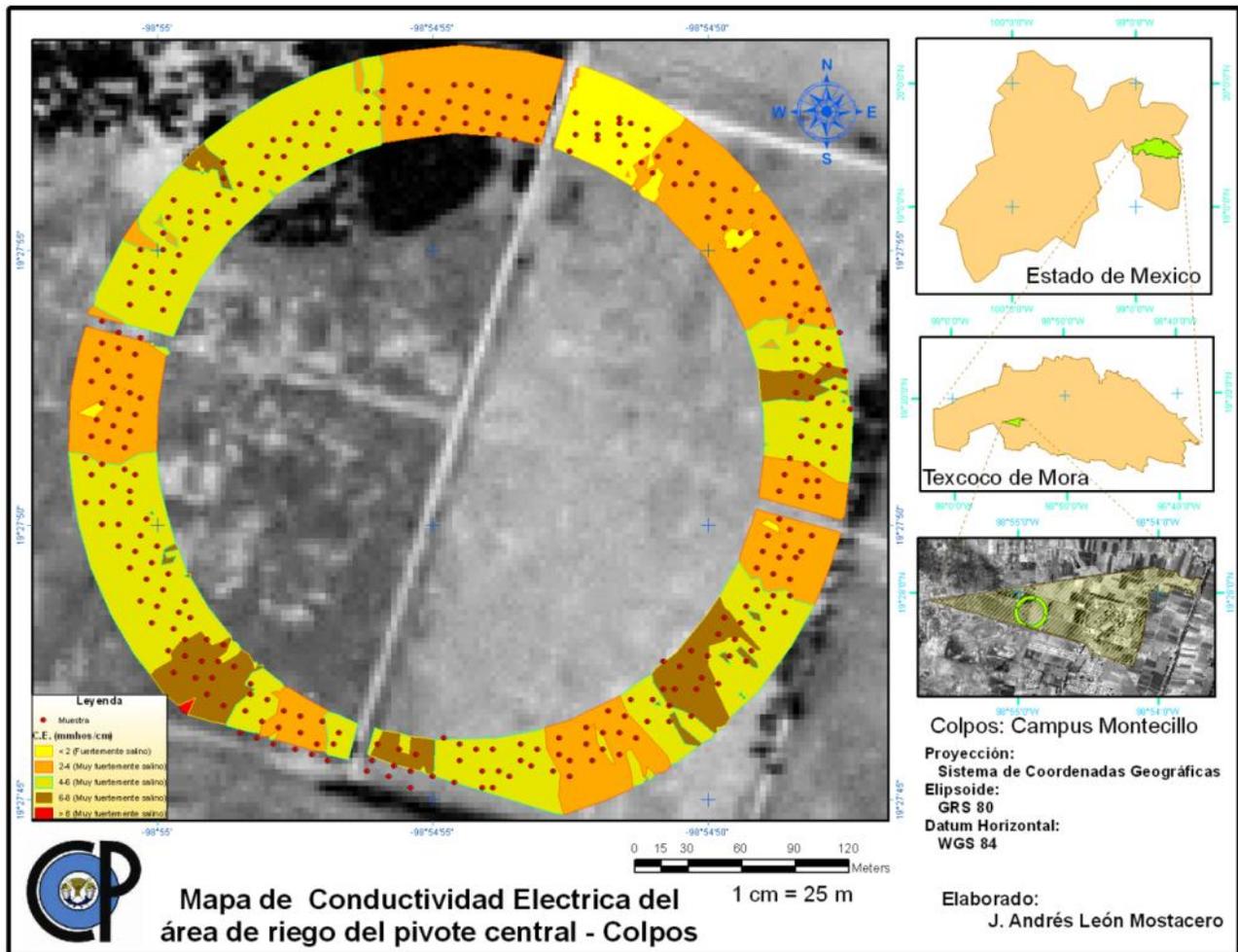


Figura 45. Mapa de Conductividad eléctrica

Como indica el mapa (Figura 45), se presenta valores de 4 mmhos/cm medido en una solución 1:2 (v:v) suelo: agua, que define un suelo fuertemente salino (Dellavalle, 1992), además se considera que suelos con C.E. 2 mmhos/cm ó más y pH mayores a 8.5 hacen que el crecimiento y desarrollo de plantas no sean remunerativos o que determinan las posibilidades de remoción de sus sales o sodio intercambiable, mediante prácticas correctivas (Martínez, et al., 2011)

4.1.4. Materia orgánica

Las muestras para materia orgánica resultaron ser 310 de acuerdo al análisis estadístico descriptivo (Tabla 12), y se ubican en el rango mínimo y máximo (0.47976

y 4.3536%) con valor medio de 2.3274 % de la variable MO y una desviación estándar de 0.73562, en la Figura 46 se muestra el modelo gaussiano bajo la metodología kriging ordinario que permite la elaboración del mapa de materia orgánica, la Figura 47, presenta valores máximos siempre menores a 4% y comúnmente menor a 3% definiendo un suelo con bajo a medio contenido de MO, como era de esperar, en suelo con tan altas concentraciones de sales se hace importante la aplicación de MO, ya que en su descomposición por microorganismos liberan CO₂ que al combinarse con el agua forman ácido carbónico haciendo solubles las sales de calcio precipitadas en el suelo (Paul, 1989), mencionado por (Serrato, et al., 2002).

Tabla 12. Parámetros descriptivos de la MO.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Numero de datos	310	Desviación estándar	0.73562	Regresión	0.420125 x + 1.283521
Valor Mínimo	0.4798	Skewness (asimetría)	0.32818	R ²	0.9920
Valor Máximo	4.3536	Kurtosis	2.9919	Mediana	2.239
Valor Medio	2.3274	1 ^{er} cuartíl	1.7871	3 ^{er} cuartíl	2.8609

Fuente: Análisis de datos de MO.

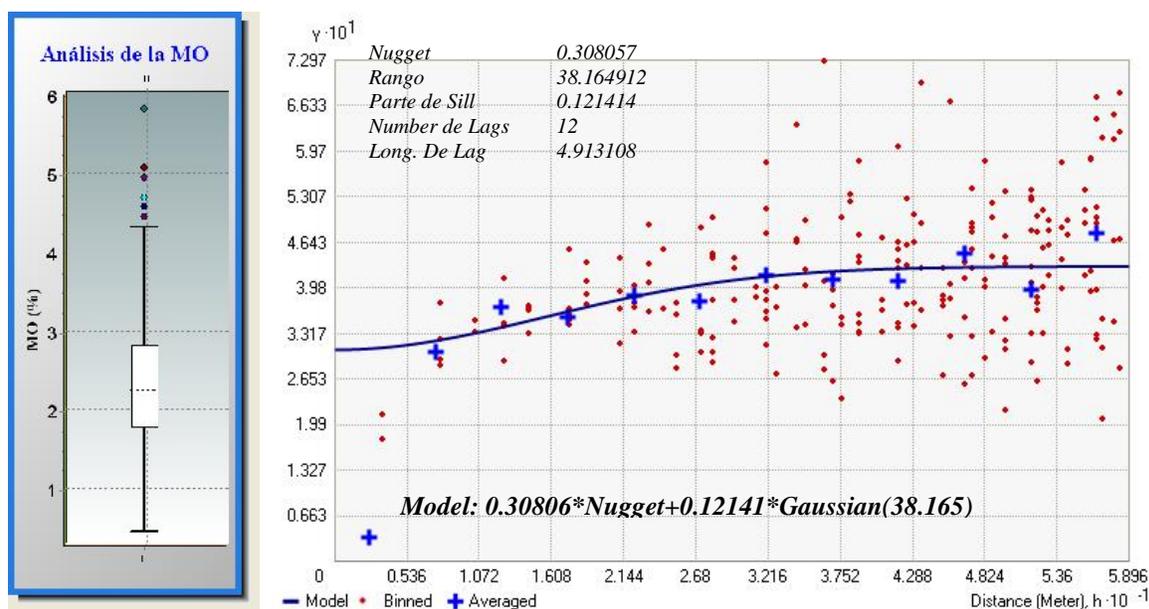


Figura 46. Diagrama de caja y semivariograma de la MO

Aplicación de agua con tasa variable en función a materia orgánica es posible que no sea muy relacionable actualmente, sin embargo, si es muy interesante cuando se hace o se haga fertirrigación diferenciada.

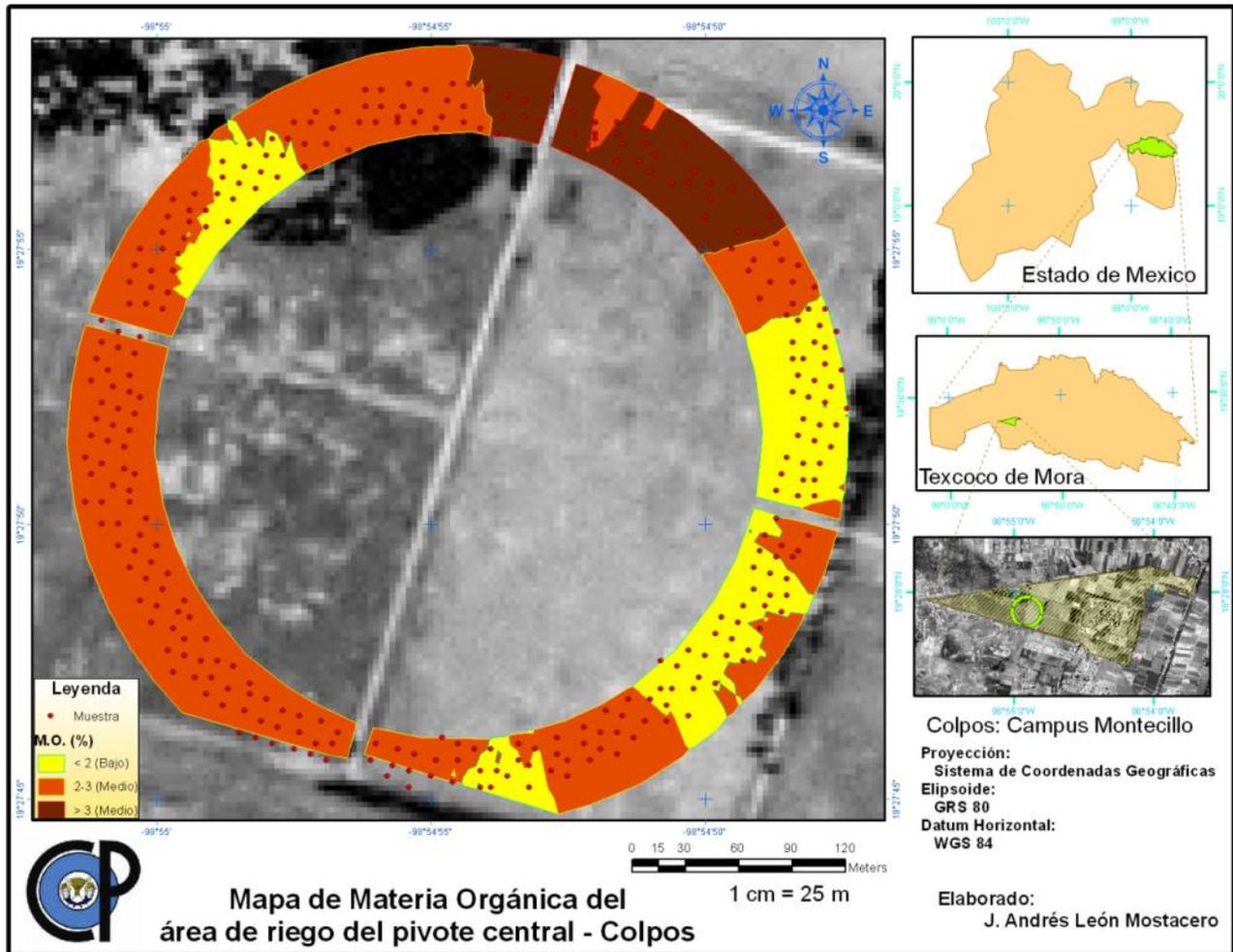


Figura 47. Mapa de Materia orgánica

De los cuatro mapas anteriores: Da, pH, CE y MO se puede ver que en la zona norte del área de riego del pivote central se tiene valores de las variables físicas mas “normales” por la incorporación permanente de estiércol de bovino que se viene haciendo en los últimos cinco años y la instalación anual de cultivos para fines experimentales.

4.1.5. Capacidad de Campo

Obtenidos los valores de materia orgánica y textura de cada una de las muestras se estimo el valor de la capacidad de campo, con el uso de las ecuaciones propuestas por (Saxton & Rawls, 2006), definiéndose con herramientas estadísticas descriptivas (Tabla 13), que 318 muestras estaban incluidas en el rango (11.589 y 33.094%), de valores típicos de la variable con media de 22.833% y desviación estándar de 4.3507, la Figura 48 y de las cuales por interpolación se obtuvo el mapa de capacidad de campo o máxima capacidad de retención de humedad, Figura 49, una vez más se puede ver que en la parte de suelo donde se tiene incorporación de materia orgánica se presentan los valores más altos de capacidad de campo coincidente por lo encontrado por (Nuñez, et al., 2011) que manifiesta que la aplicación de MO incrementa la porosidad total y trae consigo un aumento en la capacidad de campo.

Un mapa de variabilidad de capacidad máxima de almacenamiento de agua o capacidad de campo del suelo resulta imprescindible para definir la lamina máxima aplicar en cada riego, puesto que de forma teórica no se debería aplicar más agua que la que pueda almacenar el suelo.

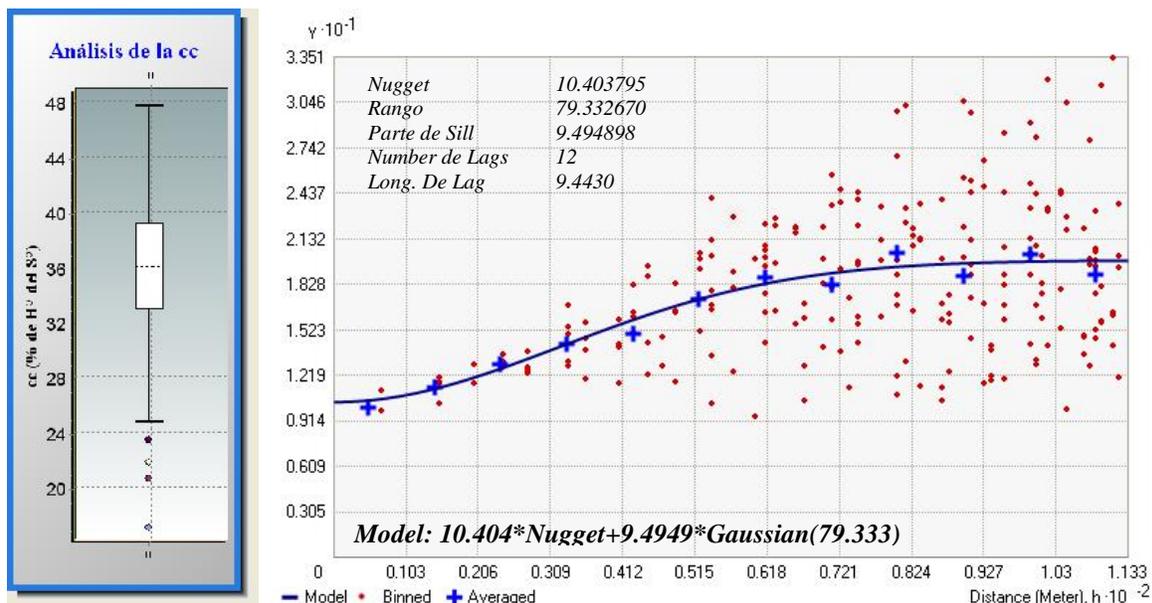


Figura 48. Diagrama de caja y semivariograma de la CC

Tabla 13. Parámetros descriptivos de la CC.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Numero de datos	318	Desviación estándar	4.5266	Regresión	$0.519102 x + 17.39305$
Valor Mínimo	24.943	Skewness (asimetría)	-0.2014	R ²	0.9889
Valor Máximo	47.882	Kurtosis	2.5669	Mediana	36.557
Valor Medio	36.272	1 ^{er} cuartíl	33.218	3 ^{er} cuartíl	39.557

Fuente: Análisis de datos de CC.

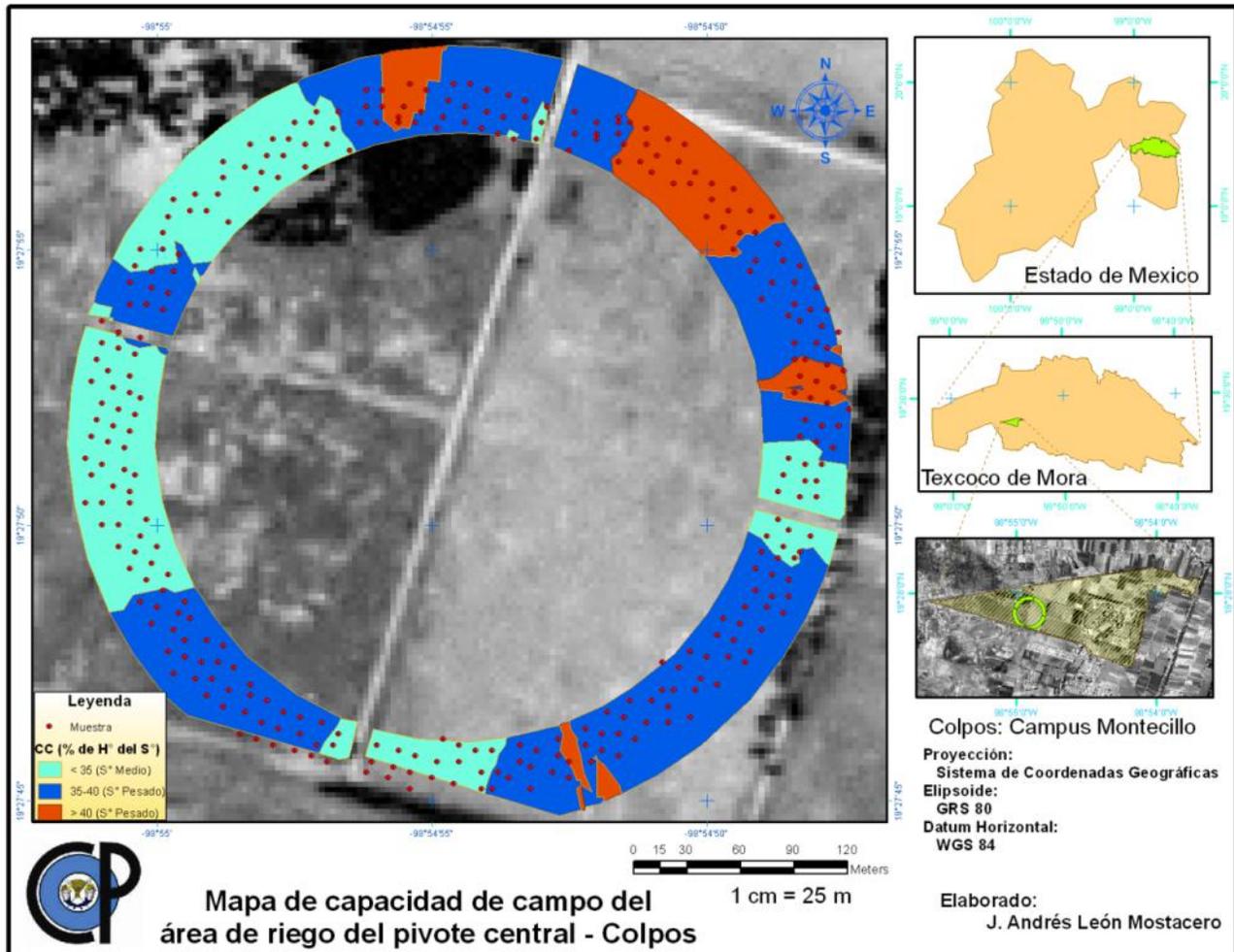


Figura 49. Mapa de capacidad de campo

4.1.6. Punto de marchitez permanente

Con los valores de textura y materia orgánica también se hace la estimación de valores de punto de marchitez permanente, con ecuaciones propuestas por (Saxton & Rawls,

2006), que para este caso resultaron 320 muestras de acuerdo al análisis descriptivo (Tabla 14), que se ubican dentro del rango típico (11.589 y 33.094%) con una media de 22.833% y su desviación estándar de 4.3507.

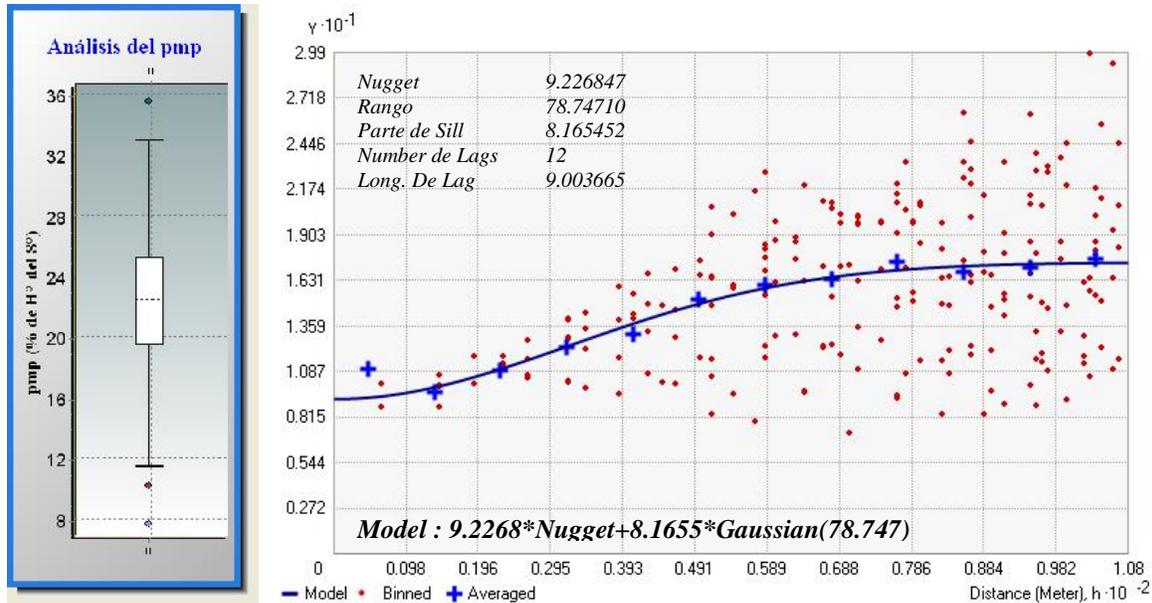


Figura 50. Diagrama de caja y semivariograma del PMP

Figura 50 indica los valores del modelo gaussiano bajo un análisis de kriging ordinario que en un estimación de la relación entre los datos medidos y los estimados se encontró la ecuación de regresión $Y = 0.52549 X + 10.776183$ (donde Y es el valor estimado y X es el valor medido) y la correlación de $R^2 = 0.9768$, considerándose el modelo gaussiano como aceptable. Seguido de este análisis se obtuvo el mapa del punto de marchitez permanente Figura 51, el misma que resulto presentar mayor variabilidad que la capacidad de campo atribuido a la variación de acumulación de sales en el área de riego del pivote.

Tabla 14. Parámetros descriptivos del PMP.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Numero de datos	320	Desviación estándar	4.3507	Regresión	0.52549 x + 10.776183
Valor Mínimo	11.589	Skewness (asimetría)	-0.0078	R ²	0.9768
Valor Máximo	33.094	Kurtosis	2.5469	Mediana	22.632
Valor Medio	22.833	1 ^{er} cuartíl	19.655	3 ^{er} cuartíl	25.425

Fuente: Análisis de datos del PMP.

La cantidad de agua contenida en el suelo que no puede ser extraída por la gran mayoría de plantas resulta un buen indicador teórico junto a la capacidad de campo, para estimar el volumen de agua “total” que es capaz de almacenar el suelo

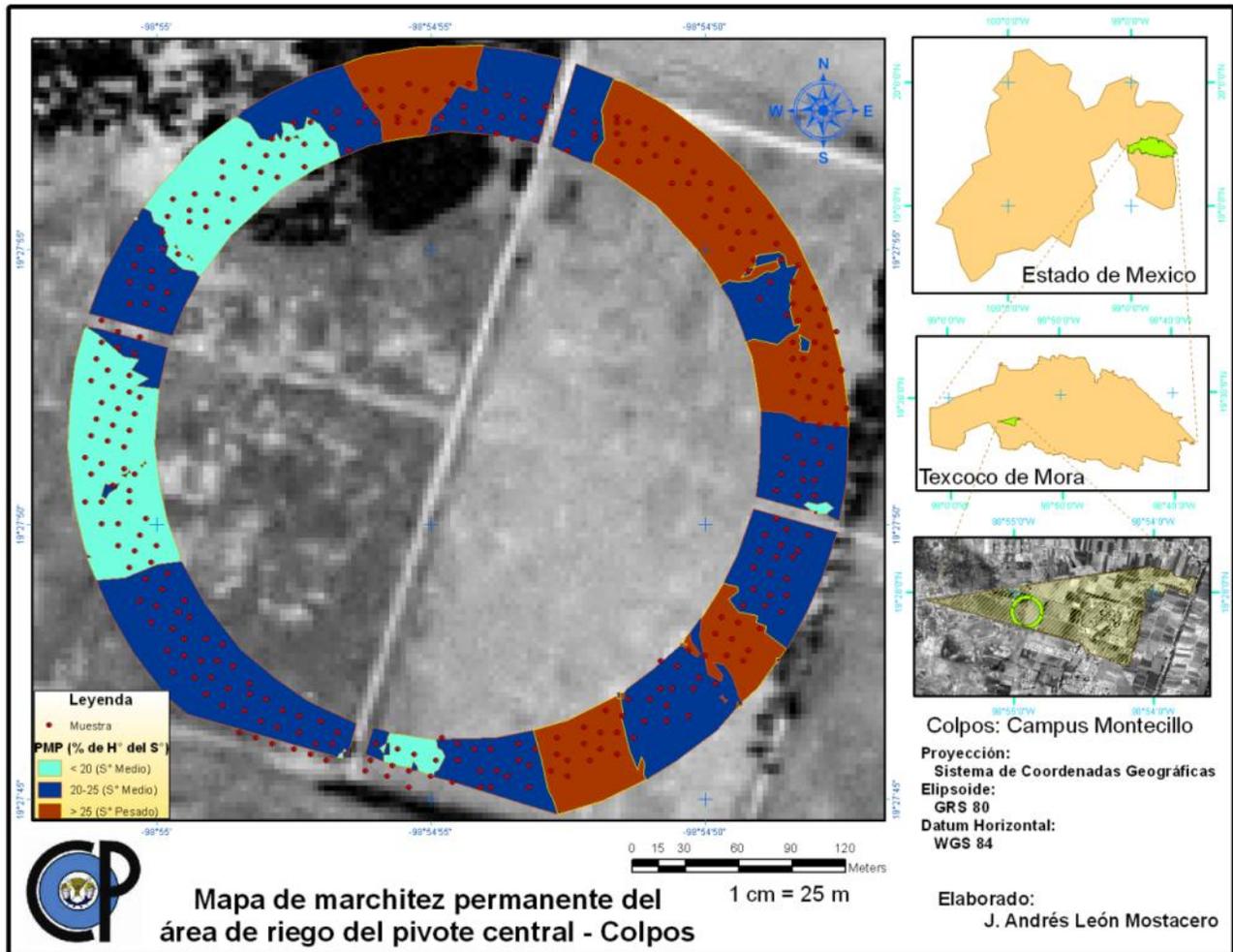


Figura 51. Mapa de marchitez permanente

De los seis mapas elaborados fue el de conductividad eléctrica el escogido para operar el programa de riego, esto por considerar a la CE una herramienta sencilla, económica, rápida y precisa que los agricultores de precisión pueden usar para caracterizar diferencias del suelo en sus campos de producción agrícola, además por ser una variable que se toman en cuadrículas igualmente espaciadas de acuerdo al tipo de cultivo, la topografía y las condiciones logísticas. La CE además correlaciona con propiedades de productividad de las cosechas como: textura, CIC, drenaje, MO, salinidad, y características del subsuelo; también puede asociarse con propiedades

específicas (previa verificación de campo) como espesor de capa de suelo, pH, concentración de sales, y capacidad para almacenar agua.

Los mapas de CE por lo general corresponden visualmente con patrones de rendimiento de la cosecha y pueden ayudar a explicar variaciones, pueden correlacionarse con rendimiento, altura, población vegetal, hidrología de superficie, o datos obtenidos de sensores remotos con un sistema de información geográfica.

Finalmente la CE sirve en orientación de muestreo específico de suelos, asignación de tasas variables para insumos de cosecha, zonificación más detallada de mapas regionales de suelos, mejoramiento en la ubicación e interpretación de ensayos de campo en la finca, diagnóstico de salinidad, y planeación de drenaje de remediación (Doerge T., 1999).

Una visualización del mapa de CC sobre el de PMP es lo mostrado en la Figura 52, indicándonos la amplitud entre valores de las muestras georeferenciadas que va de 9.43 a 16.17% con una media de 13.25%, que es la capacidad máxima de retención de agua que es capaz de almacenar e intercambiar el suelo.

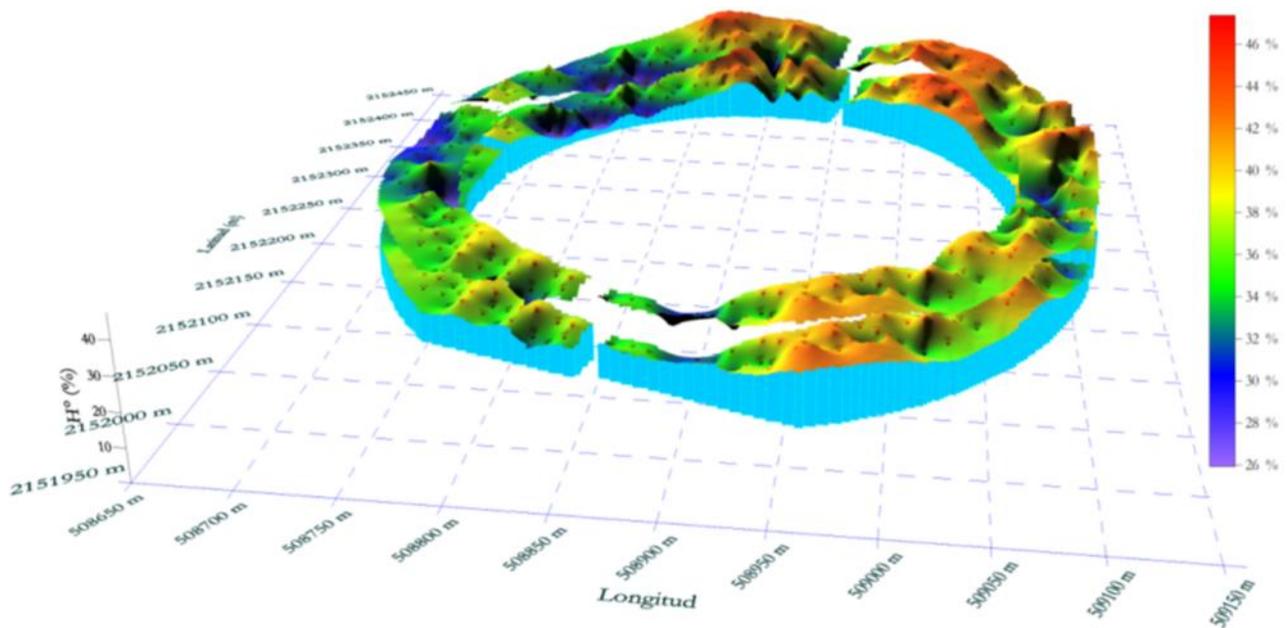


Figura 52. Mapas de CC y PMP en el área de riego del pivote central del COLPOS (Proyección UTM Zona 14 N)

4.2. Operación del sistema de riego a precisión.

Construido e instalado todos los componentes de hardware, se presenta el software con las diferentes pantallas graficas que se describe a continuación Figura 53.

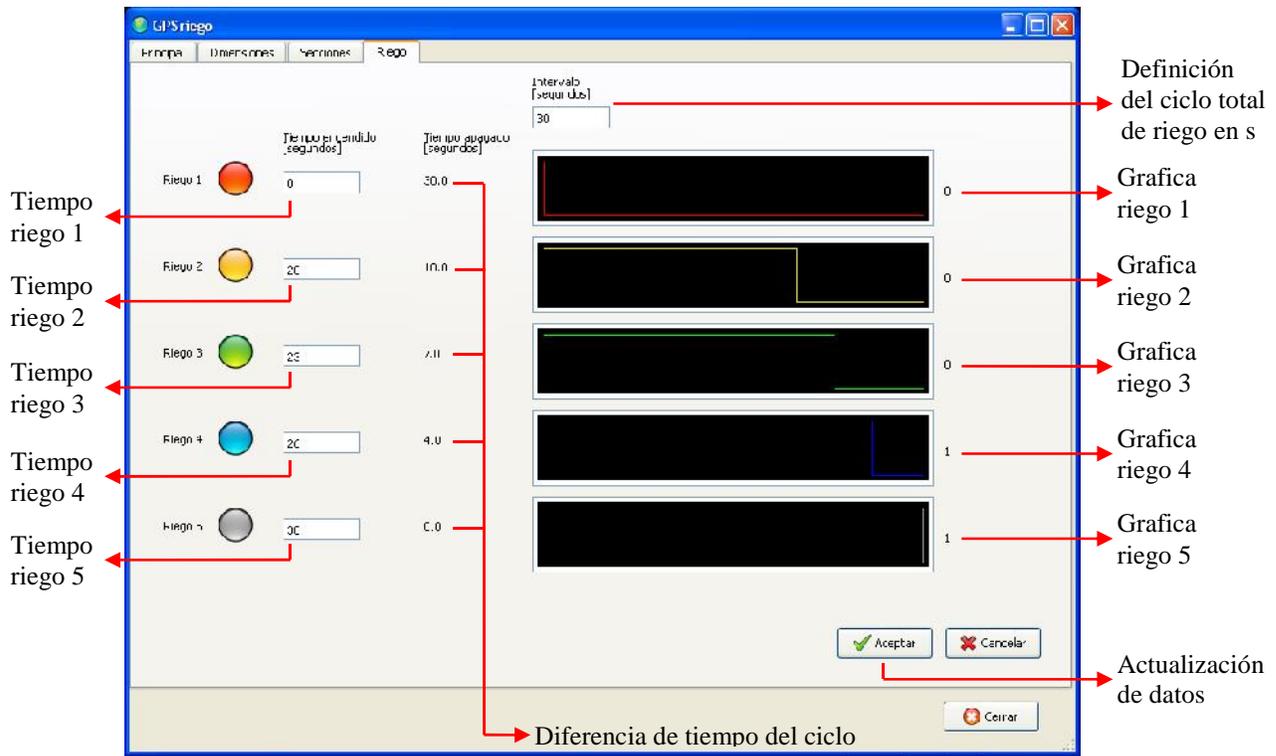


Figura 53. Pantalla 4 o pantalla de riego

La “pantalla de riego” nos permite especificar el tiempo total del ciclo de riego (recuadro intervalo), definido en segundos y estará en función de la velocidad del equipo y el criterio del operador, recomendándose tiempos de 30, 60 ó 120 segundos. Teniendo el total del ciclo se especifica la duración de apertura de cada uno de los 5 tipos de riego siendo generalmente el Riego 1 (color rojo) de cierre total o sin riego y el riego 5 (color gris) de apertura total o siempre riego quedando el riego 2, 3 y 4 para especificar la cantidad de segundos que resulte de la necesidad de lamina requerida para las diferentes zonas, el programa calcula la duración del tiempo cerrado que permanecerá las válvulas en cada uno de los tipos de riego. Además se tiene una representación grafica de los riegos donde se estará moviendo la línea que especifica la variación del tiempo y su recorrido estará en función al tiempo del ciclo

especificado y la cantidad de segundos que se considere abierta la válvula, esta línea nos indica también la acción exacta que efectuara el equipo cuando coincida con cada línea del tipo de riego y sirve además como un primer control de acción de cada válvula. Como segunda acción especificamos las secciones de riego y tipo de riego en la pantalla 2 o pantalla de secciones, Figura 54.

Sección	Grados	Latitud	Longitud	Válvula 1	Válvula 2	Válvula 3	Válvula 4	Válvula 5	Válvula 6	Válvula 7	Válvula B
1	5	19.46253259E	-98.9146115768	4	4	4	4	4	4	4	4
2	1	19.4633169768	-98.9134324232	4	4	4	4	4	4	4	4
3	4	19.4633557712	-98.9135685C17	5	5	5	5	5	5	5	5
4	1	19.4625010171	-98.9130902CG	5	4	4	4	5	5	5	5
5	h	19.4625270242	-98.9135685C17	4	4	4	4	4	4	4	4
6	0	19.4633952CG	-98.91439471D	0	0	0	0	0	4	4	4
7	15	19.46253259E	-98.9146115768	4	4	4	4	4	4	4	4
8	2	19.46318231E	-98.9137718E33	3	3	3	3	2	2	2	2
9	1	19.46432057C4	-98.9134413C66	2	2	2	2	3	3	3	3
10	18	19.46339493E6	-98.9136188574	3	3	3	3	3	3	3	3
11	14	19.46552891E	-98.9140021246	2	2	2	2	2	2	2	2
12	2	19.4647464141	-98.9157919178	1	1	1	1	1	1	1	1
13	29	19.46539188C9	-98.9135512355	3	3	3	3	3	3	3	3
14	2	19.46538986E2	-98.9154694284	4	4	4	3	3	3	3	3
15	2	19.462512357	-98.913525951G	4	4	0	0	0	0	0	0
16	??	19.4653992942	-98.9147009C81	4	4	4	4	4	4	4	4

Figura 54. Pantalla 3 o pantalla de secciones

La pantalla 3 nos permite especificar el ángulo donde hay una nueva sección iniciando en el 0° de un eje de coordenadas que toma como centro las coordenadas del punto de pivoteo del equipo, el valor de la sección tiene que ser en grados con los decimales que se crea conveniente, sin embargo, por la precisión del GPS es aconsejable usar grados enteros. El número de sección se toma por default y no es posible cambiarse pero si modificar su orden insertando o borrando secciones cada sección debe tener su cantidad de grados de acuerdo al mapa elaborado por interpolación de una variable física del suelo, que en nuestro caso será la conductividad eléctrica, los valores del ángulo son acumulativos y no debe exceder los 360° sino borrar las secciones fuera

de este rango. Especificado el ángulo de la sección definida es necesario colocar el número de riego que se va dar en esa sección (para nuestro caso son 5 tipos) y para cada válvula, finalmente actualizamos la pantalla y el programa estima las coordenadas (latitud y longitud) de cada uno de los ángulos considerados para las secciones que son los que comparara con los datos tomados por el GPS. Seguido especificamos las dimensiones y algunos datos en la pantalla 2.

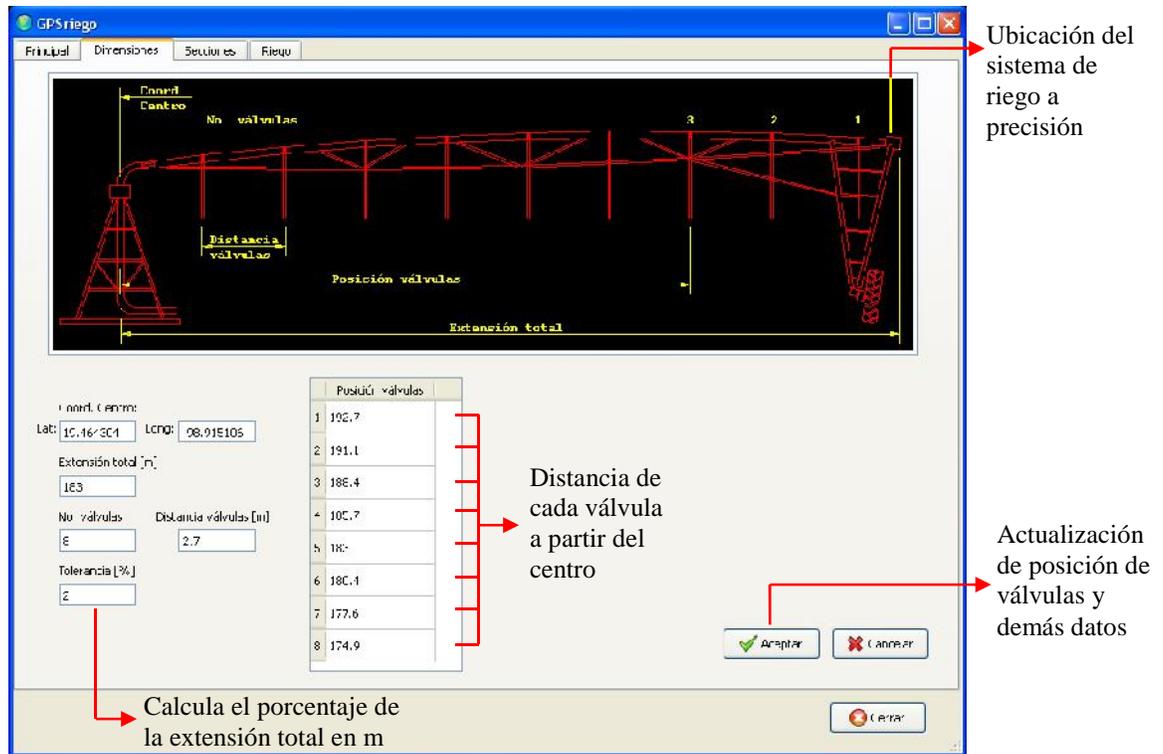


Figura 55. Pantalla 2 o pantalla de dimensiones

La pantalla 2 nos permite especificar datos para referencia de otros, es así que iniciamos especificando el punto exacto de pivoteo, para el cual debemos ser lo más preciso posible y comparamos el promedio de datos de varios GPSs “comunes” o si es posible el uso de un GPS de precisión, de este valor se hace el cálculo para todos y cada uno de los valores de la secciones del programa de riego. Seguido debemos introducir la longitud “exacta” en m desde el punto de pivoteo hasta la ubicación del sistema se puede considerar los decimales que se estime. Luego introducir el número de válvulas, que para nuestro caso son 8, pero en un sistema completo se colocaran el

total de válvulas del pivote y esto proporcionara los recuadros para igual número de válvulas en la pantalla de secciones. Especificamos la distancia que existe entre válvulas con lo que el programa nos crea la tabla de posición de válvulas en forma automática tomando como la primera posición la distancia de ubicación del sistema y de esta empieza a descontar la distancia entre válvulas hasta completar el numero de válvulas, sin embargo, los valores de la tabla también se pueden especificar en forma manual manteniéndose el valor aunque se actualice la tabla. Finalmente es necesario especificar el valor de tolerancia de posicionamiento del GPS, el cual crea una área de cada sección definido por la longitud de la sección y el ancho en m obtenido de la transformación del porcentaje multiplicado por la longitud del equipo, simulando la formación de un área circular que permite depurar todos los valores del GPS que no estén comprendidos dentro de esta, sirviendo así para la corrección de “valores extremos” tomados por el GPS; de acuerdo a la extensión en nuestro caso 1% representa 1.83 m cada lado de la ubicación del sistema usándose valores que van de 2 a 5% de acuerdo al modelo de GPS usado que asegura una precisión de 3 m cuando recibe datos de estaciones terrestres para su corrección (LOCOSYS Technology Inc., 2006).

La pantalla 1 o principal inicia solicitando la especificación del puerto de comunicaciones con la computadora, junto a esta también se activa una barra grafica que se actualiza a medida que se recibe una nueva posición del GPS (cada 1 segundo), la tabla de datos va registrando y publicando en esta pantalla hasta 26 datos de numero correlativo de la posición, latitud y longitud en grados decimales y la sección donde se ubica dicha coordenada, en caso que el GPS tenga interferencias para tomar el dato o el punto se tome fuera del rango de tolerancia aparecerá los avisos de “adquiriendo señal” o “sin señal”.

La pantalla principal también muestra en forma grafica la extensión de todas las secciones y el tipo de riego que se está aplicando de acuerdo a los colores establecidos en la pantalla de riego, en esta área también se aprecia la posición exacta del GPS y su ubicación dentro del límite de tolerancia graficado con círculos de color celeste, por

otro lado se parecía el área de riego que alcanza a cubrir cada una de las válvulas. En la parte inferior se cuenta con una barra numérica que muestra el funcionamiento individual de las válvulas en operación, siendo “1” cuando está abierta y “0” cuando está cerrada. Se tiene las opciones de inicio de funcionamiento del programa y el de detener los cuales son dependientes es decir cuando uno está “activado” el otro se encuentra ejecutando su función y en forma “inactiva”.

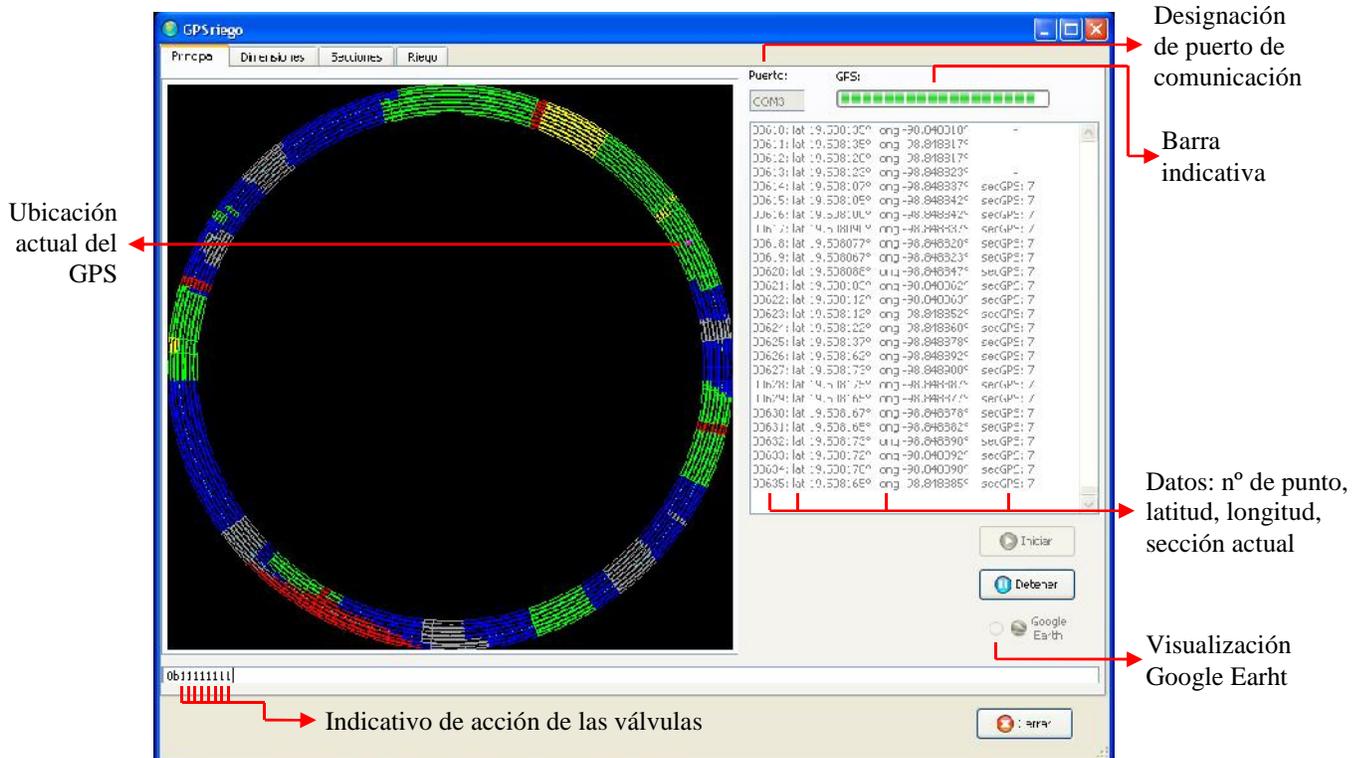


Figura 56. Pantalla 1 o pantalla principal

Finalmente la pantalla principal Figura 56, dispone de la opción de visualización en Google Earht, que al activar el botón abre el programa y exporta tres archivos gráficos temporales de extensión .kml, estos son a) el mapa de secciones de cada tipo de riego, b) área de tolerancia de posición del GPS y c) ubicación del GPS en tiempo real, este ultimo actualiza su posición a medida que se tiene una nueva ubicación (en promedio 2 segundos), provocando que la pantalla de Google Earth siempre este sobre todos los programas que esté trabajando conforme se muestra en la Figura 57.

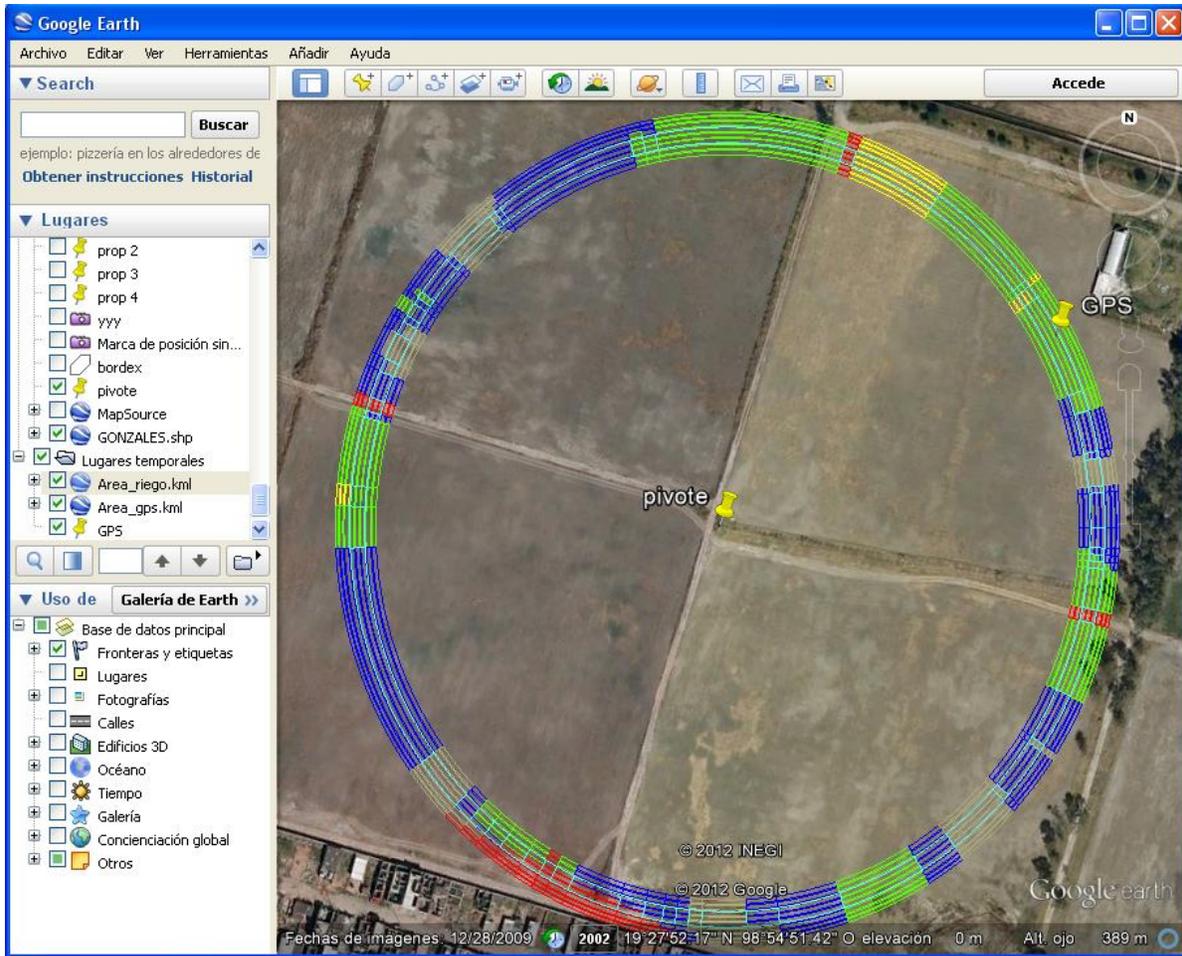


Figura 57. Presentación del riego en Google Earth

4.3. Evaluación del Sistema de riego a precisión.

Realizado el riego el programa imprime los datos en un archivo de texto con el nombre que reúne el “año mes y día” del riego, en este se contiene la hora del inicio de riego, seguido de una lista con la hora exacta del momento de riego, un valor correlativo del dato, latitud y longitud en grados decimales y la sección en la que regó, se crean tantas líneas como dure el riego a intervalos que van entre 1 a 5 segundos dependiendo de la capacidad con que se registre la actualización. Terminada la sesión de riego se hace una acumulación del tiempo que estuvo cada válvula abierta y finaliza la sesión considerando la hora de término de riego, esto se muestra en la Figura 58, este archivo se actualiza cada vez que se termine el riego y se cierre el programa, se crearan archivos

Con el tiempo total del riego (29 842 s) y conociendo el gasto se estima el volumen total aplicado asumiendo apertura totalmente abierta siempre. Esta la comparamos con el volumen aplicado en el riego diferenciado multiplicando el tiempo que permaneció cada válvula abierta con el gasto respectivo. Para nuestro caso utilizamos 5 diferentes ciclos de riego con una duración total de ciclo de 30 s, **Riego 1**, siempre cerrada; **Riego 2**, 20 s abierta 10 s cerrada; **Riego 3**, 23 s abierta 7 s cerrada; **Riego 4**, 26 s abierta 4 s cerrada; **Riego 5**, siempre abierta, la Figura 60 nos muestra la comparación del volumen de agua aplicado total en el sistema de riego diferenciado y el riego uniforme.

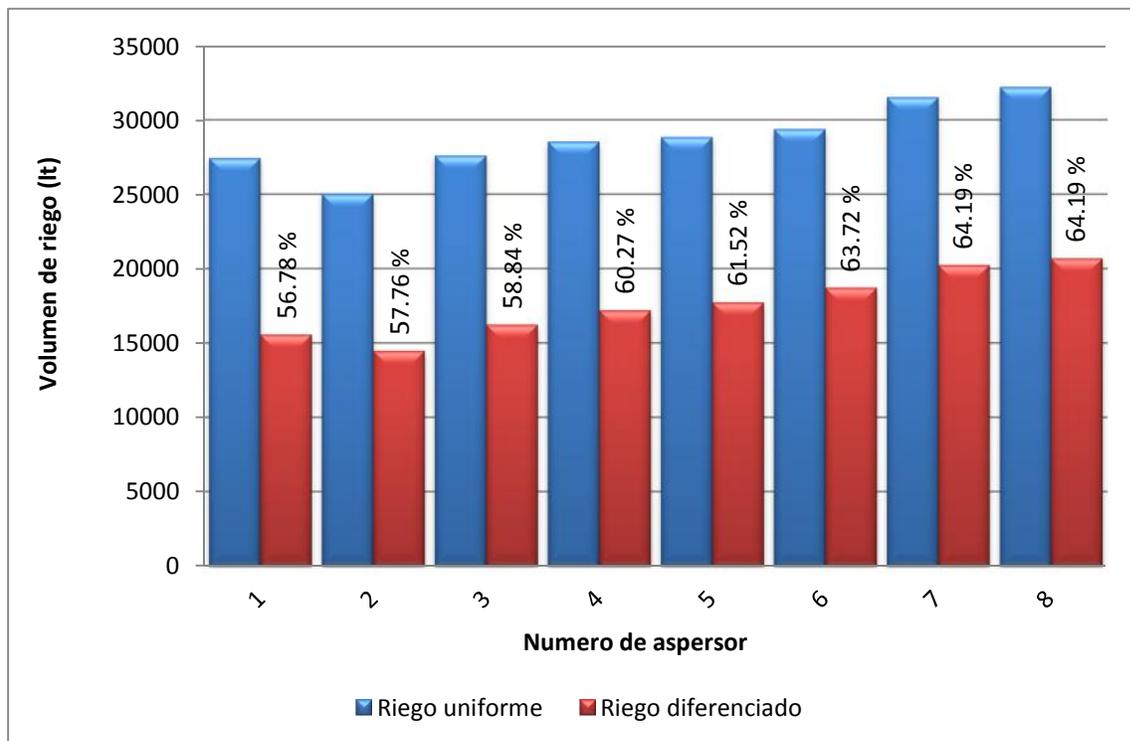


Figura 60. Comparación de riego uniforme y diferenciado en últimos 8 aspersores del pivote central

La Figura 60, muestra la cantidad de agua aplicada por cada aspersor y su porcentaje que representa en comparación si regara con la electroválvula siempre abierta, el ahorro de agua con el sistema diferenciado en promedio es de **39.09 %** para el riego descrito.

Obtenidos los valores de volumen de agua colectada y conociendo su área de colección de la “canaleta pluviométrica” mas la cubeta (0.541493 m²), estimamos la lamina colectada en mm, y teniendo la posición georeferenciada de los 54 sitios junto a la rodada de la torre 4, por interpolación construimos el mapa de lámina aplicada a una velocidad de marcha del equipo de 100% (145.95 m/h en la torre 4), el mismo que se presenta en la Figura 61.

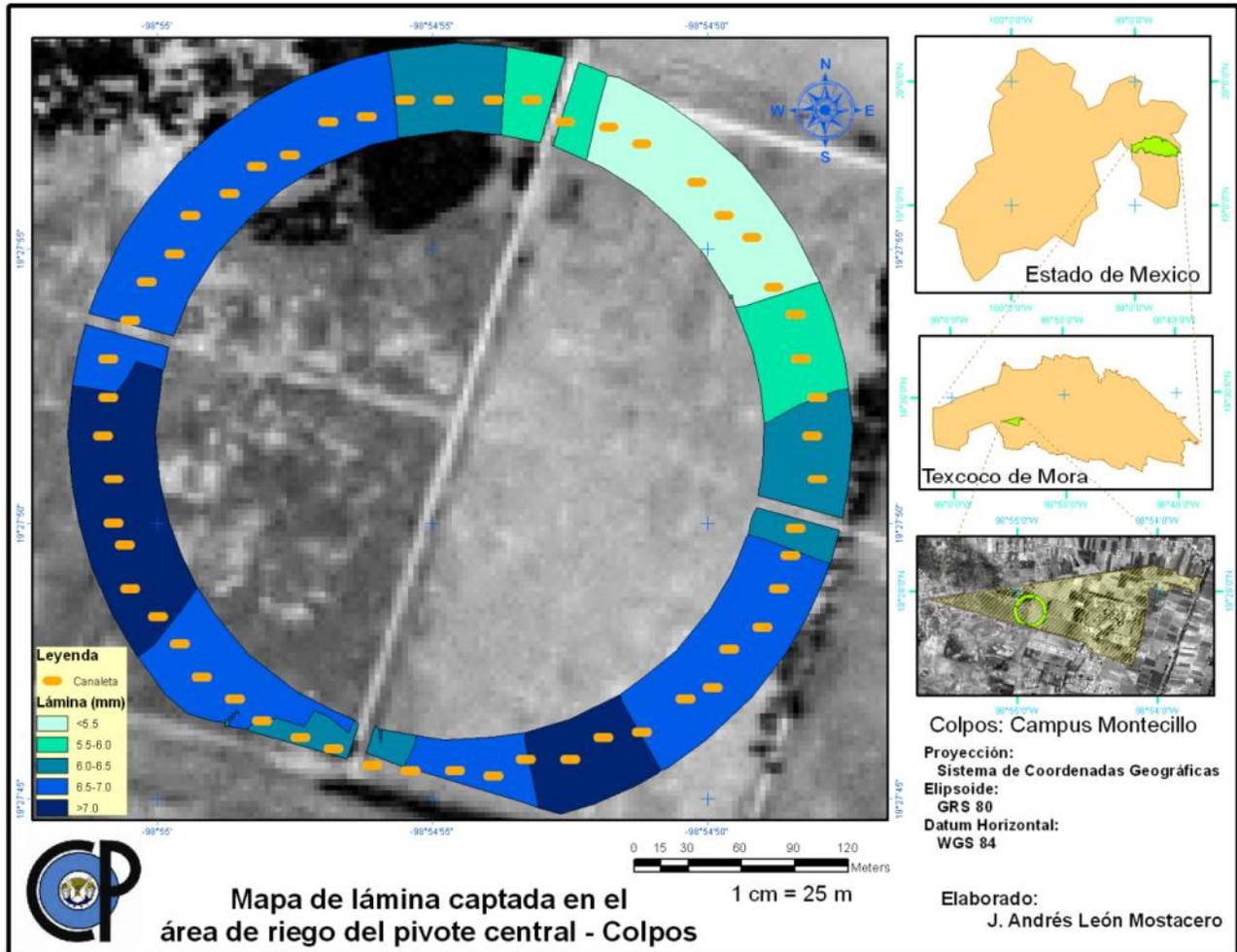


Figura 61. Mapa de lámina colectada en canaletas pluviométrica

El riego diferenciado estuvo en un rango de lamina colectada de 5.0 a 7.5 mm, de este debemos destacar la variación en la colección con respecto a la aplicación por efectos del viento, altura de la vegetación, retraso en la operación de las electroválvulas por efectos electromagnéticos entre otros.

La sincronización de la toma de tiempo de operación del software y un cronometro nos permitió conocer el momento exacto que inicia la colección de las primeras gotas en las “canaletas pluviométricas” y cuando deja de coleccionar las últimas gotas, esto nos permitió identificar la sección en la que operó el programa y considerando el área total de regadío de los 8 aspersores evaluados, el gasto de estos se definió la lámina que aplicó el programa de riego diferenciado, que interpolando se obtiene el mapa de la Figura 62.

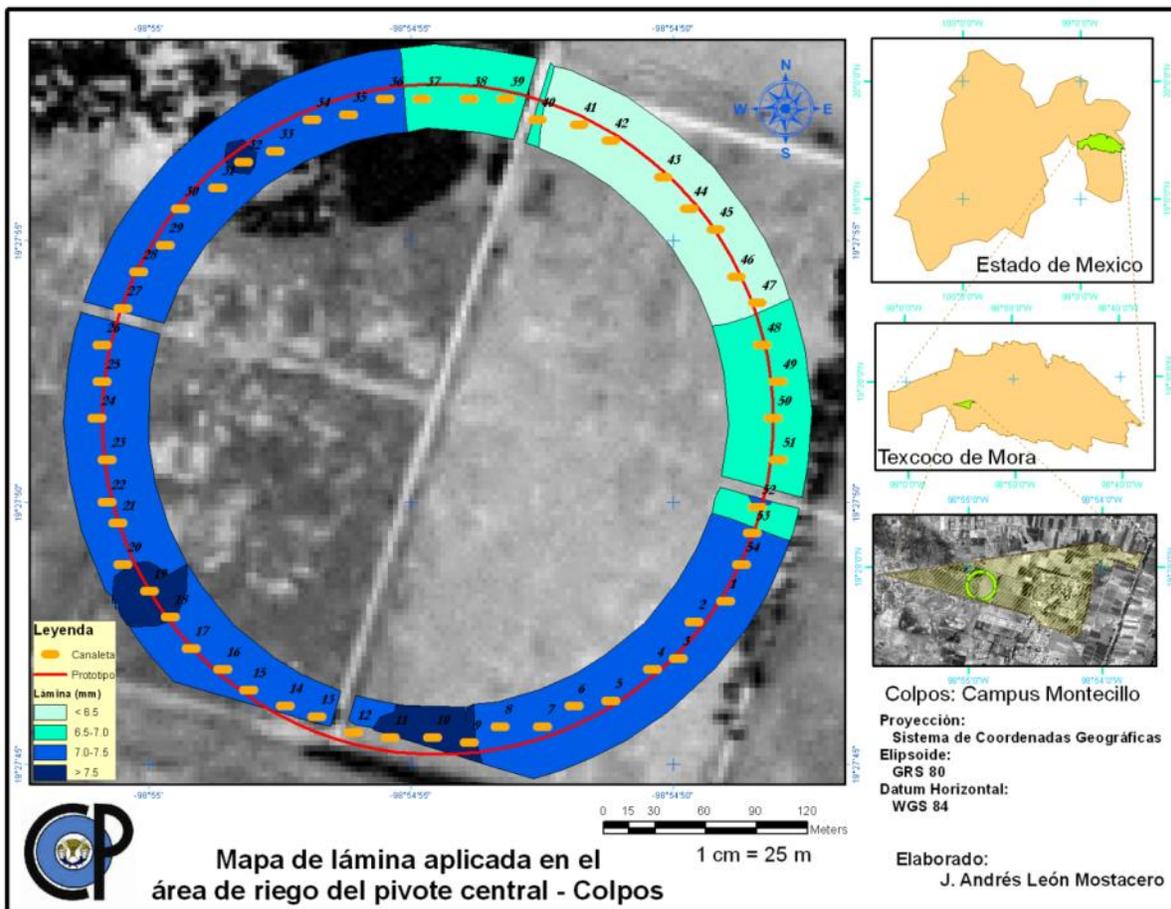


Figura 62. Mapa de lámina diferenciada aplicada al área de riego del pivote central

Este mapa (Figura 62), nos muestra las lámina real ordenada y aplicada por el programa de riego, la misma que va de 6.0 a 8.0 mm y que comparada en todos los puntos de evaluación (54 sitios), es como se muestra en la Figura 63.

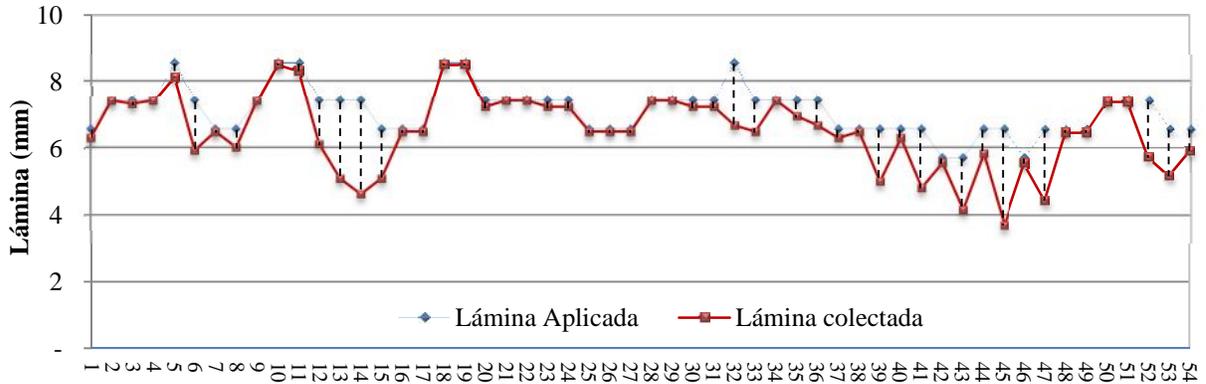


Figura 63. Comparación de la lámina aplicada con la colectada

La Figura 63, muestra la variación entre la lámina aplicada y la colectada en la que en promedio es de 8.41% atribuido al efecto del viento, influencia de la vegetación al momento de la colección en las canaletas y los desfases de operación de las electroválvulas al momento de la apertura y cierre. Los valores obtenidos, interpolados y mostrados como mapa se comparan en la Figura 64, que es una imagen tridimensional que nos simula la vista de la superposición de la lámina aplicada y la lamina colectada en mm.

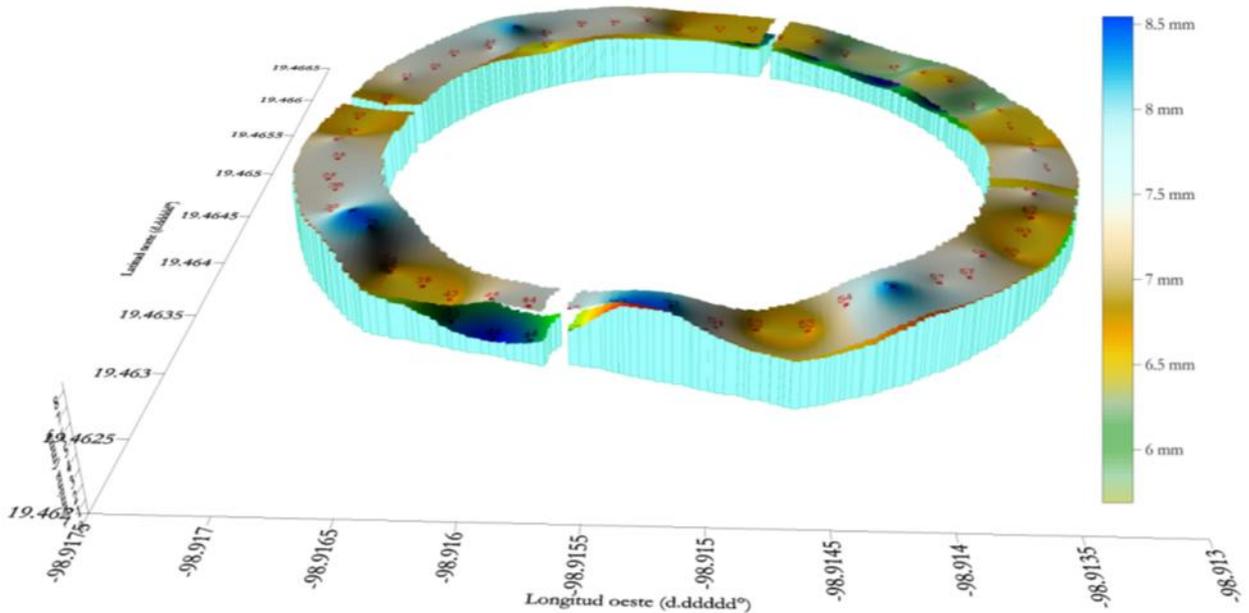


Figura 64. Vista tridimensional de la comparación de la lámina aplicada y la colectada

Finalmente, podemos decir que para el tipo y características de suelo y del cultivo del área irrigada por las últimas 8 salidas del pivote central del Colegio de Postgraduados ubicado en los lotes E17 a E20 y F17 a F20 el ahorro de agua entre el riego diferenciado es de 39.09 %, para condiciones de 5 tipos de riego mencionados anteriormente, mientras que la variación del agua aplicada y la que llega al sitio específico es de 8.41% en promedio atribuyéndose la disminución al efecto del viento, de la vegetación y desfase de operación de las electroválvulas producto del electromagnetismo y retraso del software del equipo de riego diferenciado.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se logró diseñar, implementar y evaluar un sistema de riego a precisión que permite la operación de electroválvulas en función al geoposicionamiento del pivote central del Colegio de Postgraduados.

Se realizó un muestreo de suelo bajo una cuadrícula densa (10 * 10 m) y análisis de variables físicas y químicas como Da, pH, CE, MO, textura, estimación de la CC y PMP, permitiendo así obtener mapas para usarse en el sistema de riego de precisión del área de riego del pivote central.

Se elaboró un software de riego de precisión abierto y adaptable a cualquier equipo de rodamiento circular (pivote central), bajo cualquier criterio de programación de variabilidad del suelo o desarrollo y crecimiento del cultivo.

Se adaptó los componentes electromecánicos de control individualizado del sistema de riego de precisión en las 8 últimas salidas del equipo, demostrando la compatibilidad para la conversión total del pivote central

Se comparó el riego de precisión para un caso hipotético, basado en CE, con la aplicación de una lámina uniforme de riego definiéndose que en las condiciones de operación del pivote central del Colegio de Postgraduados es de hasta 39.09% menos.

La variación entre la lámina aplicada y la colectada es de 8.41%, debido al efecto del viento, vegetación y desfase de operación de las electroválvulas.

Concluimos indicando que el riego de precisión con aplicación precisa de lámina de riego es una técnica plenamente adaptable a cualquier pivote central que opere en el campo agrícola y se puede diseñar, implementar, poner en funcionamiento, monitorear y evaluar con los recursos que se tienen logrando un ahorro de agua significativo.

Recomendamos seguir probando el sistema de riego de precisión instalado en otros equipos con mayor cantidad de válvulas y definiendo la cantidad de agua de acuerdo a variables directas medidas en el suelo como la humedad o el estrés hídrico del cultivo.

Desarrollar aplicaciones adicionales al sistema de riego de precisión como la capacidad de recepción inalámbrica de información de sensores que midan la humedad del suelo en tiempo real, incorporación de componentes que permitan la comunicación y monitoreo vía remota aprovechando redes como la Internet son los nuevos retos de los sistemas de riego de precisión.

6. LITERATURA CITADA

- Acton, D. F. & Gregorich, L. J., 1995. *The health of our soil. Toward sustainable agriculture in Canada*. Ottawa: Centre for Land and Biological Resources.
- Al-Karadsheh, E., Sourell, H. & Krause, R., 2002. *Precision Irrigation: New strategy irrigation water management.*, Witzenhausen, Germany: Conference on International Agricultural Research for Development.
- Al-Kufaishi, S., Blackmore, S., Sourell, H. & Maletti, G., 2005. Assessment of two variable rate irrigation controllers used on a centre-pivot. *Agricultural Engineering International*, III(7), pp. 2-15.
- Appcelerator, I., 2009. *Aptana Studio 3*. [En línea]
Available at: <http://www.aptana.com/products/studio3/download>
[Último acceso: 28 Mayo 2012].
- Ascencio H., R., 2009. *Diseño, instalación y evaluación de un laboratorio de riego en el Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados*. Primera edición ed. Montecillo, Texcoco, México: Colegio de Postgraduados.
- Balastreire, L., 2001. Tecnología para o terceiro milênio, Cultivar Máquinas. *Empresa Jornalística CERES*, I(1), pp. 12-14.
- Barnes, E. y otros, 2000. Precision irrigation management using modeling and remote sensing approaches. *American Society of Agricultural Engineers*, I(1), pp. 332-337.
- Bishop, T. F. A. & Lark, R. M., 2006. The geostatistical analysis of experiments at the landscape-scale. *Geoderma*, Issue 133, pp. 87-106.
- Blake, G. R., 1965. Particle density, Bulk density. En: A. S. o. A. Publisher, ed. *Method of Soil Analysis*. Madinson, Wis.: American Society of Agronomy Publisher, Series n° 9, pp. 371-390.
- Blakkes, J. A. y otros, 1994. An overview of environmental indicator. *Jour Soil and Water Conservation*, 38(3), pp. 301-104.
- Bordovsky, J. P. & Lascano, R. J., 2003. *Variable rate irrigation using low energy precision application (LEPA)*, Nashville, USA: Electronic Proceedings of the beltwide cotton conferences.
- Brevik, E., Fenton, T. E. & Lazari, A., 2006. Soil electrical conductivity as a function of soil water content and implications for soil mapping. *Precision Agriculture*, Issue 7, pp. 393-404.

- Camp, C. R. y otros, 1998. Modified center pivot system for precision management of water and nutrients. *Applied Engineering in Agriculture*, 14(1), pp. 23-31.
- Camp, C., Sadler, E. & Evans, R., 2006. Precision Water Management: Current Realities, Possibilities and Trends.. En: A. Srinivasan, ed. *Handbook of Precision Agriculture*. Nueva York: Food Products Press, pp. 156-184.
- Chávez, J. L., Pierce, J. F. E. V. T. & Evans, G. R., 2010a. A Remote Irrigation Monitoring and Control System for continuous move systems. Part A: description and development. *Precision Agriculture*, Issue 11, pp. 1-10.
- Chávez, L. J. y otros, 2010b. A remote irrigation monitoring and control system (RIMCS) for continuous move systems. Part B: field testing and results. *Precision Agriculture*, Volumen XI, pp. 11-26.
- Chenghai, Y. a. A. G. L., 1999. Airborne Videography to Identify Spatial Plant Growth Variability for Grain Sorghum. *Precision Agriculture*, Issue 1, pp. 67-79.
- Clark, I., 2001. *Practical Geostatistics*, Alloa, Central Scotland: Geostokos Limited.
- Coates, R. W., Delwiche, M. J. & Brown, P. H., 2006. Control of individual microsprinklers and fault detection strategies. *Precision Agriculture*, 7(1), pp. 85-99.
- Copetake, P., 2009. *Horticom news*. [En línea]
Available at: <http://www.horticom.com/pd/article.php?%20sid=74181>
[Último acceso: 25 Junio 2012].
- Corwin, D. L. a. S. L., 2003. Application of Soil Electrical Conductivity to Precision Agriculture: Theory, Principles, and Guidelines. *Agronomy Journal*, June, 95(3), pp. 455-471.
- Cressie, N., 1991. *Statistics for Spatial Data*. New York: John Wiley & Sonns, Inc..
- Cressie, N. A., 1991. *Statistics for Spatial Data*. Primera edición ed. United States of America: Jhon Wiley & Sons, INC..
- Dalgaard, M., Have, H. & Nehmdahl, a. H., 2001. Soil clay mapping by measurement of electromagnetic conductivity. *3rd European Conference on Precision Agriculture*, 18 Junio, Issue 1, pp. 366-372.
- De Queiroz, T. M., Botrel, T. A. & Frizzzone, J. A., 2008. Desenvolvimento de software e hardware para irrigação de Precisão usando pivô central. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 28(1), pp. 44-54.
- De Santa Olalla, M. F. M., López, F. P. & Calera, B. A., 2005. *Agua y Agronomía*. Madrid, España: Mundi-Prensa.

- Dellavalle, N., 1992. Determination of soil-paste pH and conductivity of saturation extract. En: T. C. Inc., ed. *Handbook on reference Methods for Soil Analysis*. Athens. GA.: The Council. Inc., pp. 40-43.
- Department of Environment and Conservation, 2004. *Environmental Guidelines Use of Effluent by Irrigation*. Sydney South: Department of Environment and Conservation (NSW).
- Diaz, V. M. & Casar, G. R., 2009. *Geoestadística aplicada: análisis exploratorio de datos*, México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Doerge T., K. N. a. L. E., 1999. Soil Electrical Conductivity Mapping. *Site-Specific Management Guidelines*, I(30), pp. SSMG-30.
- Domsch, H. a. G. A., 2001. Electrical conductivity of soils typical for the state of Brandenburg in Germany. *3rd European Conf. on Precision Agriculture*, 18 June, Issue 1, pp. 373-378.
- Doran, J. W. A. & Parkin, T., 1994. Defining and assessing soil quality. *Soil Science Society of America Journal*, Issue 35, pp. 3-21.
- Dumanski, J., 1994. *Sustainable land management for the 21st century*, Canada: Agriculture Institute of Canada.
- Electronics, S., 2012a. *66 Channel LS20031 GPS 5Hz Receiver*. [En línea] Available at: <http://www.sparkfun.com/products/8975> [Último acceso: 12 Junio 2012].
- Electronics, S., 2012b. *Tutorial: LS20031 GPS Assembly Guide*. [En línea] Available at: <http://www.sparkfun.com/tutorials/176> [Último acceso: 12 Junio 2012].
- Elias, A. & Camargo, J. R. O., 1999. Agricultura de Precisão. *Jornal Cana*, Issue 1, pp. 23-24.
- Elias, A. I. & Camargo, a. J. R. O., 1999. Agricultura de Presiãõ. *Jornal Cana*, Issue 1, pp. 23-24.
- ESRI ©, 2010. *Tutorial: ESRI © ModelBuilder 10.0*, USA: Microsoft Corporation.
- ESRI, 2003. *ArcGIS 9, Using ArcGIS Geostatistical Analyst*. California, USA: ESRI.
- ESRI, 2010. *ArcGIS for Desktop*. [En línea] Available at: <http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis-for-desktop> [Último acceso: 18 Julio 2012].

- Evans, R., 2001. *Center Pivot Irrigation*, Sidney, USA: USDA-Agricultural Research Service.
- Evans, R. G., 2010. *Irrigation Technologies Comparisons*, Sidney: USDA-ARS-NPARL.
- Evans, R. G. y otros, 2000. Control for precision irrigation with self-propelled systems. En: R. G. Evans, B. L. Benham & T. P. Trooien, edits. *Proceedings of the 2000 ASAE 4th decennial national irrigation symposium*, . Michigan, USA: St. Joseph, pp. 322-331.
- Evans, R. G. & Harting, G. B., 1999. Precision irrigation with center pivot systems on potatoes. En: R. Walton, R. E. Nece & V. A. Reston, edits. *Water Resources Engineering Conference*. Seattle, Washington: ASCE.
- Evans, R. G., Iversen, W. M., Stevens, W. B. & Jabro, J. D., 2010. Development of Combined Site-Specific MESA and LEPA Methods on a Linear Move Sprinkler Irrigation System. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 26(5), pp. 883-895.
- Fernández, G. R., 1976. *El Agua en el Sistema Suelo -Planta-Atmósfera (Serie Practicas)*. Primera Edición ed. Texcoco, México: Colegio de Postgraduados.
- Funes, N. H., 2004. *Metodos Estadísticos en Problemas Especiales*. Primera Edición ed. San Miguel Tucuman, Argentina: Universidad Nacional de Tucuman.
- Gallardo, A., 2006. Geoestadística. *Ecosistemas, Revista Científica y Técnica de Ecología del Medio Ambiente*, XV(3), pp. 45-55.
- Gartley, k. L., 1995 and revied 2011. Recommended Methods for Measuring Soluble Salts in Soils. *Recommended Soil testing Procedures For The Northeastern United States*, I(1), pp. 91-93.
- Geonics Limited, 2000. *Conductivity Meter*. [En línea]
Available at: <http://www.geonics.com/html/em38.html>
[Último acceso: 07 Julio 2012].
- Gil, E., 2000. *Situación actual y posibilidades de la agricultura de precisión*, Barcelona, España: Escuela Superior de Agricultura de Barcelona.
- Giraldo, H. R., 2008. *Curso de Geoestadística*, Bogota, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Green, S. R., Kirkham, M. B. & and Clothier, B. E., 2006. Root uptake and transpiration: from measurements and models to sustainable irrigation. *Agricultural Water Management*, Issue 86, pp. 165-176.

- Gregorich, E. G. y otros, 1994. Toward a minimum data set to assess soil organic matter quality in agriculture soil. *Canadian journal of soil science*, 74(04), pp. 367-386.
- Harting, G. B., 1999. As the pivot turns. *Resource*, Volumen 6, pp. 13-14.
- Hedley, A., Yule, I. & Bradbury, S., 2010b. *Analysis of potential benefits of precision irrigation for variable soils at five pastoral and arable production sites in New Zealand*, Brisbane, Australia: Massey University Campus, Palmerston North.
- Hedley, C., 2010. *Landcare Research Manaaki Whenua*. [En línea]
Available at: <http://irrigationefficiency.co.nz/assets/Uploads/INZ-posterHedley.pdf>
[Último acceso: 08 July 2012].
- Hedley, C. B., 2009. *The Development of Proximal Sensing Methods for Soil Mapping and Monitoring, and their application to Precision Irrigation*. Primera ed. New Zealand(Palmerston North): Massey University.
- Hedley, C. B. & Yule, I., 2009. Soil water status mapping and two variable-rate irrigation scenarios. *Precision Agriculture*, 18 Abril, Issue 10, pp. 342-335.
- Heisel, T., Annette, K. J., R., E. E. & Andreasen, C., 1999. Weed mapping with Co-Kriging Using Soil Properties. *Precision Agriculture*, 1(39), pp. 39-52.
- Hendrickx, J., Baerends, B., Raza, Z. & Chaudhry, M. S. a. A., 1992. Soil salinity assessment by electromagnetic induction of irrigated land. *Soil Science Society of America Journal*, Issue 56, pp. 1933-1941.
- Hengl, T., 2007. *A Practical Guide to Geostatistical Mapping of Environmental Variables*. Luxembourg: Institute for Environment and Sustainability.
- Holan, S. y otros, 2008. Semiparametric Geographically Weighted Response Curves with Application to Site-Specific Agriculture. *American Statistical Association and the International Biometric Society Journal of Agricultural and Environmental Statistics*, 13(4), pp. 424-439.
- Huth, N. I. & Poulton, P. L., 2007. An electromagnetic induction method for monitoring variation in soil moisture in agroforestry systems. *Australian Journal of Soil Research*, Issue 45, pp. 63-72.
- Iglesias, M. L., 1998. *Muestrei de áreas: Diseño de muestras y estimación en pequeñas áreas*. Madrid, España: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos.
- Instituto de la Potasa y el Fósforo (INPOFOS), 1996. *Diagnóstico del estado nutricional de los cultivos*. Primera edición ed. Quito, Ecuador: INPOFOS.
- Isaaks, E. H. & Srivastava, R. M., 1989. *An introduction to applied geostatistics*. Nueva York, EEUU: Oxford University Press.

- Javier, A., Coelho, R. D., Lorenzo, L. F. & Machado, R. E., 2004. Gestión del riego en praderas irrigadas por pivote central. *Diario de Ingeniería Agrícola y ambiental*, 8(2), pp. 233-242.
- Karlen, D. L. y otros, 1997. Soil quality. A concept, definition and framework for evaluation. *Soil Science Society American Journal*, Issue 61, pp. 4-10.
- Kennedy, A. C. & Papendicks, R. I., 1995. Microbial characteristic of soil quality. En: A. R. Service, ed. *Indicators for soil quality evaluation*. EE.UU.: Natural Resources Conservation Service, pp. 243-248.
- Kerry, R. & Oliver, M. A., 2008. Determining nugget:sill ratios of standardized variograms from aerial photographs to kriging sparse soil data. *Precision Agriculture*, Issue 9, pp. 33-56.
- King, B. A. & Wall, R. W., 2001. *Secondary, spatially variable chemical application system for site-specific crop management using continuous-move irrigation systems*, Michigan, USA: ASAE.
- King, B., Stark, J. & Wall, R., 2006. Comparison of site-specific and conventional uniform irrigation management for potatoes. *Applied Engineering in Agriculture*, XXII(5), pp. 677-688.
- Klute, A., 1986. *Methods of soil analysis*. II ed. Madison, Wisconsin: ASA and SSSA.
- Krasilnikov, P., Carré, F. & Montanarella, L., 2008. *Soil Geography and Geostatistics*. Luxembourg: Institute for Environment and Sustainability.
- Krasilnikov, P. & Sidorova, V., 2008. The use of geostatistical methods for mapping soil horizons. En: P. Krasilnikov, F. Carre & L. Montanarella, eds. *Geostatistics and Soil Geography*. Moscow, Russia: Nauka Publication, pp. 12-42.
- Larson, W. E. & P. F. J., 1991. Conservation and enhancement of soil quality, in evaluation for sustainable land management in the developing world. *Board for Soil Resource and Management*, II(1), pp. 37-51.
- León, M. J. A., 2008. *Adaptación y evaluación técnica de un sistema de riego lineal por goteo móvil y aspersión*. Primera edición ed. Montecillos, Texcoco, México: Colegio de Postgraduados.
- Leyva, R. L. Z., Alves de Souza, C. M. & Orlando, R. C., 2001. Agricultura de precisión. *Ciencias Técnicas agropecuarias*, X(3), pp. 7-11.
- Leyva, R. L. Z., Alves de Souza, C. M. & Orlando, R. C., 2001. Agricultura de precisión. *Ciencias Técnicas agropecuarias*, X(3), pp. 7-11.

- Limited, R. C., 2007. *PyQt*. [En línea]
Available at: <http://www.riverbankcomputing.co.uk/software/pyqt/download>
[Último acceso: 12 Junio 2012].
- Lindsay International Ltd., 2007. *Precision Irrigation*. [En línea]
Available at:
http://www.precisionirrigation.co.nz/en/pages/full_variable_rate/#page=page-2
[Último acceso: 16 Julio 2012].
- Lindsay, 2007. *Lindsay Corporation's*. [En línea]
Available at: <http://www.zimmatic.com/>
[Último acceso: 15 Julio 2012].
- LOCOSYS Technology Inc., 2006. *Locosys*. [En línea]
Available at:
http://www.sparkfun.com/datasheets/GPS/Modules/LS20030~3_datasheet_v1.2.pdf
[Último acceso: 18 Junio 2012].
- Lütticken, R., 2000. Automation and Standardisation of Site Specific Soil Sampling.
Precision Agriculture, Issue 2, p. 179-188.
- Martínez, V. N., López, A. C., Basurto, S. M. & Pérez, L. R., 2011. Efectos por salinidad en el desarrollo vegetativo. *Tecnociencia*, Diciembre, V(3), pp. 156-161.
- Matheron, G., 1962. *Traité de Géostatistique Appliquée*. Primera ed. Paris: Technip.
- McBratney, A. B., Whelan, B., Ancev, T. & Bouma, J., 2005. Future Directions of Precision Agriculture. *Precision Agriculture*, Issue 6, pp. 7-23.
- McCarthy, A., Hancock, N. & Raine, S., 2010. VARIwise: a general-purpose adaptive control simulation framework for spatially and temporally varied irrigation at sub-field scale. *Computers and Electronics in Agriculture*, Volumen 70, pp. 117-128.
- McNabb, G., 1999. *United States Patent*. [En línea]
Available at: <http://www.google.com/patents/US5927603>
[Último acceso: 17 Julio 2012].
- Mesias, A. R., 2005. *LptWireless*. [En línea]
Available at: <http://rogercom.com./pparalela/LptWireless.htm>
[Último acceso: 15 Julio 2012].
- Misra, R., Raine, S., Pezzaniti, D. & Charlesworth, P. a. H. N., 2005. A Scoping Study on Measuring and Monitoring Tools and Technology for Precision Irrigation.. *CRC for Irrigation Futures*, I(5).

- NaanDanJain, 2012. *NaanDanJain*. [En línea]
Available at: <http://www.catalogue.naandanjain.com/catalogue/product/5709>
[Último acceso: 11 Junio 2012].
- Navarro, B. A., 2010. *Indicadores físicos de un suelo bajo labranza de conservación y su relación con el rendimiento de tres cultivos*. Tesis ed. Montecillo, Texcoco, Estado de México: Colpos.
- Núñez, N. R. y otros, 2011. Efecto de la materia orgánica sobre las propiedades físicas del suelo en un sistema agroforestal de la llanura costera norte de Nayarit, México. *Biociencia*, Julio, I(3), pp. 27-35.
- Ortega B., R. y F. M. L., 2001. *Agricultura de precisión*, Quilamapu, Chile: INIA.
- Ortega, B. R. y F. M. L., 2008. Agricultura de precisión y manejo sitio específico en Chile. *Chilero*, III(18), pp. 37-41.
- Paramá, R., 2006. *Heterogeneidad Espacial de Nutrientes del Suelo en Ecosistemas Terrestres*. Primera ed. Galicia, España: Universidad Vigo.
- Paul, E. y C. F., 1989. *Soil Microbiology and biochemistry*. Primera Edición ed. San Diego, CA.: Academic Press.
- Perry, C. D., Dukes, M. D., Harrison & A., K., 2004. *Effects of variable-rate sprinkler cycling on irrigation uniformity*, Michigan, USA: ASAE.
- Perry, C. D. y otros, 2002. *Development and testing of a variable-rate pivot irrigation control system*, Michigan, USA: ASAE.
- Perry, C. & Pocknee, S., 2003. *Precision Pivot Irrigation Control to Optimize Water Application*, Tifton, Georgia: University of Georgia.
- Phyton, 2007. *Python*. [En línea]
Available at: <http://www.py2exe.org/>
[Último acceso: 12 Junio 2012].
- Phyton, 2009. *Python Imaging Library (PIL)*. [En línea]
Available at: <http://www.pythonware.com/products/pil/>
[Último acceso: 12 Junio 2012].
- Phyton, 2010. *Pyserial*. [En línea]
Available at: <http://sourceforge.net/projects/pyserial/files/>
[Último acceso: 12 Junio 2012].
- Pierce, J. F., Fortin, M. C. & Sfaton, M. J., 1994. Periodic plowing effects on soil properties in no till farming systems. *Soil Science Society of America Journal*, Issue 58, pp. 1782-1787.

- Pozdnyakova, L. & Zhang, R., 1999. Geostatistical Analyses of Soil Salinity in a Large Field. *Precision Agriculture*, Volumen I, pp. 153-165.
- Python, 2012. *python.org*. [En línea]
Available at: <http://www.python.org/getit/releases/2.7.3/>
[Último acceso: 12 Junio 2012].
- Raine, S., McClymont, D. & Smith, R., 1997. The development of guidelines for surface irrigation in areas with variable irrigation. *Aust Soc of Sugar Cane*, I(19), pp. 293-301.
- Rhoades, J. D. y otros, 1990. Determining soil salinity from soil electrical conductivity using different models and estimates. *Soil Science Society of America Journal*, Issue 54, p. 46.
- Rhoades, J., Lesch, S. & Alves, P. S. a. W., 1989. New calibrations for determining soil EC - Depth relations from Electromagnetic measurements.. *Soil Science Society of America Journal*, Issue 53, pp. 74-79.
- Rhoton, F. E. y otros, 1993. Chemical and physical characteristics of four soil types under conservation and no tillage systems. *Soil & Tillage Research*, Issue 28, pp. 51-61.
- Romano, G. y otros, 2010. *Mapping of Soil Variability for increasing Precision with Managed drought Stress Phenotyping*. [En línea]
Available at: <https://troz.uni-hohenheim.de/publication/mapping-of-soil-variability-for-increasing-precision-with-managed-drought-stress-phenotyping>
[Último acceso: 08 July 2012].
- Sadler, E. J., Evans, R. G., Stone, K. C. & Camp, C. R., 2005a. Opportunities for conservation with precision irrigation. *Journal of Soil and Water Conservation*, LX(6), pp. 371-379.
- Sadler, E. J. y otros, 2006b. Newly developed technologies for soil and water conservation.. En: N. J. Chung, y otros edits. *Proceedings of the 2005 international workshop on newly developed innovative technology for soil and water conservation*. Suwon, Korea: s.n., pp. 15-34.
- Samra, J. S. & Gill, H. S., 1993. Modeling of variation in a sodium-contaminated soil and associated tree growth. *Soil Science*, II(155), pp. 148-155.
- Saxton, K. & Rawls, W., 2006. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America*, Volumen 70, pp. 1569-1578.
- SEMARNAT, 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial*, 31 Diciembre, pp. 1-85.

- Serrato, S. R., Ortíz, A. A., Dimas, L. J. & Berúmen, P. S., 2002. Aplicación de lavado y estiércol para recuperar suelos salinos en la Comarca Lagunera, México. *Terra Latinoamericana*, XX(003), pp. 329-336.
- Shatar, T. a. M. A., 1999. Empirical Modeling of Relationships Between Sorghum Yield and Soil Properties. *Precision Agriculture*, Issue 1, pp. 249-276.
- Sherlock, M. D. & McDonnell, J. J., 2003. A new tool for hillslope hydrologists: spatially distributed groundwater level and soil water content measured using electromagnetic induction. *Hydrological Processes*, I(15), pp. 1965-1977.
- Smith, R., Baillie, J., McCarthy, A. & Raine, S. & B. C., 2010. *Review of Precision Irrigation Technologies and their Application*. Primera edición ed. Toowoomba: National Centre for Engineering in Agriculture Publication.
- Soil Quality Institute , 1996. *Indicators for soil quality evaluation*. I ed. USA: Natural Resources Conservation Service.
- Stanley, B., 2008. Tecnologías asociadas a problemas productivos. En: M. J. Garcia, ed. *Tecnologías Aplicables en Agricultura de Precisión*. Primera edición ed. Santiago de Chile: Fundación para la innovación Agraria, pp. 35-37.
- Stone, K. C. y otros, 2006. Water flow from a precision irrigation system. *Applied Engineering in Agriculture*, 22(1), pp. 73-78.
- Sudduth, K. A. y otros, 2005. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers and Electronics in Agriculture*, Issue 46, pp. 263-283.
- Sudduth, K., Drummond, S. & Kitchen, N., 2001. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, Issue 31, pp. 239-264.
- Sudduth, K., Kitchen, N. & Drummond, S., 1999. Soil conductivity sensing on claypan soils: Comparison of Electromagnetic Induction and direct methods. *Proc 4th Int Conf on Precision Agriculture*, Issue 1, pp. 979-990.
- Tabor, J. A., Warrick, A. W., Myers, D. E. & Pennington, D. A., 1985. Spatial variability of nitrate in irrigated cotton: II. Soil nitrate and correlated variables. *Soil Science Society of America Journal*, Issue 49, pp. 390-394.
- Tabor, J. A., Warrick, A. W., Pennington, D. A. & Myer, D. E., 1984. Spatial variability of nitrate in irrigated cotton: I. Petioles. *Soil Science Society of America Journal*, Issue 48, pp. 602-607.

- Traxco ®, 1991. *Traxco, Center Pivot Irrigation Components*. [En línea]
Available at: <http://www.traxcoirrigation.com/>
[Último acceso: 17 Julio 2012].
- United States Department of Agriculture, 1938. *Natural Resources Conservation Service*.
[En línea]
Available at: <http://soils.usda.gov/technical/aids/investigations/texture/>
[Último acceso: 18 Julio 2012].
- Valley, 2008. *Valley, The leader in Precision Irrigation*. [En línea]
Available at: <http://www.valleyirrigation.com/page.aspx?id=2343&pid=2342>
[Último acceso: 16 Julio 2012].
- Vilela, L. A. A., 2005. Desenvolvimento e calibração de um tensiômetro eletrônico de leitura automática. *Engenharia Agrícola*, XXV(2), pp. 367-376.
- Webster, R. & Oliver, M. A., 2007. *Geostatistics for environmental scientists, Statistics in practice*. Second ed. England: John Wiley & Sons, Ltd..
- Wetterlind, J., Stenberg, B. & Söderström, a. M., 2008. The use of near infrared (NIR) spectroscopy to improve soil mapping at the farm scale. *Precision Agriculture*, 10 January, Issue 9, pp. 57-69.
- Yagodin, B., Smirnov, A. & Peterburgski, A., 1982. *Agroquímica*. Primera edición ed. Moscú, URSS: Mir Moscú.
- Yates, S. R. & Warrick, D., 1987. Estimating soil water content using cokriging. *Soil Science Society of America Journal*, Issue 51, pp. 23-30.
- Yates, S. R., Warrick, D. & Meyers, D. E., 1986a. Disjunctive kriging. I. Overview of estimation and conditional probability. *Water Resources Research*, XXII(5), pp. 615-621.
- Yates, S. R., Warrick, D. & Meyers, D. E., 1986b. Disjunctive kriging. II. Examples. *Water Resources Research*, XXII(5), pp. 623-630.
- Yates, S. R., Zhang, R., Shouse, P. J. & Van Genuchten, M. T., 1993. Use of geostatistics in the description of salt-affected soils. En: D. a. D. G. Russo, ed. *Water Flow and Solute Transport in Soils*. New York: Springer-Verlag, pp. 283-304.

ANEXO 1

MUESTREO DE SUELOS

Se aprovecharon las recomendaciones hechas tanto para muestreo de fertilidad de suelos como de salinidad, describiéndose a continuación una metodología intermedia.

Equipo y material

- GPS (Etrex Vista de la marca Garmin).
- Cordel de nylon para una cuadrícula 10*10 m (50 m).
- Pala recta de 40 cm de longitud.
- Bolsas de plástico transparente de 30*20 cm con capacidad para 1 kg de suelo.
- Etiquetas y marcadores de tinta indeleble.
- Libreta de notas y bolígrafo.

Procedimiento

Sectorización o cuadrícula

Los objetivos del muestreo son la elaboración de mapas diferenciados de variables físicas del suelo. La unidad de muestreo se considera a los lotes E17 a E20 y F17 a F20 con características similares de pendiente, color, pedregosidad e incluso cultivo (Cebada). Se considero 4 sub áreas de muestreo marcadas básicamente por los caminos de acceso que convergen en la ubicación del centro del pivote y que tienen un área de aproximada de 4 ha.

Numero de muestras

Estuvo definido por la cuadrícula (10*10 m) y considerando cubrir el área que irrigan los 8 últimos aspersores que fueron los que se consideraron para el presente trabajo, de esta manera se llego al número de 323 muestras de suelo.

Ubicación de los sitios de muestreo

El procedimiento utilizado fue la formación de un cuadro con el cordel del nylon (10*10 m) y extrayendo las muestras en cada uno de los vértices del cuadrado, además de tomar el punto GPS “exacto” de este. El punto de partida y la dirección de los lados estuvieron definidos por el límite de los caminos de acceso de cada cuadrante.

Profundidad de muestreo.

La profundidad de muestreo considerada fue de 0-30 cm, que es el espesor de la capa arable promedio de un suelo agrícola que es cultivado por la maquinaria común y es también donde se desarrolla más del 90% del sistema radicular de los cultivos en este caso de los cereales (cebada)

Toma de muestra.

Consistió en excavar un hoyo de 30 cm de profundidad con una área de 20*20 cm, de la misma que se selecciona una cara y se “corta” con la pala una porción de 20 cm de ancho, 2 cm de espesor y 30 cm de profundidad. Luego se elimina los bordes, piedras u otros fragmentos gruesos y que se consideren no representativos de la muestra. Se colocó en la bolsa de plástico la muestra de peso superior a 600 g aproximadamente, etiqueto con el número de punto tomado por el GPS y la fecha, finalmente se alisto para su transporte al laboratorio.

ANEXO 2

PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Es preciso considerar las mínimas cantidades utilizadas en los análisis y la importancia de evitar la contaminación de las muestras con el uso de recipientes metálicos en mal estado, pintura de protección, tamices metálicos en mal estado, entre otros

Equipo y material

Charolas de plástico de 30*60 cm

Hojas de plástico de 40*70 cm

Etiquetas

Mazo de madera

Libreta de registro

Tamices de acero inoxidable de malla menor a 2 mm

Cajas de plástico de capacidad mayor a 30 l como recipientes contenedores

Procedimiento

Traslado de las muestras al laboratorio

Se tuvo los cuidados recomendados como la eliminación de partículas mayores a 2 cm y se hizo el mezclado, colocación de etiquetas, y doble embolsado de cada muestra para evitar contaminación con otros materiales ajenos al suelo.

Recepción y registro

En el laboratorio se registro y ordeno de manera consecutiva las muestras considerando siempre el número de punto GPS como su código más importante, el mismo que manejamos en el laboratorio para su análisis.

Secado

Su principal objetivo es facilitar el manejo de la muestra, mejorar su homogenización y disminuir cambios químicos indeseables. El secado se lo hizo en un ambiente controlado que no supere una temperatura mayor a 35 °C ni humedad mayor a 70%, se realizo extendiendo el suelo sobre la superficie de una charola de plástico de 40*30 cm y con una profundidad menor a 1 cm.

Molienda

Se realizo después de retirar rocas y material orgánico visible, y se lo hizo con un mazo de madera, en el caso particular de estas muestras fue de manera rápida y sencilla por tratarse de un suelo muy suelto.

Tamizado

El suelo molido se hizo pasar por un tamiz con aberturas de 2 mm de diámetro (malla 10) de acero inoxidable ya que este grado de fineza es conveniente para la mayoría de análisis requeridos, una vez tamizado se separo 500 gr de suelo para realizar las determinaciones físicas del suelo

Homogenizado y pesado

Se trata de una segunda homogenización y consiste en el movimiento de la muestra dentro de la bolsa, luego se pesó las sub muestras de acuerdo a la pruebas realizadas en una balanza de precisión con aproximación al 0.1 % (2 decimales)

Almacenamiento

Después de realizar las determinaciones analíticas las muestras fueron almacenadas para posteriores comprobaciones en bolsas plásticas debidamente etiquetadas en las que se contempla la fecha de toma de muestra.

ANEXO 3

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE: MÉTODO DE LA PROBETA

El método de la probeta para la determinación de la densidad es el uso de una probeta para determinar el volumen de 50 gr de suelo como se detalla más adelante

Equipo y material

- Probeta de 100 ml de plástico
- Tapón para probeta
- Balanza analítica con precisión a 0.1%

Procedimiento

- Pesar 50 gr de suelo en la balanza analítica
- Colocar la muestra en la probeta y aplicar 30 golpes homogéneos contra una superficie plana y sobre una tela. Además dar 3 golpes en las paredes laterales de la probeta para simular la compactación del suelo natural
- Registrar los datos de volumen para el cálculo de la D_a y regresar el suelo a su bolsa

ANEXO 4

DETERMINACIÓN DEL pH EN AGUA, RELACIÓN 1:2 (SUELO: AGUA)

El pH es una de las mediciones más comunes e importantes de los análisis químicos rutinarios del suelo, ya que controla las reacciones químicas y biológicas en el suelo. La determinación del pH afecta a factores como tipo y cantidad de constituyentes orgánicos e inorgánicos, acidez del suelo, concentración de sales en la solución, etc

Reactivos

- Agua destilada o des ionizada
- Soluciones reguladoras de referencia, pH 4, 7 y 10 las cuales se adquieren preparadas concentradas para diluirse de acuerdo a instrucciones propias, estas soluciones deben estar a temperatura ambiente al momento de calibrar el medidor de pH

Equipo y material

- Potenciómetro equipado con electrodo de vidrio combinado a electrodo de referencia
- Balanza analítica con precisión a 0.1% (0.01 g)
- Frascos de plástico transparente de boca ancha de 100 ml
- Pipeta volumétrica de 100 ml
- Varillas de vidrio que sirven como agitadores
- Piceta

Procedimiento

- Pesamos 35 gr de suelo en un frasco de plástico de boca ancha
- Adicionamos 70 ml de agua destilada al frasco conteniendo al suelo
- Con una varilla de vidrio agitamos manualmente la mezcla del suelo: agua a intervalos de 5 minutos durante 30 minutos

Dejamos reposar 15 minutos
Calibramos en medidor de pH con las soluciones reguladoras, enjuagamos con agua destilada los electrodos antes de iniciar las lecturas de las muestras
Agitamos la suspensión e introducimos el electrodo
Registramos el pH al momento que se ha estabilizado la lectura
Reportamos el valor con un número entero y una cifra decimal

ANEXO 5

DETERMINACIÓN DE LA C.E. EN SOLUCIÓN 1:2 (V:V) SUELO: AGUA

El método se basa en la medición electrolítica de la solución de sales solubles con una celda de conductividad como sensor. Definiéndose como solución de sales solubles a los constituyentes inorgánicos apreciablemente solubles en agua.

Reactivos

Agua destilada
Solución estándar de KCl 0.010 N (disolver 0.7456 g de KCl en agua destilada y aforar a un litro, la C.E. de esta solución a 25 °C debe ser 1.4118 dS m⁻¹.
Solución estándar de KCl 0.10 N (disolver 7,4555 g de KCl en agua destilada y aforar a un litro, la C.E. de esta solución a 25 °C debe ser 12.900 dS m⁻¹.
Solución de mantenimiento de la celda de conductividad

Equipo y material

Medidor de conductividad eléctrica de lectura directa (Conductómetro tipo.....)
Celda de conductividad tipo flujo con compensación automática de temperatura
Balanza analítica con precisión a 0.1% (0.01 g)
Frascos de plástico transparente de boca ancha de 100 ml
Pipeta volumétrica de 100 ml
Varillas de vidrio que sirven como agitadores
Piceta

Procedimiento

Teniendo la densidad aparente de la muestra pesamos el equivalente a 35 ml de suelo de cada una de las muestras y colocamos en un frasco de plástico de boca ancha
Adicionamos 70 ml de agua destilada al frasco conteniendo al suelo
Con una varilla de vidrio agitamos manualmente la mezcla del suelo y dejamos en reposo 30 minutos para que los sólidos se asienten
Estandarizamos el medidor de conductividad con las soluciones de KCl y de acuerdo a las indicaciones del fabricante, enjuagamos con agua destilada la celda antes de iniciar las lecturas de las muestras
Agitamos la suspensión e introducimos la celda
Registramos el valor de C.E. al momento que se ha estabilizado la lectura
Reportamos el valor en mmhos cm⁻¹ con un número entero y dos cifras decimales

ANEXO 6

DETERMINACIÓN DE LA M.O. POR EL MÉTODO DE WALKLEY Y BLACK MODIFICADO POR WALKLEY

El método se basa en la oxidación de la materia orgánica con dicromato de potasio, titulando el exceso de este con sulfato ferroso.

Reactivos

Solución dicromato de potasio ($K_2 Cr_2 O_7$) 1N (se disuelve 48.82 g de $K_2 Cr_2 O_7$ y se afora en agua destilada a 1000 ml.

Acido sulfúrico concentrado ($H_2 SO_4$)

Acido fosfórico concentrado (H_3PO_4)

Indicador de Di fenilamina. Disuelva 0.5 g de Di fenilamina en 20 ml de agua y añadir 100 ml de acido sulfúrico concentrado

Sulfato ferroso 1.0 M (aproximadamente). Disolver 278 g de $Fe SO_4 \cdot 7 H_2O$, en agua a la que previamente se le añaden 80 ml de $H_2 SO_4$ concentrado, enfriar y diluir en un litro. Esta solución debe ser valorada con $K_2 Cr_2 O_7$ 1 N antes de realizar la determinación.

Equipo y material

Matraces erlenmeyer de 500 ml

Bureta para $K_2 Cr_2 O_7$ (100 ml)

Bureta para $Fe SO_4 \cdot 7 H_2O$ (100 ml)

Pipeta volumétrica (10 ml)

Probeta de vidrio (25 ml)

Gotero para la di fenilamina

Procedimiento

Pesamos 0.5 g de suelo seco y pasado por un tamiz de 0.5 mm y colocamos en un matraz erlenmeyer de 500 ml, procesamos un blanco con reactivos cada 20 muestras.

Adicionamos exactamente 5 ml de dicromato de potasio 1 N girando el matraz cuidadosamente para que entre en contacto con el suelo

Agregamos cuidadosamente con una bureta 10 ml de acido sulfúrico concentrado a la suspensión, giramos nuevamente el matraz y agitamos durante 1 minuto

Dejamos reposar durante 30 minutos sobre una mesa de madera

Añadimos 100 ml de agua destilada

Añadimos 5 ml de acido fosfórico concentrado

Adicionamos 5 gotas de indicador de di fenilamina

Titulamos la disolución con sulfato ferroso gota a gota hasta un punto verde claro, con la ayuda de una bureta de 100 ml

Se anota el gasto del sulfato ferroso utilizado en cada una de las muestras como en las pruebas de blanco

ANEXO 7

DETERMINACIÓN DE LA TEXTURA POR EL MÉTODO DE BOUYOUCOS

También conocido como el método del hidrómetro, se basa en la medición de la densidad relativa de la solución suelo debidamente dispersada, agitada y considerando los tiempos de medición propuestos.

Reactivos

Agua oxigenada al 30%

Oxalato de sodio saturado (disolver 30 g de oxalato de sodio en 1 l de agua)

Meta silicato de sodio con 36 g L⁻¹ de lectura en el hidrómetro. Disolver 50 g de meta silicato de sodio en 1 litro de agua, ajustar la solución hasta que se obtenga 36 con el hidrómetro

Hexametáfosfato de sodio (clagón). Disolver 50 g de (Na₃PO₃)₆, en agua destilada y aforar en un litro

Agua destilada

Equipo y materiales

Hidrómetro de Bouyoucos con escala 0-60

Probetas de 1000 cc ó Cilindro de Bouyoucos

Vasos de precipitados de 250 y 500 ml

Agitador con motor para dispersión

Agitador de mano

Termómetro de -10 a 110 °C

Picetas

Procedimiento

Se inicio pesando 60 g de suelo de cada muestra en los vasos de precipitados de 500 ml, se agregó 40 ml de agua oxigenada y se dejo evaporar hasta sequedad, se volvió a colocar otros 40 ml y solo en algunas muestras se realizo una tercera vez al determinar que aun había efervescencia.

Seguido se peso 50 gr de suelo y se coloco en un vaso de precipitados de 250 ml, se adiciono agua hasta cubrir la superficie con una lamina de 2 cm. Se agregó 5 ml de oxalato de sodio y 5 ml de meta silicato de sodio y se dejo reposar 30 minutos.

Se paso las muestras de los vasos de precipitados a las copas del agitador mecánico, pasando todo el material con ayuda de la piceta, se activó el agitador por 15 minutos, terminado este tiempo se paso el contenido a una probeta de 1000 cc, enjuagando la copa con la piceta.

Se agregó agua destilada hasta aforar los 1000 cc en las probetas. Después de 5 minutos de reposo se metió el agitador manual por 1 minuto, luego se tomo la primera lectura a los 40 segundos y la segunda a las 2 horas de terminada la agitación manual. También se tomo la lectura de la temperatura de las muestras y de las soluciones testigo.

Para la obtención de los valores se corrigió por temperatura la lectura tomada y luego se calculo el porcentaje de arena limo y arcilla, clasificando de acuerdo al triangulo de texturas siguiente.

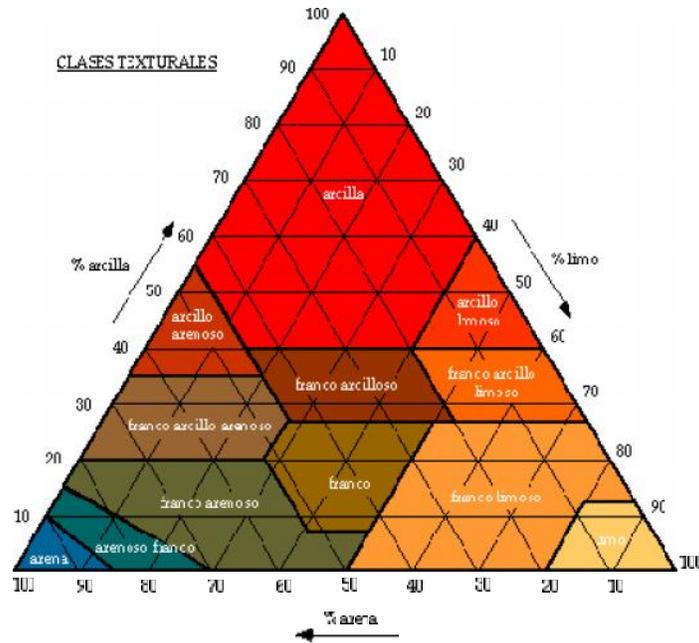


Figura a. Triángulo de texturas

ANEXO 8

CÓDIGO DEL PROGRAMA DE RIEGO DIFERENCIADO

```
import os, sys, Image, serial, time, math
from PyQt4 import QtGui, QtCore
from principal_form import Ui_MainWindow
global ser,pto,x0,y0,x1,y1,tol,radio,radio_tol,factor,val,offsetx,offsety, tiempo_riego, tiempo_valvu
class main_principal(QtGui.QMainWindow):
    def __init__(self):
        QtGui.QMainWindow.__init__(self)
        self.main_window = Ui_MainWindow()
        self.main_window.setupUi(self)
        self.timer = QtCore.QTimer(self)
        self.timer.timeout.connect(self._timer)
        self.timer2 = QtCore.QTimer(self)
        self.timer2.timeout.connect(self._timer2)
        self.timer3 = QtCore.QTimer(self)
        self.timer3.timeout.connect(self._timer3)
        self.time = QtCore.QTime(0,0,0,0)
        try:
            pt = open("puertoConFigurado.txt",'r')
            self.main_window.lineEdit.setText(pt.readline())
            pt.close()
        except:
            pt = open("puertoConFigurado.txt",'w')
            pt.write('COM1')
            self.main_window.lineEdit.setText('COM1')
            pt.close()
        self.ser=serial.Serial()
        self.ser.baudrate = 9600
        self.ser.timeout=0.08
        self.pto=0
        self.histo = open("Log\%d%02d%02d.txt"%(time.localtime()[3:6]),'a')
        self.histo.write('-----Inicio de sesion: %02d:%02d:%02d-----\n\n'%(time.localtime()[3:6]))
        self.histo.close()
        self._cargar_tabla()
        self._cargar_valvulas()
        self._secciones_aceptar()
        self._cargar_riego()
        self._riego_aceptar()
        self.main_window.biniar.setEnabled(True)
        self.main_window.bdetener.setEnabled(False)
        self.main_window.bgoogle.setEnabled(True)
        self.tiempo_riego = 0.0001
        self.riego_on = ['0','0','0','0','0','0']
```

```
        pixmap = QtGui.QPixmap('98.bmp')
        sc = QtGui.QGraphicsScene()
        sc.addPixmap(pixmap)
        self.main_window.fondo.setScene(sc)
        #*****
    def _timer3(self):
        self.tiempo_riego+=1
        if self.tiempo_riego > self.intervalo:
            self.tiempo_riego = 0.0001
        if self.tiempo_riego <= self.riego1:
            self.riego_on[1] = '1'
        else:
            self.riego_on[1] = '0'
        self.main_window.lriego1_on.setText(self.riego_on[1])
        if self.tiempo_riego <= self.riego2:
            self.riego_on[2] = '1'
        else:
            self.riego_on[2] = '0'
        self.main_window.lriego2_on.setText(self.riego_on[2])
        if self.tiempo_riego <= self.riego3:
            self.riego_on[3] = '1'
        else:
            self.riego_on[3] = '0'
        self.main_window.lriego3_on.setText(self.riego_on[3])
        if self.tiempo_riego <= self.riego4:
            self.riego_on[4] = '1'
        else:
            self.riego_on[4] = '0'
        self.main_window.lriego4_on.setText(self.riego_on[4])
        if self.tiempo_riego <= self.riego5:
            self.riego_on[5] = '1'
        else:
            self.riego_on[5] = '0'
        self.main_window.lriego5_on.setText(self.riego_on[5])
        qp = QtGui.QPainter()
        pixmap = QtGui.QPixmap('01.bmp')
        qp.begin(pixmap)
        qp.setPen(QtCore.Qt.white)
        qp.drawLine(5+(self.tiempo_riego*self.ff),0,5+(self.tiempo_riego*self.ff),60)
        qp.end()
        scenee1 = QtGui.QGraphicsScene()
        scenee1.addPixmap(pixmap)
```

```

self.main_window.graphicsView_1.setScene(scenee1)
pixmap = QtGui.QPixmap('02.bmp')
qp.begin(pixmap)
qp.setPen(Qt.Core.Qt.white)
qp.drawLine(5+(self.tiempo_riego*self.ff),0,5+(self.tiempo_riego*self.ff),60)
qp.end()
scenee2 = QtGui.QGraphicsScene()
scenee2.addPixmap(pixmap)
self.main_window.graphicsView_2.setScene(scenee2)
pixmap = QtGui.QPixmap('03.bmp')
qp.begin(pixmap)
qp.setPen(Qt.Core.Qt.white)
qp.drawLine(5+(self.tiempo_riego*self.ff),0,5+(self.tiempo_riego*self.ff),60)
qp.end()
scenee3 = QtGui.QGraphicsScene()
scenee3.addPixmap(pixmap)
self.main_window.graphicsView_3.setScene(scenee3)
pixmap = QtGui.QPixmap('04.bmp')
qp.begin(pixmap)
qp.setPen(Qt.Core.Qt.white)
qp.drawLine(5+(self.tiempo_riego*self.ff),0,5+(self.tiempo_riego*self.ff),60)
qp.end()
scenee4 = QtGui.QGraphicsScene()
scenee4.addPixmap(pixmap)
self.main_window.graphicsView_4.setScene(scenee4)
pixmap = QtGui.QPixmap('05.bmp')
qp.begin(pixmap)
qp.setPen(Qt.Core.Qt.white)
qp.drawLine(5+(self.tiempo_riego*self.ff),0,5+(self.tiempo_riego*self.ff),60)
qp.end()
scenee5 = QtGui.QGraphicsScene()
scenee5.addPixmap(pixmap)
self.main_window.graphicsView_5.setScene(scenee5)
#*****
def _timer2(self):
    self.main_window.progressBar.setValue(int(self.time.elapsed())/20)
#*****
def _timer(self):
    #self.main_window.plainTextEdit.appendPlainText(str(self.time.currentTime()))
    self.histo = open('Log\%d%02d%02d.txt'%(time.localtime()[3:]), 'a')
    self.time.restart()
    self.ser.write('$GPSRD\r')
    gps_txt = open('gps.txt', 'w')
    for n in range(25):
        gps_txt.write(self.ser.readline())
    gps_txt.close()
    self.ser.write('$GSTOP\r')
    gpgsa='0,0,0,0,0'
    gpgga='0,0,0,0,0'
    gps_txt=open('gps.txt', 'r')
    gps_txt.readline()
    gps_txt.readline()
    for n in range(23):
        msg = gps_txt.readline()
        cadena = msg.split(',')
        if cadena[0]=='$GPGSA':
            gpgsa = msg
        if cadena[0]=='$GPGGA':
            gpgga = msg
    gps_txt.close()
    if gpgsa=='' or gpgga=='':
        self.main_window.plainTextEdit.appendPlainText('Sin senal')
        self.histo.write('%02d:%02d:%02d'%(time.localtime()[3:6]))
        self.histo.write('Sin senal\r\n')
        return
    else:
        cadena = gpgsa.split(',')
        if cadena[2]=='1':
            self.main_window.plainTextEdit.appendPlainText('Adquiriendo senal')
            self.histo.write('%02d:%02d:%02d'%(time.localtime()[3:6]))
            self.histo.write('Adquiriendo senal\r\n')
            return
        else:
            try:
                cadena = gpgga.split(',')
                #print cadena
                if cadena[3] == 'N':
                    cadena[2]='+'+cadena[2]
                    f_lat = 1
                if cadena[3] == 'S':
                    cadena[2]='-'+cadena[2]
                    f_lat = -1
                if cadena[5] == 'E':
                    cadena[4]='+'+cadena[4]
                    f_lng = 1
                if cadena[5] == 'W':
                    cadena[4]='-'+cadena[4]
                    f_lng = -1
                lat = float(cadena[2][0:3]) + (float(cadena[2][3:])/60) * f_lat
                lng = float(cadena[4][0:4]) + (float(cadena[4][4:])/60) * f_lng
                gps = [lat,lng]
            except:
                self.main_window.plainTextEdit.appendPlainText('Adquiriendo senal')
                self.histo.write('%02d:%02d:%02d'%(time.localtime()[3:6]))
                self.histo.write('Adquiriendo senal\r\n')
                return
            self.pto+=1
            self.main_window.plainTextEdit.appendPlainText(str('%05d: %self.pto) + str('lat %.6f%lat) +
            unichr(176)
                +str(' long %.6f%lng) + unichr(176))
            self.histo.write('%02d:%02d:%02d'%(time.localtime()[3:6]))
            self.histo.write(str('%05d: %self.pto) + str('lat %.6f%lat)+str(' long %.6f%lng))
            self.ser.write('$DSPLY%.6f%.6f\r'%(lat,lng))
            time.sleep(.1)
            #imag = QtGui.QImage('00.bmp')
            pixmap = QtGui.QPixmap('00.bmp')
            qp = QtGui.QPainter()
            qp.begin(pixmap)
            qp.setPen(Qt.Core.Qt.magenta)
            qp.drawEllipse((self.factor*gps[1])-self.offsetx)-1,520-(self.factor*gps[0])-self.offsety)-1,3,3)
            #imag.save('00.bmp')
            qp.end()
            scenee = QtGui.QGraphicsScene()
            #pixmap = QtGui.QPixmap('00.bmp')#.transformed(QtGui.QTransform().scale(1, -1))
            scenee.addPixmap(pixmap)
            self.main_window.graphicsView.setScene(scenee)
            if self.main_window.bgoogle.isChecked():
                self._earth_open('GPS')
                self._earth_punto('GPS','gps',
                    [
                        str(gps[1])+' '+str(gps[0])+';', '0'
                    ])
                self._earth_close('GPS')
            try:
                os.startfile('GPS.kml')
                time.sleep(.25)
                os.startfile('Area_gps.kml')
            except:
                print 'fallo, fallo'
            x=gps[1]-self.x0
            y=gps[0]-self.y0
            radio = math.sqrt(x**2 + y**2)
            sec_str='t-'
            if (self.radio - self.radio_tol) < radio < (self.radio+self.radio_tol):
                alpha = math.degrees(math.atan(math.fabs(y)/math.fabs(x)))
                if x<0 and y>0:
                    alpha = 180 - alpha
                elif x<0 and y<0:
                    alpha = 180 + alpha
                elif x>0 and y<0:
                    alpha = 360 - alpha
                angle=0
                dato=0
                cadena='0b'
            for seccion in range(0,self.main_window.tableWidget.rowCount()):
                dato += float(self.main_window.tableWidget.item(seccion,0).text())
                if angle < alpha < dato:
                    sec_str=' secGPS: %d%(seccion+1)
                try:
                    for n in range(self.main_window.tableWidget.columnCount()-1,2,-1):
                        try:
                            numero = int(self.main_window.tableWidget.item(seccion,n).text())
                            if 1 <= numero <= 5:
                                cadena+=self.riego_on[numero]
                            else:
                                cadena+='0'
                            if self.riego_on[numero] == '1':
                                try:
                                    self.tiempo_valvu[n-3]+=2
                                except:
                                    erro = open('Log\E%d%02d%02d.txt'%(time.localtime()[3:]), 'a')
                                    erro.write('E%03d %n)
                                    erro.write('%02d:%02d:%02d\r\n'%(time.localtime()[3:6]))
                                    erro.close()
                                except:
                                    cadena+='0'
                                cadena_hex = '%x'%int(cadena,2)
                                self.ser.write('$VALVU')
                                for n in range (0,len(cadena_hex),2):
                                    try:
                                        self.ser.write('%c'%int(cadena_hex[n]+cadena_hex[n+1],16))
                                    except:

```

```

        self.ser.write("%c"%int(cadena_hex[n],16))
        self.ser.write('\r')
    except:
        print 'fallo valvu'
        self.main_window.lineasal.setText(cadena)
        angle+=float(self.main_window.tableWidget.item(seccion,0).text())
self.main_window.plainTextEdit.insertPlainText(sec_str)
self.histo.write(sec_str+"\r\n")
#print self.time.currentTime()
#*****
def _cargar_tabla(self):
self.main_window.tableWidget.setRowCount(0)
for row in range(0,self.main_window.tableWidget.rowCount()):
    self.main_window.tableWidget.removeRow(row)
row=0
error = ""
try:
    arch = open("Tabla.txt",'r')
    linea = arch.readline()#centro
    cadena = linea.split(',')
    float(cadena[0])
    self.main_window.x0.setText(cadena[0])
    float(cadena[1])
    self.main_window.y0.setText(cadena[1])
    linea = arch.readline()#Largo, distancia valvulas
    cadena = linea.split(',')
    float(cadena[0])
    self.main_window.largo.setText(cadena[0])
    float(cadena[1])
    self.main_window.dist.setText(cadena[1])
    linea = arch.readline()#tolerancia, valvulas
    cadena = linea.split(',')
    float(cadena[0])
    self.main_window.tol.setText(cadena[0])
    float(cadena[1])
    self.main_window.nvalvulas.setText(cadena[1])
    while (self.main_window.tableWidget.columnCount()-3)< int(self.main_window.nvalvulas.text()):
        self.main_window.tableWidget.insertColumn(self.main_window.tableWidget.columnCount())

    while (self.main_window.tableWidget.columnCount()-3)> int(self.main_window.nvalvulas.text()):
        self.main_window.tableWidget.removeColumn(self.main_window.tableWidget.columnCount()-
1)
for n in range(3,self.main_window.tableWidget.columnCount()):
    self.main_window.tableWidget.setHorizontalHeaderItem(n,QtGui.QTableWidgetItem("Valvula
%s"%str(n-2)))
while True:
    linea = arch.readline()
    if linea=="":
        break
    self.main_window.tableWidget.insertRow(row)
    cadena = linea.split(',')
    for col in range (self.main_window.tableWidget.columnCount()):
        cell = QtGui.QTableWidgetItem(QtCore.QString(cadena[col]))
        try:
            float(cell.text())
        except:
            error = error + '('+ str(row)+' '+ str(col)+' '
            self.main_window.tableWidget.setItem(row, col, cell)
        row+=1
if error != "":
    QtGui.QMessageBox.critical(self,'Mensaje',
        "Valores no numericos en tabla \n %s" % error,
        QtGui.QMessageBox.Ok)
if self.main_window.tableWidget.rowCount() == 0:
    self.main_window.bborrar.setEnabled(False)
    arch.close()
    self.main_window.tableWidget.selectRow(0)
except:
    QtGui.QMessageBox.critical(self,'Mensaje',"Tabla no valida \n Generando nueva tabla",
        QtGui.QMessageBox.Ok)
try:
    if arch.closed == False:
        arch.close()
    except:
        arch = open('Tabla.txt','w')
        arch.close()
#*****
def _iniciar(self):
try:
    float(self.main_window.tableWidget.item(0,0).text())
except:
    QtGui.QMessageBox.critical(self,'Mensaje',
        "Tabla de datos vacia",
        QtGui.QMessageBox.Ok)
return
self.ser.port = str(self.main_window.lineEdit.text())

```

```

try:
    self.ser.open()
    pt = open('puertoConFigurado.txt','w')
    pt.write(self.main_window.lineEdit.text())
    pt.close()
    self.main_window.lineEdit.setEnabled(False)
except:
    QtGui.QMessageBox.critical(self,'Mensaje',
        "Puerto %s\n No se puede abrir" % self.main_window.lineEdit.text(),
        QtGui.QMessageBox.Ok)
return
self.main_window.biniciar.setEnabled(False)
self.main_window.bdetener.setEnabled(True)
self.main_window.bgoogle.setEnabled(False)
lista = [[0 for j in range(self.main_window.tableWidget.columnCount())]
for i in range(self.main_window.tableWidget.rowCount())]
for i in range(0,self.main_window.tableWidget.rowCount()):
    for j in range(0,self.main_window.tableWidget.columnCount()):
        dato = self.main_window.tableWidget.item(i,j)
        lista[i][j]=(float(dato.text()))
im = Image.new("RGB", (520, 520))
im.save("00.bmp", "BMP")
imag = QtGui.QImage("00.bmp")
qp = QtGui.QPainter()
qp.begin(imag)
qp.setPen(QtCore.Qt.red)
poligono = QtGui.QPolygonF()
alpha = 0
beta=0
limite = 0
qp.setPen(QtCore.Qt.cyan)
if self.main_window.bgoogle.isChecked():
    self_earth_open('Area_gps')
for i in range(0,self.main_window.tableWidget.rowCount()):
    polist = []
    limite+=lista[i][0]*(math.pi/180)
    beta = alpha
    while alpha < limite:
        x=math.cos(alpha)*(self.radio + self.radio_tol)
        y=math.sin(alpha)*(self.radio + self.radio_tol)
        polist.append((x,y))
        alpha +=0.01
    alpha = limite
    x=math.cos(alpha)*(self.radio + self.radio_tol)
    y=math.sin(alpha)*(self.radio + self.radio_tol)
    polist.append((x,y))
    while alpha > beta:
        x=math.cos(alpha)*(self.radio - self.radio_tol)
        y=math.sin(alpha)*(self.radio - self.radio_tol)
        polist.append((x,y))
        alpha -=0.01
    alpha = beta
    x=math.cos(alpha)*(self.radio - self.radio_tol)
    y=math.sin(alpha)*(self.radio - self.radio_tol)
    polist.append((x,y))
    alpha += lista[i][0]*(math.pi/180)
for n in polist:
    poligono.append(QtCore.QPointF(260+(n[0]*self.factor), 260-(n[1]*self.factor)))
qp.drawPolygon(poligono)
poligono.clear()
if self.main_window.bgoogle.isChecked():
    a=[]
    for n in polist:
        a.append(str(n[0]+self.x0)+",")
        a.append(str(n[1]+self.y0)+",0 ")
    a.append(a[0])
    a.append(a[1])
    self_earth_marca('Area_gps','Area_gps'+str(i),9,a)
if self.main_window.bgoogle.isChecked():
    self_earth_close('Area_gps')
try:
    os.startfile('Area_gps.kml')
    time.sleep(.25)
except:
    print 'fallo'
poligono = QtGui.QPolygonF()
if self.main_window.bgoogle.isChecked():
    self_earth_open('Area_riego')
a,b = self._puntos('de',self.dist/2, [self.y0,self.x0])
dist_v= math.sqrt( ((self.x0-b)**2)+((self.y0-a)**2))
for m in range (int(self.val)):
    radio_v=float(self.dist_val[m])
    alpha = 0
    beta=0
    limite = 0
    qp.setPen(QtCore.Qt.red)

```



```

except:
    QtGui.QMessageBox.critical(self,'Mensaje',"Valor no numerico\nCentro
lat",QtGui.QMessageBox.Ok)
    self.y0=19.464301
    self.main_window.y0.setText("19.464301")
try:
    self.largo =float(self.main_window.largo.text())
except:
    QtGui.QMessageBox.critical(self,'Mensaje',"Valor no numerico\nExtension",QtGui.QMessageBox.Ok)
    self.largo=200
    self.main_window.largo.setText("200")
try:
    self.dist =float(self.main_window.dist.text())
except:
    QtGui.QMessageBox.critical(self,'Mensaje',"Valor no numerico\nDistancia",QtGui.QMessageBox.Ok)
    self.dist=2.7
    self.main_window.dist.setText("2.7")
try:
    self.tol = float(self.main_window.tol.text())
except:
    QtGui.QMessageBox.critical(self,'Mensaje',"Valor no numerico\nTolerancia",QtGui.QMessageBox.Ok)
    self.tol=0
    self.main_window.tol.setText("0")
try:
    self.val = float(self.main_window.nvalvulas.text())
except:
    QtGui.QMessageBox.critical(self,'Mensaje',"Valor no numerico\nNumero de
valvulas",QtGui.QMessageBox.Ok)
    self.val=0
    self.main_window.nvalvulas.setText("0")
arch.write(self.main_window.x0.text()+self.main_window.y0.text()+',\n')
arch.write(self.main_window.largo.text()+','+ self.main_window.dist.text()+',\n')
arch.write(self.main_window.tol.text()+','+ self.main_window.nvalvulas.text()+',\n')
while (self.main_window.tableWidget.columnCount()-3)< int(self.main_window.nvalvulas.text()):
    self.main_window.tableWidget.insertColumn(self.main_window.tableWidget.columnCount())
    for n in range (self.main_window.tableWidget.rowCount()):
        cell = QtGui.QTableWidgetItem(QtCore.QString('0'))
        self.main_window.tableWidget.setItem(n, self.main_window.tableWidget.columnCount()-1,
cell)
while (self.main_window.tableWidget.columnCount()-3)> int(self.main_window.nvalvulas.text()):
    self.main_window.tableWidget.removeColumn(self.main_window.tableWidget.columnCount()-1)
    angulo = 0
    for i in range(0,self.main_window.tableWidget.rowCount()):
        try:
            angulo += float(self.main_window.tableWidget.item(i,0).text())
            x2=math.cos(angulo)*(self.radio)
            y2=math.sin(angulo)*(self.radio)
            cell = QtGui.QTableWidgetItem(QtCore.QString(str(self.x0+x2)))
            self.main_window.tableWidget.setItem(i, 2, cell)
            cell = QtGui.QTableWidgetItem(QtCore.QString(str(self.y0+y2)))
            self.main_window.tableWidget.setItem(i, 1, cell)
        except:
            x2=0
    angulo = 0
    for i in range(0,self.main_window.tableWidget.rowCount()):
        linea=""
        lista=[]
        for j in range(0,self.main_window.tableWidget.columnCount()):
            try:
                dato = self.main_window.tableWidget.item(i,j)

            try:
                lista.append(float(dato.text()))
                lista_ok = 1
            except:
                error = error + str(i+1) + ' '
                dato = ''
                lista_ok = 0
            linea = linea + dato.text()+','
            if j==self.main_window.tableWidget.columnCount()-1:
                linea = linea + '\r\n'
            except:
                linea=""
                break
        if lista_ok == 1:
            angulo += float(lista[0])
            if angulo > 360:
                error2 = error2 + str(i+1) + ' '
                linea = ''
            for n in range (3,self.main_window.tableWidget.columnCount()):
                if lista[n]<1 or lista[n]>5 or math.fmod(lista[n],1)>0:
                    error3 = error3 + str(i+1) + ':'+str(n)+' '
            arch.write(linea)
arch.close()
if error != "":
    QtGui.QMessageBox.critical(self,'Mensaje',
"Valores no numericos en lineas \n %s\n ... Eliminadas" % error,
QtGui.QMessageBox.Ok)
if error2 != "":
    QtGui.QMessageBox.critical(self,'Mensaje',
"Angulo mayor de 360 \n %s\n ... Eliminadas" % error2,
QtGui.QMessageBox.Ok)
if error3 != "":
    QtGui.QMessageBox.warning(self,'Mensaje',
"Riego en lineas \n %s\n No definido" % error3,
QtGui.QMessageBox.Ok)
self.y1,self.x1 = self._puntos('de',self.largo, [self.y0,self.x0])
self.radio= math.sqrt( ((self.x0-self.x1)**2)+((self.y0-self.y1)**2))
self.radio_tol = self.radio*(self.tol/100)
self.factor = 250 / (self.radio + self.radio_tol)
self.offsetx = (self.x0-(self.radio+self.radio_tol))*self.factor-10
self.offsety = (self.y0-(self.radio+self.radio_tol))*self.factor-10
if self.histo.closed == False:
    self.histo.write("\nTiempo de valvulas encendidas [segundos]:\n")
    self.histo.write(str(self.tiempo_valvu)+'\r\n\n')
    self.histo.close()
self.tiempo_valvu = [0 for n in range(int(self.val))]
self._cargar_tabla()
self._valvulas_aceptar()
#*****
def _secciones_cancelar(self):
    self._cargar_tabla()
#*****
def _riego_aceptar(self):
    self._detener()
    arch = open('Riego.txt','w')
    try:
        self.intervalo = float(self.main_window.intervalo.text())
    except:
        QtGui.QMessageBox.critical(self,'Mensaje',"Valor no numerico\nIntervalo",QtGui.QMessageBox.Ok)
        self.intervalo=60
        self.main_window.intervalo.setText(str(self.intervalo))
    self.ff=350/self.intervalo
    try:
        self.riego1 = float(self.main_window.riego1.text())
        if self.riego1 > self.intervalo:
            self.riego1=self.intervalo
            self.main_window.riego1.setText(str(self.riego1))
    except:
        QtGui.QMessageBox.critical(self,'Mensaje',"Valor no numerico\nRiego1",QtGui.QMessageBox.Ok)
        self.riego1=0.2*self.intervalo
        self.main_window.riego1.setText(str(self.riego1))
    self.main_window.lriego1.setText(str(self.intervalo-self.riego1))
    try:
        self.riego2 =float(self.main_window.riego2.text())
        if self.riego2 > self.intervalo:
            self.riego2=self.intervalo
            self.main_window.riego2.setText(str(self.riego2))
    except:
        QtGui.QMessageBox.critical(self,'Mensaje',"Valor no numerico\nRiego2",QtGui.QMessageBox.Ok)
        self.riego2=0.4*self.intervalo
        self.main_window.riego2.setText(str(self.riego2))
    self.main_window.lriego2.setText(str(self.intervalo-self.riego2))
    try:
        self.riego3 =float(self.main_window.riego3.text())
        if self.riego3 > self.intervalo:
            self.riego3=self.intervalo
            self.main_window.riego3.setText(str(self.riego3))
    except:
        QtGui.QMessageBox.critical(self,'Mensaje',"Valor no numerico\nRiego3",QtGui.QMessageBox.Ok)
        self.riego3=0.6*self.intervalo
        self.main_window.riego3.setText(str(self.riego3))
    self.main_window.lriego3.setText(str(self.intervalo-self.riego3))
    try:
        self.riego4 =float(self.main_window.riego4.text())
        if self.riego4 > self.intervalo:
            self.riego4=self.intervalo
            self.main_window.riego4.setText(str(self.riego4))
    except:
        QtGui.QMessageBox.critical(self,'Mensaje',"Valor no numerico\nRiego4",QtGui.QMessageBox.Ok)
        self.riego4=0.8*self.intervalo
        self.main_window.riego4.setText(str(self.riego4))
    self.main_window.lriego4.setText(str(self.intervalo-self.riego4))
    try:
        self.riego5 =float(self.main_window.riego5.text())
        if self.riego5 > self.intervalo:
            self.riego5=self.intervalo
            self.main_window.riego5.setText(str(self.riego5))

```

```

except:
    QtGui.QMessageBox.critical(self,'Mensaje',"Valor no numerico\nRiego5",QtGui.QMessageBox.Ok)
    self.riego5=self.intervalo
    self.main_window.riego5.setText(str(self.riego5))
self.main_window.lriego5.setText(str(self.intervalo-self.riego5))
arch.write(self.main_window.intervalo.text()+',\n')
arch.write(self.main_window.riego1.text()+',\n')
arch.write(self.main_window.riego2.text()+',\n')
arch.write(self.main_window.riego3.text()+',\n')
arch.write(self.main_window.riego4.text()+',\n')
arch.write(self.main_window.riego5.text()+',\n')
arch.close()
self._cargar_riego()
#####
def _riego_cancelar(self):
    self._cargar_riego()
#####
def _cargar_riego(self):
    try:
        arch = open('Riego.txt','r')
        linea = arch.readline()#intervalo
        cadena = linea.split(',')
        float(cadena[0])
        self.main_window.intervalo.setText(cadena[0])
        linea = arch.readline()#riego1
        cadena = linea.split(',')
        float(cadena[0])
        self.main_window.riego1.setText(cadena[0])
        linea = arch.readline()#riego2
        cadena = linea.split(',')
        float(cadena[0])
        self.main_window.riego2.setText(cadena[0])
        linea = arch.readline()#riego3
        cadena = linea.split(',')
        float(cadena[0])
        self.main_window.riego3.setText(cadena[0])
        linea = arch.readline()#riego4
        cadena = linea.split(',')
        float(cadena[0])
        self.main_window.riego4.setText(cadena[0])
        linea = arch.readline()#riego5
        cadena = linea.split(',')
        float(cadena[0])
        self.main_window.riego5.setText(cadena[0])
        arch.close()
    except:
        QtGui.QMessageBox.critical(self,'Mensaje',"Riego no valido \n Generando nuevo riego",
            QtGui.QMessageBox.Ok)
        try:
            if arch.closed == False:
                arch.close()
        except:
            arch = open('Riego.txt','w')
            arch.close()
#####
def _cargar_valvulas(self):
    try:
        self.x0=float(self.main_window.x0.text())
    except:
        QtGui.QMessageBox.critical(self,'Mensaje',"Valor no numerico\nCentro
long",QtGui.QMessageBox.Ok)
        self.x0=-98.915145
        self.main_window.x0.setText("-98.915145")
    try:
        self.y0=float(self.main_window.y0.text())
    except:
        QtGui.QMessageBox.critical(self,'Mensaje',"Valor no numerico\nCentro
lat",QtGui.QMessageBox.Ok)
        self.y0=19.464301
        self.main_window.y0.setText("19.464301")
        self.main_window.tableWidget_2.setRowCount(0)
        row=0
        error = ""
        self.dist_val=[]
    try:
        arch = open('Valvulas.txt','r')

        while True:
            linea = arch.readline()
            if linea=="":
                break
            self.main_window.tableWidget_2.insertRow(row)
            cadena = linea.split(',')
            a,b = self._puntos('de',float(cadena[0]), [self.y0,self.x0])
            radio= math.sqrt( ((self.x0-b)**2)+((self.y0-a)**2))
            self.dist_val.append(radio)

            cell = QtGui.QTableWidgetItem(QtCore.QString(cadena[0]))
            try:
                float(cell.text())
            except:
                error = error + '(' + str(row)+ ' ) '
            self.main_window.tableWidget_2.setItem(row,0, cell)
            row+=1
        if error != "":
            QtGui.QMessageBox.critical(self,'Mensaje',
                "Valores no numericos en tabla \n %s" % error,
                QtGui.QMessageBox.Ok)
        arch.close()
    except:
        QtGui.QMessageBox.critical(self,'Mensaje',"Tabla no valida \n Generando nueva tabla de
distancias",
            QtGui.QMessageBox.Ok)
        try:
            if arch.closed == False:
                arch.close()
        except:
            arch = open('Valvulas.txt','w')
            arch.close()
#####
def _valvulas_aceptar(self):
    self._detener()
    error = ""
    for row in range(int(self.val)):
        dato = self.main_window.tableWidget_2.item(0,row)
        try:
            float(dato.text())
        except:
            error = error + '(' + str(row)+ ' ) '
    arch = open('Valvulas.txt','w')
    if error != "":
        QtGui.QMessageBox.critical(self,'Mensaje',
            "Valores no numericos en lineas \n %s\n ... Generando tabla de distancias"
            % error,QtGui.QMessageBox.Ok)
    for row in range(int(self.val)):
        arch.write('%f,\n'%(self.largo-self.dist*row))
    else:
        for row in range(int(self.val)):
            dato = self.main_window.tableWidget_2.item(0,row)
            arch.write(dato.text()+',\n')
    arch.close()
    self._cargar_valvulas()
#####
def _valvulas_cancelar(self):
    self._cargar_valvulas()
#####
def _earth_open(self,nombre):
    nombre += '.kml'
    gps=open(nombre,'w')
    seq = [
        '<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>\n',
        '<kml',
        'xmlns:gx="http://www.google.com/kml/ext/2.2" xmlns="http://www.opengis.net/kml/2.2"',
        'xmlns:atom="http://www.w3.org/2005/Atom">\n',
        '<Document>\n',
        '  <name>+ nombre +</name>\n',
        '  <Style id="sn_ylw-pushpin">\n',
        '    <PolyStyle>\n',
        '      <fill>0</fill>\n',
        '    </PolyStyle>\n',
        '  </Style>'
    ]
    gps.writelines(seq)
    gps.close()
#####
def _earth_close(self,nombre):
    nombre += '.kml'
    gps=open(nombre,'a')
    seq = [
        '</Document>\n',
        '</kml>'
    ]
    gps.writelines(seq)
    gps.close()
#####
def _earth_marca(self,nombre,marca,color,coord):
    nombre += '.kml'
    gps=open(nombre,'a')
    seq = [
        '<Placemark>\n',
        '  <name>+ marca +</name>\n',
        '  <Style>\n',
        '    <LineStyle>'
    ]

```

```

    ]
gps.writelines(seq)
if color==0:
    seq = [' <color>ffffff</color>']#blanco
elif color==1:
    seq = [' <color>ff0000</color>']#rojo
elif color==2:
    seq = [' <color>ff00ff</color>']#naranja
elif color==3:
    seq = [' <color>ff00ff55</color>']#verde
elif color==4:
    seq = [' <color>ffff0000</color>']#azul
elif color==5:
    seq = [' <color>ff7faaaa</color>']#gris
else:
    seq = [' <color>ffffff55</color>']#magenta
gps.writelines(seq)
seq = [
    '</LineStyle>\n',
    '<PolyStyle>\n',
    '    <fill>0</fill>\n',
    '</PolyStyle>\n',
    '</Style>\n',
    '<Polygon>\n',
    '    <tessellate>1</tessellate>\n',
    '    <outerBoundaryIs>\n',
    '        <LinearRing>\n',
    '            <coordinates>\n',
    '                '
    ]
gps.writelines(seq)
gps.writelines(coord)
seq = [
    '        </coordinates>\n',
    '    </LinearRing>\n',
    '    </outerBoundaryIs>\n',
    '    </Polygon>\n',
    '    </Placemark>'
    ]
gps.writelines(seq)
def _earth_punto(self,nombre,punto,coord):
    nombre += '.kml'
    gps=open(nombre,'a')
    seq = [
        '<Placemark>\n',
        '    <name>+ punto +</name>\n',
        '    <Point>\n',
        '        <coordinates>\n',
        '            '
        ]
gps.writelines(seq)
gps.writelines(coord)
seq = [
    '        </coordinates>\n',
    '    </Point>\n',
    '    </Placemark>'
    ]
gps.writelines(seq)
def _distancia_vincenty(self,a,b):
    lat1, lng1 = math.radians(a[0]), math.radians(a[1])
    lat2, lng2 = math.radians(b[0]), math.radians(b[1])
    ELLIPSOIDS = {
    # model    major (km)  minor (km)  flattening
    'WGS-84':  (6378.137,  6356.7523142,  1 / 298.257223563),
    'GRS-80':  (6378.137,  6356.7523141,  1 / 298.257222101),
    'Airy (1830)': (6377.563396, 6356.256909,  1 / 299.3249646),
    'Intl 1924': (6378.388,  6356.911946,  1 / 297.0),
    'Clarke (1880)': (6378.249145, 6356.51486955, 1 / 293.465),
    'GRS-67':  (6378.1600, 6356.774719,  1 / 298.25)
    }
    ELLIPSOID = 'WGS-84'
    major, minor, f = ELLIPSOIDS[ELLIPSOID]
    delta_lng = lng2 - lng1
    reduced_lat1 = math.atan((1 - f) * math.tan(lat1))
    reduced_lat2 = math.atan((1 - f) * math.tan(lat2))
    sin_reduced1, cos_reduced1 = math.sin(reduced_lat1), math.cos(reduced_lat1)
    sin_reduced2, cos_reduced2 = math.sin(reduced_lat2), math.cos(reduced_lat2)
    lambda_lng = delta_lng
    lambda_prime = 2 * math.pi
    iter_limit = 20
    while abs(lambda_lng - lambda_prime) > 10e-12 and iter_limit > 0:
        sin_lambda_lng, cos_lambda_lng = math.sin(lambda_lng), math.cos(lambda_lng)
        sin_sigma = math.sqrt(
            (cos_reduced2 * sin_lambda_lng) ** 2 +
            (cos_reduced1 * sin_reduced2 -
                sin_reduced1 * cos_reduced2 * cos_lambda_lng) ** 2
        )
        if sin_sigma == 0:
            return 0 # Coincident points
        cos_sigma = (
            sin_reduced1 * sin_reduced2 +
            cos_reduced1 * cos_reduced2 * cos_lambda_lng
        )
        sigma = math.atan2(sin_sigma, cos_sigma)
        sin_alpha = (
            cos_reduced1 * cos_reduced2 * sin_lambda_lng / sin_sigma
        )
        cos_sq_alpha = 1 - sin_alpha ** 2
        if cos_sq_alpha != 0:
            cos2_sigma_m = cos_sigma - 2 * (
                sin_reduced1 * sin_reduced2 / cos_sq_alpha
            )
        else:
            cos2_sigma_m = 0.0 # Equatorial line
        C = f / 16. * cos_sq_alpha * (4 + f * (4 - 3 * cos_sq_alpha))
        lambda_prime = lambda_lng
        lambda_lng = (
            delta_lng + (1 - C) * f * sin_alpha * (
                sigma + C * sin_sigma * (
                    cos2_sigma_m + C * cos_sigma * (
                        -1 + 2 * cos2_sigma_m ** 2
                    )
                )
            )
        )
        iter_limit -= 1
    if iter_limit == 0:
        raise ValueError("Vincenty formula failed to converge!")
    u_sq = cos_sq_alpha * (major ** 2 - minor ** 2) / minor ** 2
    A = 1 + u_sq / 16384. * (
        4096 + u_sq * (-768 + u_sq * (320 - 175 * u_sq))
    )
    B = u_sq / 1024. * (256 + u_sq * (-128 + u_sq * (74 - 47 * u_sq)))
    delta_sigma = (
        B * sin_sigma * (
            cos2_sigma_m + B / 4. * (
                cos_sigma * (
                    -1 + 2 * cos2_sigma_m ** 2
                ) - B / 6. * cos2_sigma_m * (
                    -3 + 4 * sin_sigma ** 2
                )
            ) * (
                -3 + 4 * cos2_sigma_m ** 2
            )
        )
    )
    s = minor * A * (sigma - delta_sigma) * 1000
    return s
def _puntos(self,dir,dist,punto):
    otro = [punto[0],punto[1]]
    while True:
        e = dist - self._distancia_vincenty(punto,otro)
        if e<0:
            return otro
            break
        if dir == 'ar':
            otro[0]+=-0.000001
        elif dir == 'ab':
            otro[0]=0.000001
        elif dir == 'iz':
            otro[1]=0.000001
        elif dir == 'de':
            otro[1]+=-0.000001
        else:
            return 'no opcion'
def _main():
    app = QtGui.QApplication(sys.argv)
    main_window = main_principal()
    main_window.show()
    app.exec_()
    if main_window.histo.closed== False:
        main_window.histo.close()
        histo = open('Log\%d%02d%02d.txt'%(time.localtime()[3:]),'a')
        histo.write('\nTiempo de valvulas encendidas [segundos]:\n\n')
        histo.write(str(main_window.tiempo_valvu)+'\n\n')
        histo.write('-----Final de sesion: %02d:%02d:%02d-----\n\n'%(time.localtime()[3:6]))
        histo.close()
    if __name__ == "__main__":
        _main()

```