



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
PUEBLA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN**

**Sistema para estimar el Costo del Secuestro de  
Carbono usando Optimización Multiobjetivo y la  
Técnica de Colonia de Hormigas**

TESIS QUE PRESENTA:

**Minerva Aidee Díaz Romero**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**Ingeniero en Ciencias de la Computación**

TUTOR DE TESIS:

**Dra. Ma. de Lourdes Sandoval Solís**

**Enero de 2009**

## Resumen

El secuestro de carbono es esencialmente el proceso de transformación del carbono del aire (dióxido de carbono, o CO<sub>2</sub>) en carbono almacenado en el suelo. El dióxido de carbono es absorbido por las plantas a través del proceso de fotosíntesis, e incorporado en la planta como tejido vegetal. Cuando las plantas mueren, el carbono de las hojas, tallos y raíces se descompone en el suelo y se convierte en materia orgánica. Este es el proceso básico llamado secuestro de carbono.

El dióxido de carbono atmosférico, y otros gases de efecto invernadero absorben el calor que es reflejado desde la superficie de la tierra. Este incremento de calor conduce al calentamiento global. A través del **secuestro de carbono**, los niveles de dióxido de carbono atmosférico son reducidos con un incremento de los niveles de carbono del suelo.

Por otra parte, los problemas de optimización han sido sumamente estudiados, debido a la importancia que tienen en la práctica. Algunos problemas han logrado resolverse satisfactoriamente mediante métodos matemáticos, como la optimización lineal. Sin embargo, el problema general de optimización global no lineal permanece como no resuelto, dado que no existe ningún método determinista que garantice converger siempre al óptimo de una función objetivo arbitraria con restricciones arbitrarias. Por esa razón las heurísticas han tomado un gran auge.

Este trabajo presenta un software que pretende minimizar el costo del secuestro de carbono y al mismo tiempo maximizar la obtención de este el cual utiliza los datos proporcionados por el Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas del Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. La optimización se realiza utilizando la heurística de Colonia de Hormigas.



# INDICE

CONTENIDO	Pag.
Resumen.....,.....	II
Agradecimientos .....	IV
Índice .....	V
Índice de Tablas .....	VI
Índice de Figuras.....	VII
Introducción.....	1
1. El Fenómeno del Cambio Climático.....	3
1.1 Introducción.....	3
2. Puebla y cambio climático.....	8
2.1 Introducción.....	8
2.2 Impacto Socioeconómico.....	9
2.3 Solución al problema del Cambio Climático.....	13
3.La Colonia de Hormigas(Ant System).....	17
3.1 Introducción.....	17
3.2 Comportamiento real de las hormigas.....	19
3.3 Descripción de la metaheurística.....	24
3.3.1 Introducción a Optimización Multiobjetivo.....	24
3.3.2 Algoritmo.....	25
3.4 La Colonia de hormigas Clásica.....	27
3.5 La Colonia de hormigas bi-objetivo (BicriterionAnt).....	31
4. Diseño e implementación.....,.....	34
4.1 Diseño.....	34
4.2 Implementación.....	37
5. Pruebas.....	44
5.1 Soluciones Factibles.....	44
6.Conclusiones.....	60
Bibliografía.....	62

## Índice de tablas

1.1: Cartera Actual de Proyectos de MDL en México.....	6
4.1 Costos y Almacenamiento de Carbono por Municipio del Estado de Puebla sobre cafetales.....	34
4.2 Costos asociado al Almacenamiento de Carbono .....	35
4.3 Distancias de Carbono Almacenado por hectárea.....	35
4.4 Distancias del Costo de Carbono por hectárea.....	36
5.1 Estimación del Costo de los Bonos Verdes.....	47

## Índice de figuras

1.2 Distribución porcentual de las emisiones de GEI.....	7
2.2 Contaminación ambiental en las afueras de Moscú.....	10
3.1: Sistema de Colonia de hormigas .....	20
3.2: Decisión de camino de la hormiga con un obstáculo.....	21
3.3 :División de hormigas por extremos.....	21
3.4 :Mayor densidad de feromonas en el camino más corto.....	22
3.5 :Elección del camino más corto.....	23
3.6 :Pseudocódigo.....	26
3.7 :Pseudocódigo Secuencial de Dorigo.....	30
3.8 :Pseudocódigo de un algoritmo Ant System multiobjetivo.....	33
4.1 Programa de Colonia de Hormigas.....	38
4.2 Gráfica 6 Municipios con tres iteraciones.....	41
4.3 Gráfica 6 Municipios con diez iteraciones.....	42
5.1 Algoritmo de datos de problemas prueba para las distancias..	44
5.2 Algoritmo de datos de problemas prueba para las matrices de Información heurística.....	45
5.3 Gráfica para 50 datos con 5 iteraciones.....	46
5.4 Gráfica para 50 datos con 10 iteraciones .....	47
5.5 Gráfica para 50 datos con 20 iteraciones.....	48
5.6 Gráfica para 50 datos con 30 iteraciones.....	49

5.7 Gráfica para 50 datos con 40 iteraciones.....	50
5.8 Gráfica para 10 datos con 20 iteraciones.....	51
5.9 Gráfica para 30 datos con 20 iteraciones.....	52
5.10 Gráfica para 30 datos con 20 iteraciones.....	53
5.11 Gráfica para 30 datos con 20 iteraciones $\alpha=0$ $\beta=1$ ....	54
5.12 Gráfica para 30 datos con 20 iteraciones $\alpha=0.5$ $\beta=1$ ...	55
5.13 Gráfica para 30 datos con 20 iteraciones $\alpha=1.5$ $\beta=1$ ...	56
5.14 Gráfica para 30 datos con 20 iteraciones $\alpha=3$ $\beta=1$ .....	57
5.15 Gráfica para 30 datos con 20 iteraciones $\alpha=1$ $\beta=0$ .....	58
5.16 Gráfica para 30 datos con 20 iteraciones $\alpha=1$ $\beta=3$ .....	59

# Introducción

El problema que dio origen a este proyecto es el Calentamiento Global. El protocolo de Kioto sobre el cambio climático es un acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de gases provocadoras del calentamiento global. El 11 de diciembre de 1997 los países industrializados se comprometieron, en la ciudad de Kioto a ejecutar un conjunto de medidas para reducir los gases de efecto invernadero.

Los bonos de carbono son un mecanismo internacional de descontaminación para reducir las emisiones contaminantes al medio ambiente; es uno de los tres mecanismos propuestos en el Protocolo de Kioto para la reducción de emisiones del calentamiento global o efecto invernadero. El sistema ofrece incentivos económicos para que empresas privadas contribuyan a la mejora de la calidad ambiental y se consiga regular la emisión generada por sus procesos productivos, la transacción de los bonos de carbono permite mitigar la generación de gases invernadero, beneficiando a las empresas que no emiten o disminuyen la emisión y haciendo pagar a las que emiten más de lo permitido.

Los "bonos verdes" o bonos de carbono son un mecanismo desarrollado para reducir la emisión de Gases Efecto Invernadero (GEI) mediante el cual, en un esquema de mercado, empresas de países industrializados pagan a otras, la mayoría en naciones menos desarrolladas, por su reducción en las emisiones de GEI, por lo cual expiden certificados.

El Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas (DICA) del Instituto de Ciencias, de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, tiene varios años estudiando los suelos agrícolas y forestales de la Sierra Norte del Estado de Puebla, acerca del Secuestro del Carbono pero no han podido calcular su costo por lo que sería conveniente hacer un estudio del costo de del Secuestro del Carbono en dicha zona y que los campesinos pudieran adjudicarse “bonos verdes”.

En esta tesis se plantea como objetivo principal el costo de los bonos verdes a partir de la modelación de los mecanismo del secuestro de carbono, usando las Bases de Datos de los suelos proporcionada por el DICA, aplicando optimización multiobjetivo y técnicas heurísticas para resolverlo.

En el capítulo 2 se presenta el problema del Cambio Climático, el problema a optimizar, las características y la importancia del mismo. En el capítulo 3 se proporcionará una introducción a la Optimización Multiobjetivo y se describirá en qué consiste la metaheurística de la Colonia de Hormigas para abordar un algoritmo básico de esta metaheurística llamado Ant System(AS), presentando su pseudocódigo y algunas variantes, llegando así a la Colonia de hormigas bi-objetivo (BicriterionAnt). En el capítulo 4 se presentan las versiones de AS desarrolladas en esta tesis para el problema estimar el costo del Carbono, los archivos de prueba utilizados y los resultados preliminares obtenidos. Así mismo, se presenta la selección de la versión final. En el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos. Finalmente en el capítulo 6 proporciona una discusión de los resultados obtenidos, las conclusiones y el trabajo futuro.

## **CAPITULO 1**

### **1.1 Introducción**

En este capítulo se introduce el concepto de Cambio Climático Global, se explican los principales causante y los acuerdos firmados para combatir este problema.

## **El Fenómeno del cambio climático**

Se denomina Cambio Climático Global a la alteración significativa del clima global , como resultado del aumento de concentraciones de gases invernadero tales como el dióxido de carbono, metano, óxidos nitrosos y clorofluorocarbonos, estos gases están atrapando una porción creciente de radiación infrarroja terrestre y se espera que harán aumentar la temperatura planetaria entre 1,5 y 4,5 °C (el llamado Efecto Invernadero). Como respuesta a esto, se estima que los patrones de precipitación global y corrientes marinas también se alteren. Aunque existe un acuerdo general sobre estas conclusiones, hay una gran incertidumbre con respecto a las magnitudes y las tasas de estos cambios a escalas regionales[1]

Para evitar el Calentamiento Global es fundamental un cambio en la forma de producir y usar la energía que es la mayor fuente de

emisiones de CO<sub>2</sub>. La sustitución de formas de obtención de energía sucias por otras sostenibles, necesita la paralización de los nuevos proyectos de centrales térmicas que emitan grandes índices de CO<sub>2</sub>, el cierre progresivo de las centrales nucleares y el apoyo a la generación de electricidad con fuentes renovables: eliminando las barreras que existen para su crecimiento a gran escala y contando con el papel que los ciudadanos pueden jugar un papel importante para transformar el sistema energético.

Hay un amplio consenso científico sobre la estrecha relación entre las concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero generadas por la actividad humana y los cambios observados recientemente en el clima terrestre. Así ha sido identificado por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), grupo auspiciado por las Naciones Unidas que reúne cerca de 3.000 expertos en estas cuestiones.

Estos gases se producen de forma natural y son fundamentales para la vida en la Tierra; impiden que parte del calor solar regrese al espacio, y sin ellos el mundo sería un lugar frío y yermo. Pero cuando el volumen de estos gases es considerable y crece sin parar, provocan unas temperaturas elevadas y modifican el clima.

El principal culpable del aumento de gases de efecto invernadero en la atmósfera es el proceso de industrialización iniciado hace siglo y medio y, en particular, la combustión de petróleo, carbón y gas para producir energía, la tala de bosques y algunos métodos de explotación agrícola. Estas actividades han aumentado enormemente el volumen de "gases de efecto

invernadero" de forma muy rápida en la atmósfera, sobre todo de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso.

El cambio climático es una seria amenaza. Los impactos de este ya son visibles, por ejemplo: el aumento de la temperatura media global, el deshielo de los glaciares, la subida del nivel del mar y el aumento de la frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos.

El cambio climático crece dependiendo de la forma de uso del petróleo, el carbón y el gas. La quema de combustibles fósiles libera dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) a la atmósfera.

Por lo que se tiene la necesidad urgente de reducir drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero en las próximas décadas para prevenir un cambio climático peligroso.

El Protocolo de Kioto es un primer paso esencial en la dirección correcta. Donde se discutió y promovió por algunos gobiernos e industrias un "instrumento" adicional para mitigar el cambio climático. Este "instrumento" es la supuesta "captura y secuestro de carbono" (CCS, acrónimo de Carbon Capture and Storage). Un sistema para atrapar el CO<sub>2</sub> de la quema de los combustibles fósiles y "almacenarlo" bajo el mar o la superficie de la tierra. Este asunto rápidamente pasó a formar parte de una iniciativa mundial de investigación y desarrollo. [2]

El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) es un procedimiento contemplado en el Protocolo de Kioto en donde países desarrollados pueden financiar proyectos de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) dentro de países

en desarrollo, y recibir a cambio Certificados de Reducción de Emisiones aplicables a cumplir con su compromiso de reducción propio (IPCC, 2001). A través del MDL las empresas tienen la posibilidad de participar en el mercado de reducción de emisiones de gases de efecto de invernadero. Mientras que el MDL reduce el costo de cumplimiento de compromisos entre el Protocolo para países desarrollados, las economías en desarrollo se benefician del incremento en los flujos de capital de inversión para proyectos de mitigación y los resultados que estos ofrecen para las políticas de desarrollo sustentable.

El MDL es regulado y supervisado por el Consejo Ejecutivo de MDL de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. En México existe una cartera actual de proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio, los cuales pretenden mitigar el Cambio Climático. Ver tabla 2.1. [2]

Tipo de Proyecto	Numero de proyectos.	KTons CO2/año
Minihidroeléctricas	6	263
Generación de energía eléctrica con viento.	6	1,626
Gestión de desechos orgánicos.	5	1,394
Aprovechamiento de metano en rellenos sanitarios.	7	600
Aprovechamiento o quema de metano (gas grisú) en minería.	1	2,000
Secuestro de carbono en el sector forestal.(73)	9	1,310
Almacenamiento de carbono en subsuelo.	1	n.a.
Transporte	1	200
Eficiencia energética y reingeniería de proceso.	4	2,100
Incineración de HFC-22 proveniente del proceso de manufactura de CFC	1	2,712
Programa nacional de sustitución de motores (NM100)	2	--
<b>Total</b>	<b>43</b>	<b>12,205</b>

Tabla 1.1: Cartera Actual de Proyectos de MDL en México.

Dentro del contexto global, México contribuye como país al 1.5% de las emisiones mundiales de gases efecto invernadero, que junto al 1.5% de Brasil representan la mitad del aporte que hace América Latina (6%).

“Los países en desarrollo más que preocuparse por las emisión de gases, porque son muy pequeñas, deben preocuparse por cómo van a ir regulando el crecimiento industrial. Si no hay la tecnología adecuada las emisiones pueden crecer mucho; de hecho aunque América Latina arroja pocas emisiones a la atmósfera, su crecimiento va al doble en comparación con otros países en desarrollo, ya sea en África, Europa o Asia”.

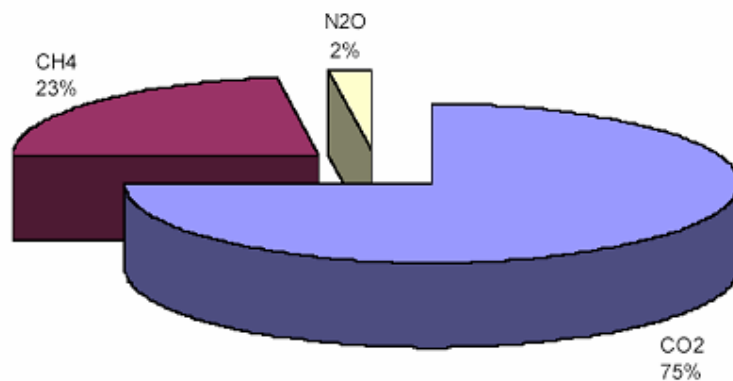


Figura 1.1: Distribución porcentual de las emisiones de GEI

## **CAPITULO 2**

### **2.1 Introducción**

En este capítulo se plantea el problema de Cambio Climático en el estado de Puebla el impacto socioeconómico que tiene este y las principales formas de combatirlo como es el secuestro del carbono.

#### **Puebla y el Cambio Climático**

Pese a que en Puebla las emisiones de gases efecto invernadero son mínimas, la entidad es el cuarto estado del país más vulnerable ante el “Cambio Climático”, de acuerdo con un estudio nacional elaborado por el Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente contenido en el proyecto de investigación intitulado “Economía del Cambio Climático” que elabora María Eugenia Ibararán Viniegra.[3]

Ibararán Viniegra citó que Puebla tiene alta vulnerabilidad por su irregular crecimiento económico, bajo nivel de recursos humanos y capacidad de sus ecosistemas, pues admite que la entidad está “indefensa” ante un futuro crecimiento industrial acelerado, sobre todo “si no cuenta con la infraestructura correcta”.

La investigadora señala que ya tenemos problemas ambientales muy severos, como el de la presa de Valsequillo, sin embargo, hace una pausa y enfatiza sobre el cambio climático y los efectos que tendrá en la entidad. “Es poco lo que hay que hacer dado que las emisiones de gases efecto invernadero son muy pequeñas. Pero sí es importante tener un crecimiento sostenible o sustentable en todos los ámbitos”.

Ante el cambio climático, Puebla tiene mucho que hacer para prevenir desastres naturales. “Van a seguir sucediendo estos eventos naturales, pero la magnitud del impacto va a depender de la preparación que haya en la sociedad, pero en especial en el gobierno y la calidad de la infraestructura que exista”.

La investigadora, conocida también por ser colaboradora del Premio Nobel en Química, Mario Molina, refirió que en Puebla el sector energético es el que más contribuye con el cambio climático, por el alto número de emisiones de gases efecto invernadero.[3]

En cuanto a contaminación urbana el 80% de las emisiones de gases proviene del sector transporte por la quema de combustibles, mientras que el 13% es generado por el sector industrial.

## **2.2 Impacto Socioeconómico**

El calentamiento global podría contraer la economía mundial en un 20 por ciento en las próximas décadas, si la comunidad internacional no actúa urgentemente para detener el cambio climático.

Tal conclusión a la que se arriba en un estudio encargado por el gobierno británico y presentado en Londres. El mundo podría sumirse en una depresión peor que la de principios de los años 30. En el informe, coordinado por el ex economista jefe del Banco Mundial Nicholas Stern, se urge a invertir el uno por ciento del producto económico mundial en la lucha contra el cambio climático.[4]. Las consecuencias en caso de no detenerse las actuales tendencias serán "catastróficas". "Y este desastre no es la amenaza de un lejano futuro de ciencia ficción, sino de nuestra época".

Las sequías, las inundaciones y el aumento del nivel del mar que produce el calentamiento global podrían convertir en refugiados a hasta 200 millones de personas [4]. El derretimiento de los casquetes polares agravaría dramáticamente el peligro de inundaciones y zonas cultivables se transformarían en terrenos secos y estériles, se advierte en el estudio. Además podría desaparecer el 40 por ciento de la flora y fauna.



2.2 Contaminación ambiental en las afueras de Moscú. Rusia firmó el Protocolo de Kioto.

En realidad, los datos no son nada nuevo, sino que se vienen manejando en diversos estudios de la ONU y agencias nacionales de estudios del clima desde hace tiempo. Prácticamente existe consenso general en que el cambio climático está en pleno desarrollo y que es causado por el ser humano. Lo nuevo es que Gran Bretaña haya salido ahora tan decididamente a la palestra a luchar contra la desidia.

Pero mientras países económicamente fuertes y con grandes emisiones de gases de efecto invernadero, como EEUU, Australia, China y la India, no participen en los esfuerzos globales, las perspectivas para el clima continuarán siendo oscuras.

Estudiando las cifras se constata que la evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero se diferencia mucho por países. Mientras que en Alemania, por ejemplo, entre 1990 y 2004 las emisiones disminuyeron un 17,2 %, en EEUU aumentaron en el mismo periodo un 15,8 %.

Los mayores crecimientos en esos 14 años, según un estudio del Secretariado del Cambio Climático, de la ONU, se registraron en Turquía (+ 72,6 %), España (+ 49 %) y Portugal (+ 41 %). En el informe no se tiene en cuenta el aumento de las emisiones de países de fuerte crecimiento económico, como China y la India, porque no son Estados parte de la Convención de la ONU para la Protección del Clima. Pero es de temer que en ellos el aumento no haya sido menor.

El primer ministro australiano, John Howard, por su parte, volvió a subrayar que su país no firmará el Protocolo de Kioto a pesar del nuevo estudio climático británico. "Evidentemente, el cambio climático está ocurriendo", dijo Howard al Parlamento. "Pero no voy a firmar algo que impone cargas a mi país que no se imponen a nuestros competidores", agregó. Howard reafirmó que Australia no romperá filas con Estados Unidos y que por lo tanto no firmará el Protocolo de Kioto.

Australia y Estados Unidos se encuentran entre los países desarrollados que rechazaron el Protocolo de Kioto, negociado entre 140 países en 1997 y que entró en vigencia en febrero de ese año. En el tratado se fija que 35 países industriales y la Unión Europea (UE) reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero en un primer periodo de compromiso 2008-2012 un 5,2 por ciento con respecto a 1990.

Según datos del secretariado de la Convención Marco de la ONU sobre el Cambio Climático, con sede en Bonn, si bien las emisiones de los países industriales se redujeron entre 1990 y 2004 en un 3,3 por ciento, ello se debe sobre todo a la caída del 36,8 por ciento en las emisiones en los países del centro y este de Europa por el colapso de muchas de sus industrias. Desde el comienzo de este siglo, la tendencia en esos países ya se ha revertido.

Las reducciones en las emisiones de gases de efecto invernadero son especialmente urgentes sobre todo en el sector del transporte, en el que entre 1990 y 2004 crecieron en un 23,9 %. En forma bastante aceptable se clasifican, no obstante, los países signatarios del Protocolo de Kioto, de los que se espera que, a

pesar de un cierto aumento de las emisiones en algunos de ellos, alcancen finalmente los compromisos de reducción fijados.

## **2.3 Solución al problema del Cambio Climático**

El Secuestro de carbono es el término que describe procesos que remueven el dióxido de carbono de la atmósfera. Para ayudar a mitigar el calentamiento global, se están explorando una variedad de maneras de capturar y almacenar el carbono artificialmente (liberando oxígeno), así como maneras para estimular procesos naturales de secuestro.

El dióxido de carbono atmosférico, y otros gases de efecto invernadero absorben el calor que es reflejado desde la superficie de la tierra. Este incremento de calor podría conducir al calentamiento global. A través del secuestro de carbono, los niveles de dióxido de carbono atmosférico son reducidos con un incremento de los niveles de carbono del suelo. Si el carbono orgánico del suelo no es disturbado, entonces puede permanecer en el suelo por muchos años como materia orgánica estable. Este carbono es entonces secuestrado o removido desde la fracción disponible para ser reciclado hacia la atmósfera. Este proceso reduce los niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, reduciendo las probabilidades del calentamiento global.[6]

Ahora bien, ¿Cuál es el impacto que el secuestro de carbono puede tener en los gases del efecto invernadero? Se ha estimado

que el 20% o más de las reducciones objetivo podrían ser atenuadas por el secuestro de carbono en agricultura.[7]

Existen diferentes prácticas que pueden hacer los productores agrícolas para mejorar el secuestro de carbono que pueden incrementar el secuestro de carbono, incluyendo:

- Siembra directa o labranza reducida.
- Incremento en la intensidad de la rotación de cultivos eliminando los barbechos (tierra que se deja descansar) de verano.
- Medidas de conservación que reducen la erosión del suelo
- Uso de cultivos con alta proporción de residuos como maíz, sorgo granífero y trigo.
- Uso de cultivos de cobertura.
- Selección de variedades e híbridos que acumulen más carbono.

Es posible que un sistema privado de mercado de créditos de carbono sea establecido, el cual podría pagar a los productores entre 5 y 7 dólares por hectárea. Unas pocas compañías han comenzado a comprar o alquilar créditos de carbono en algunos casos, pero esto no es una práctica ampliamente difundida. Es también posible que el gobierno pueda proveer ciertos incentivos para los productores para secuestrar carbono. Pero si no reciben pagos por el secuestro de carbono, pueden recibir pagos por la implementación de prácticas que incrementen la materia orgánica del suelo debido a una:

- a. Mejora de la estructura y calidad de suelo
- b. Mejora de la productividad del suelo por incremento de la materia orgánica.
- c. Reducción de la erosión debido a una mejora de la estructura del suelo.
- d. Mejora de la calidad del agua debido a una reducción en la erosión del suelo.

El Instituto Nacional de Ecología INE-SEMARNAP, tiene a su cargo la planificación, asignación, seguimiento y evaluación de diversos proyectos para la elaboración de estrategias de mitigación y adaptación al Cambio Climático.

Un ejemplo importante de los proyectos arriba mencionados fue la elaboración del Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de México, que ha posibilitado la identificación y cuantificación de las principales fuentes y sumideros de gases en el país, lo cual es básico para la definición de cualquier política relacionada con el Cambio Climático.

En dicho inventario destacaron las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera por el cambio de uso de suelo. Es por eso que en las investigaciones realizadas para dar cumplimiento a los compromisos adquiridos en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se han buscado estrategias para contribuir a que diversos sectores nacionales estén preparados para la mitigación y adaptación de fenómenos climáticos. Una de las opciones de mitigación más importantes para México es la denominada “**Captura de Carbono en el sector forestal**”, ya que el manejo sustentable de los bosques con estrategias de aforestación y reforestación,

capturan CO<sub>2</sub> atmosférico a través de la fotosíntesis durante el crecimiento de la biomasa vegetal. Lo anterior implica una disminución en las emisiones de CO<sub>2</sub>, al evitar la deforestación.

En este capítulo se dio una revisión al problema del cambio climático, y específicamente a nuestro estado de Puebla, así como las posibles soluciones para evitar el calentamiento Global.

En el siguiente capítulo se introduce el concepto de de las colonias de hormigas, que sirvieron de inspiración para construir la meta-heurística de Ant Colony Optimization (ACO).

## Capítulo 3

# La Colonia de Hormigas (Ant System)

En este capítulo se introduce el concepto de “heurística”, así como también se explica el comportamiento real de las colonias de hormigas, que sirvieron de inspiración para construir la meta-heurística de Ant Colony Optimization (ACO). Posteriormente, daremos paso a la presentación del algoritmo perteneciente a esta clase: el Ant System. De este algoritmo se describirá el pseudocódigo y algunas variantes

### 3.1 Introducción

En aquellos problemas de combinatoria en los que sea muy difícil encontrar soluciones, tal como ocurre en los llamados problemas NP-duros, en los que no existe un algoritmo capaz de resolverlos en un tiempo polinomial, es donde tiene aplicación el uso de algoritmos meta-heurísticos. Mientras que los algoritmos denominados exactos intentan encontrar la solución óptima global, los algoritmos aproximados intentan hallar una solución cuya calidad sea aceptable, aún cuando no sea la óptima.

En las últimas décadas se ha profundizado en el diseño de técnicas de propósito general, denominadas técnicas meta-heurísticas, basadas en conceptos generales para guiar la construcción de soluciones o la búsqueda local en las distintas heurísticas. Por tanto, la meta-heurística es un marco de trabajo general referido a los algoritmos que puede aplicarse a problemas de optimización combinatoria.

La palabra heurística se deriva del griego *heuriskein*, que significa “encontrar” o “descubrir”. Heurística se define como:

“Un proceso que puede resolver un cierto problema, pero que no ofrece ninguna garantía de lograrlo, se le denomina heurística para ese problema”. [8]

El hombre, desde el comienzo de la era moderna, siempre ha tenido en los sistemas naturales una buena fuente donde tomar y abstraer las ideas, que con tanto éxito funcionan en la naturaleza, para poder aplicarlo en los sistemas artificiales. Uno de los sistemas naturales más efectivos y sencillo a la vez, es el sistema de comunicación de varias comunidades de hormigas.

Una de las técnicas meta-heurísticas es la técnica ACO (Ant Colony Optimization [9]), basada en el comportamiento de algunas familias de hormigas para encontrar los caminos óptimos (más cortos) al alimento. Esta es la técnica empleada por Dorigo en su estudio [10].

## 3.2 Comportamiento real de las hormigas

La observación de la naturaleza ha sido una de las principales fuentes de inspiración para la propuesta de nuevos paradigmas computacionales. Así nacieron diversas técnicas de Inteligencia Artificial como: los Algoritmos Genéticos (Genetic Algorithms), Redes Neuronales (Neural Networks), y entre estas técnicas, el sistema basado en Colonias de Hormigas (Ant Colony System) [11].

Resulta realmente interesante analizar como las hormigas buscan su alimento y logran establecer el camino más corto para luego regresar a su nido. Para esto, al moverse una hormiga, deposita una sustancia química denominada feromona como una señal odorífera para que las demás puedan seguirla.

Las feromonas son un sistema indirecto de comunicación química entre animales de una misma especie, que transmiten información acerca del estado fisiológico, reproductivo y social, así como la edad, el sexo y el parentesco del animal emisor, las cuales son recibidas en el sistema olfativo del animal receptor, quien interpreta esas señales, jugando un papel importante en la organización y la supervivencia de muchas especies.

En estos sistemas de colonias de hormigas (ver figura 3.1), las decisiones individuales van a tener dos componentes fundamentales: la información del entorno, muy importante en los estados iniciales del proceso (las primeras hormigas exploradoras), como la información histórica contenida en la feromona.

El resultado de aplicar estos algoritmos artificialmente, consigue que varios agentes (hormigas artificiales) “recorran” un entorno artificial buscando soluciones parciales de un problema

global, que si bien, puede que no sea el óptimo puede resultar aceptable.



Figura 3.1: Sistemas de colonias de hormigas.

Al iniciar la búsqueda de alimento, una hormiga aislada se mueve a ciegas, es decir, sin ninguna señal que pueda guiarla, pero las que le siguen deciden con buena probabilidad seguir el camino con mayor cantidad de feromonas. En la figura 3.2 las hormigas llegan a un punto donde tienen que decidir por uno de los caminos que se les presenta, lo que resuelven de manera aleatoria. En consecuencia, la mitad de las hormigas se dirigirán hacia un extremo y la otra mitad hacia el otro extremo, como ilustra la figura 3.3.

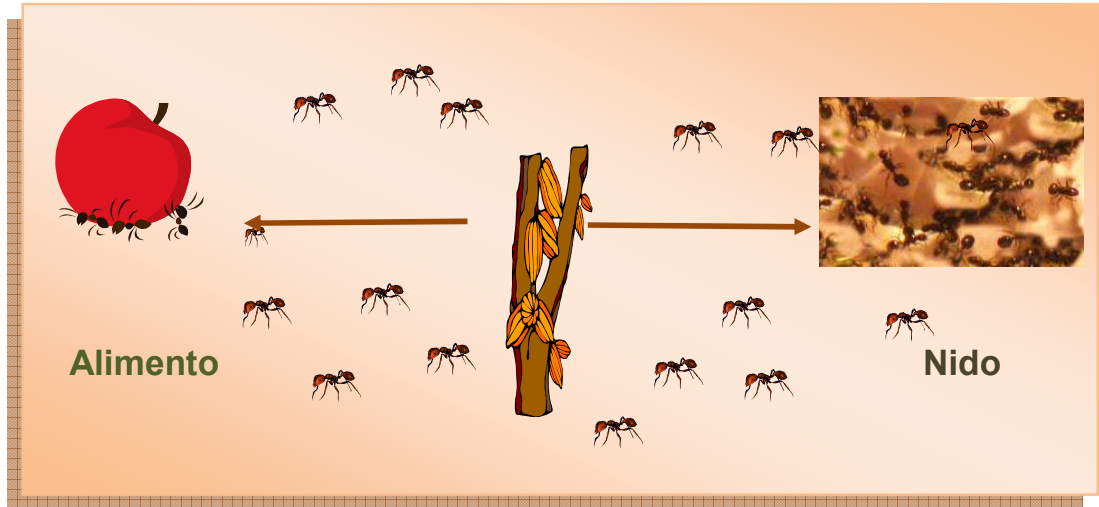


Figura 3.2: Decisión de camino de la hormiga con un obstáculo.

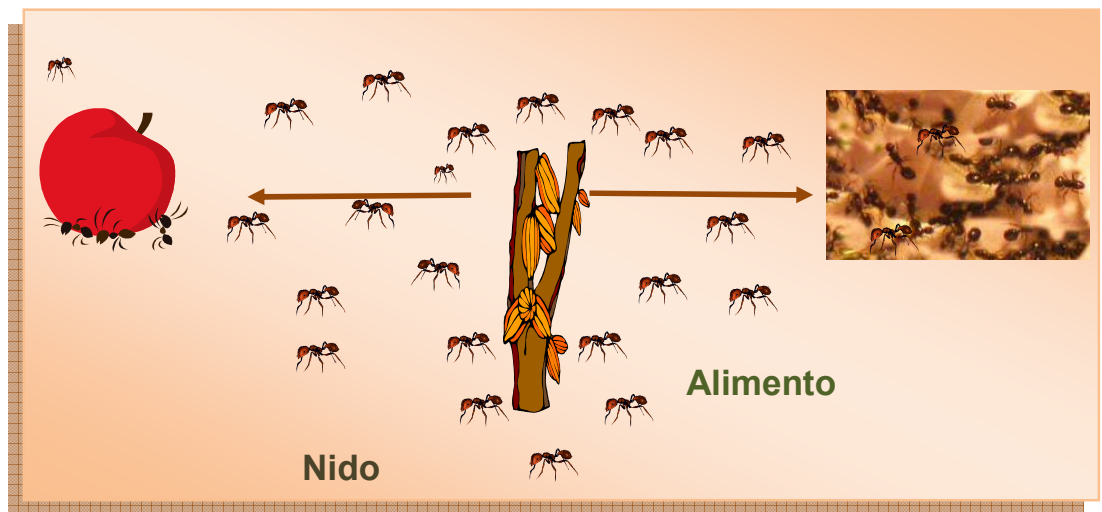


Figura 3.3 :División de hormigas por extremos.

Como las hormigas se mueven aproximadamente a una velocidad constante, las que eligieron el camino más corto alcanzarán el otro extremo más rápido que las que tomaron el camino más largo, quedando depositado mayor cantidad de feromona por unidad de longitud, como ilustra la figura 3.4. La mayor densidad de feromonas depositadas en el trayecto más corto hace que éste sea más deseable para las siguientes hormigas y por lo tanto la mayoría elige transitar por él. Considerando que la evaporación de la sustancia química hace que los caminos menos transitados sean cada vez menos deseables y la realimentación positiva en el camino con más feromonas, resulta claro que al cabo de un tiempo casi todas las hormigas transiten por el camino más corto como se observa en la figura 3.5.

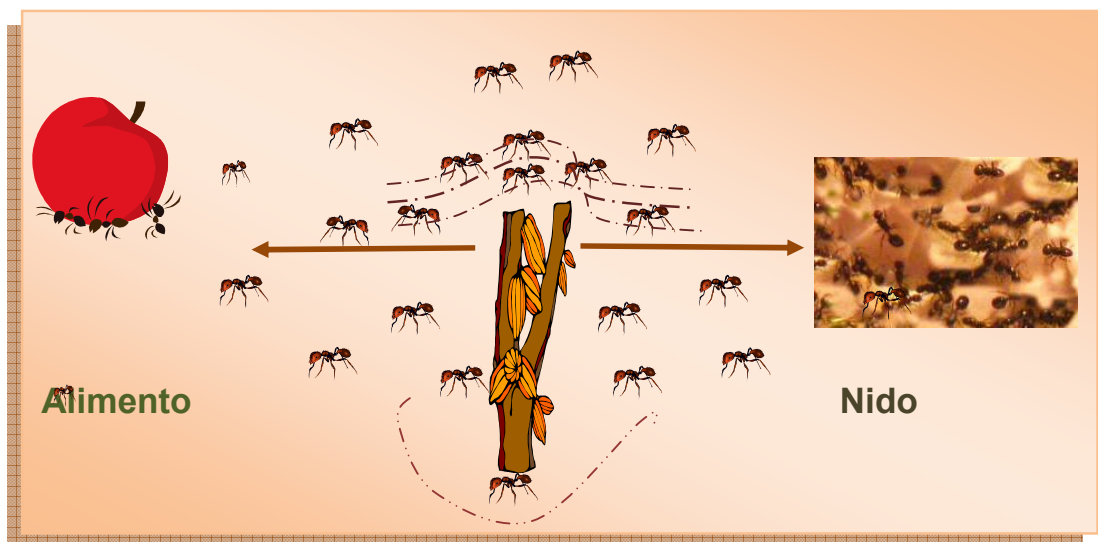


Figura 3.4 :Mayor densidad de feromonas en el camino más corto.

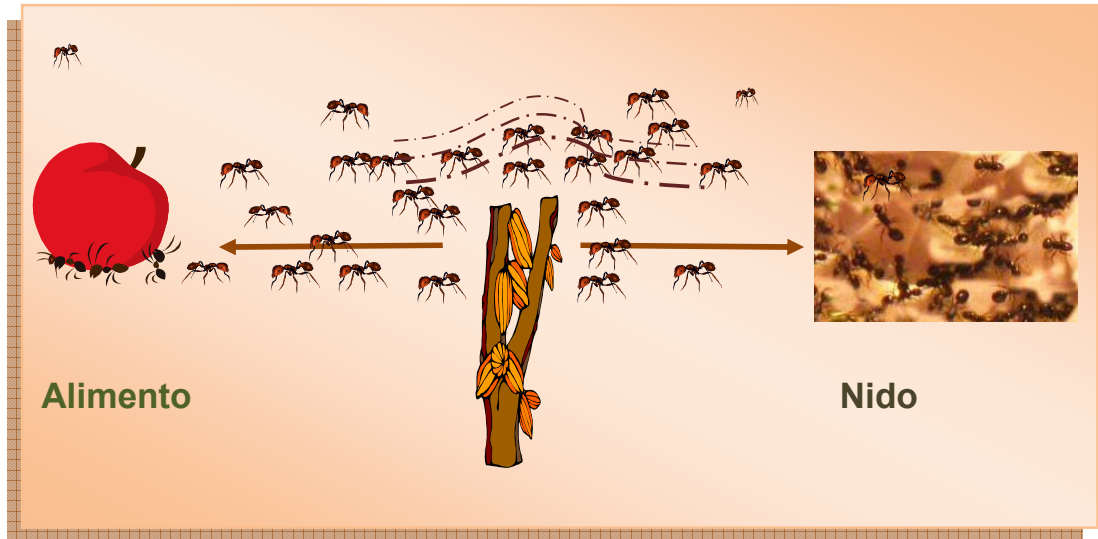


Figura 3.5 :Elección del camino más corto.

En nuestro estudio, el objetivo es guiar a las hormigas, donde no existe una regla alguna, salvo el rastro dejado por la hormiga anterior y que tomaremos como camino “óptimo”. La búsqueda de soluciones aceptables en este entorno consiste en lograr encontrar el menor costo y mayor almacenamiento de Carbono con la mayor aproximación posible.

### 3.3 Descripción de la Metaheurística

#### 3.3.1 Introducción a la Optimización Multiobjetivo

La Optimización Multiobjetivo puede ser definida como el problema de encontrar un vector de variables de decisión que satisfacen restricciones y optimiza un vector de funciones cuyos elementos representan las funciones objetivo. Estas definiciones aparecen en los trabajos de Coello.[12]

Se desea encontrar un vector de decisión

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (1)$$

Con  $X \in \mathbb{R}^n$  que deberá satisfacer  $\omega$  restricciones de desigualdad

$$g_i(x) > 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, w \quad (2)$$

y optimizar el vector de funciones

$$f(x) = [f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), \dots, f_b(\bar{x})]^T \quad (3)$$

que generalmente cumple con  $f(\bar{x}) \in \mathbb{R}^b$ . El conjunto de todas las soluciones que cumplen con (2) es conocido como dominio de soluciones factibles, y se representan como  $\Omega$ , en general  $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ .

El correspondiente conjunto imagen, se define como:

$$\Omega(\bar{x}) = \{f(\bar{x}) \in \mathbb{R}^b \mid x \in \Omega\}$$

**Dominancia de Pareto:** Sean dos soluciones  $u, v \in \Omega$ . Se dice que  $u$  domina a  $v$  si es mejor o igual que  $v$  en cada uno de sus objetivos y estrictamente mejor en al menos un objetivo.

Ejemplo, para un problema de minimización  $u$  domina a  $v$  (denotado como  $u \succ v$ ) si solo si

$$f_i(u) \leq f_i(v) \forall i \in [1, 2, 3, \dots, b] \wedge \exists j \in [1, 2, 3, \dots, b] | f_j(u) < f_j(v)$$

**Conjunto de Pareto:** El conjunto de todas las soluciones  $X$  no dominadas en  $\Omega$  se denomina Conjunto Pareto, lo que se denota como  $CP$ . Las soluciones  $\vec{x}$  que pertenecen a  $CP$  se denotarán como  $x^*$ .

### 3.3.2 Algoritmo

El algoritmo de Colonia de Hormigas se puede definir en tres pasos:

- 1.-La Construcción de soluciones por hormigas.
- 2.-Actualización de la feromona.
- 3.-Servidor de acciones.

La **construcción de soluciones** administra una colonia de hormigas que visitan estados adyacentes de un problema considerado (previamente modelado). Las hormigas pueden moverse aplicando una política de decisión estocástica usando la información de los rastros de feromona y la información heurística. De esta forma, las hormigas construyen incrementalmente una solución al problema.

La **actualización de la feromona** es el proceso mediante el cual los rastros de feromona son modificados. El valor del rastro

puede incrementarse debido a que las hormigas depositan feromona en cada uno de los componentes o conexiones que usan para moverse de un nodo a otro del problema. Y el valor del rastro también puede decrementarse por medio de la simulación de la evaporación de feromona, lo que evita una convergencia prematura del algoritmo.

El **servidor de acciones** es un procedimiento utilizado para implementar acciones centralizadas las cuales no pueden ser desarrolladas por las hormigas en forma individual. Un ejemplo de estas acciones puede ser la activación de un procedimiento de compilación de información global que puede ser usada para tomar decisiones que modifiquen el comportamiento del algoritmo en forma general o parcial.

```
Procedimiento Hormigas
  Actividades programadas
    Construcción de soluciones por hormigas
    Actualización de feromona
    Servidor de acciones
  Fin-Actividades programadas
Fin-Procedimiento
```

Figura 3.6 :Pseudocódigo.

### 3.4 La Colonia de Hormigas Clásica

Para describir el mecanismo de la Colonia de Hormigas con un solo objetivo nos basaremos en el problema del agente viajero, el cual se presenta a continuación:

*“Sean C un conjunto de N ciudades de un territorio. La distancia entre cada ciudad viene dada por la matriz  $D = N \times N$ , donde  $d[x, y]$  representa la distancia que hay entre la ciudad x y la ciudad y. El objetivo es encontrar una ruta que, comenzando y terminando en una ciudad concreta, pase una sola vez por cada una de las ciudades y minimice la distancia recorrida por el viajante. Es decir, encontrar una permutación  $P = \{c_0, c_1, \dots, c_{N-1}\}$  tal que la*

$$dp = \sum_{i=0}^{N-1} d[c_i, c_{i+1 \bmod(N)}] \text{ sea mínimo}”$$

Considerando que C es el conjunto de ciudades a ser visitadas una sola vez con el objeto de encontrar la longitud mínima de recorrido, se tiene que el número de hormigas (artificiales) utilizadas para el problema será:

$$MAXH = \sum_{i=0}^{N-1} C_i \quad (3.1)$$

Para el conjunto de distancias entre las ciudades se define la matriz de distancias  $D = \{d_{ij}$ , distancia entre las ciudades  $i, j\}$ , a partir de la cual se calcula la visibilidad  $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ . Así mismo, el algoritmo utilizará una matriz de feromonas para almacenar la información de los caminos recorridos por las hormigas depositando

una cantidad de feromona por cada par de ciudades  $(i, j)$ ; dicha matriz está dada por  $T=T_{ij}$ .

$T(i, j)$  especifica la intensidad del rastro de las feromonas en el arco  $(i, j)$ , y se actualiza según:

$$\tau(i, j) = \rho \times \tau(i, j) + \Delta\tau_{ij} \quad (3.2)$$

donde  $\rho$  es el coeficiente de persistencia de las feromonas, de forma tal que  $(1-\rho)$  representa la evaporación de la feromona para el arco  $(i, j)$ , mientras que la cantidad de feromona depositada en un arco  $(i, j)$ , está dada por:

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^{MAXH} \Delta\tau_{ij}^k \quad (3.3)$$

con  $\Delta\tau_{ij}^k$  representando la cantidad de feromona depositada en el arco  $(i, j)$  por la hormiga  $k$ .

Para satisfacer la restricción de que cada hormiga visite todas las ciudades una sola vez, se asocia a cada hormiga  $k$  una estructura de datos llamada lista tabú que guarda las ciudades ya visitadas por dicha hormiga. Una vez que todas las ciudades han sido visitadas, el trayecto es completado y la lista tabú se almacena en espera de ser evaluado el costo total del recorrido.

Durante la ejecución del algoritmo Ant System, cada hormiga elige en forma probabilística la próxima ciudad a visitar, realizando un cálculo de probabilidad que está en función de la distancia y la

cantidad de feromona depositada en el arco que une a las ciudades origen  $i$  con las ciudades destino  $j$ , esto es:

$$p_{ij}^k = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha \times [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{i \notin Tabu_k} [\tau_{ij}]^\alpha \times [\eta_{ij}]^\beta}, \text{ si } i \notin Tabu_k \quad (3.4)$$

donde  $\alpha$  y  $\beta$  son constantes que expresan la importancia relativa del sendero de feromonas y la distancia entre las ciudades respectivamente. Así, un alto valor de  $\alpha$  significa que el sendero de feromonas es muy importante y que las hormigas tienden a elegir caminos por los cuales otras hormigas ya pasaron. Si por el contrario, el valor de  $\beta$  es muy alto, las hormigas tienden a elegir la ciudad más cercana.

Mientras no hayan completado la ruta, las hormigas seguirán eligiendo ciudades hasta llenar su lista Tabú. Una vez que todas las hormigas han completado sus recorridos se procede a actualizar la matriz de feromonas con las ecuaciones antes descritas. Para esto, se debe calcular la longitud del trayecto realizado por cada hormiga. La cantidad de feromona que se deposite en cada arco es proporcional a la distancia del recorrido completo encontrado por cada hormiga y por lo tanto, el cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$\Delta \tau_{ij}^k = \frac{Q}{L_k} \quad \text{si la hormiga } k \text{ camina por el arco}(i.,j)$$

(3.5)

donde  $Q$  es una constante y  $L_k$  es la longitud del recorrido completo realizado por la hormiga  $k$ .

Este proceso se repite iterativamente hasta que se cumpla algún criterio de término.

1. Fase de inicialización
  - Inicializar contador de ciclos **NC**
  - Para cada arco **(i,j)**:
    - valor inicial de  $\tau_{ij}(t) = \tau_0$
  - Para cada hormiga
    - Elegir ciudad origen
2. Repetir hasta llenar **tabuk**
  - Si es la ultima posición de **tabuk**
  - Para cada hormiga:
    - Insertar ciudad origen en **tabuk**
  - Sino
  - Para cada hormiga:
    - Elegir próxima ciudad a ser visitada según (3.4)
    - Mover la hormiga a la próxima ciudad
    - Insertar ciudad seleccionada en **tabuk**
  - Para cada hormiga:
    - Actualizar feromonas según ecuación (3.3)
3. Repetir para cada hormiga **k**
  - Calcular la longitud  $L_k$  del ciclo
  - Actualizar feromonas según ecuación (3.2)
4. Si (Condición\_fin = Verdadero)
  - Imprimir camino más corto **Lk**
- Sino
  - Ir a la Fase 2

Figura 3.7 :Pseudocódigo Secuencial de Dorigo[9].

### 3.5 La Colonia de hormigas bi-objetivo (BicriterionAnt)

Existen diferentes variantes para el Algoritmo de Colonia de Hormigas multiobjetivo se mencionaran algunos y el algoritmo utilizado para nuestro problema.

#### Pareto Ant Colony Optimization (PACO)

Este algoritmo se propuso en [13] por Doerner et al., y se basa en la utilización de  $b$  tablas de feromonas ( $\tau^b$ ), una para cada objetivo. En cada iteración una hormiga computa una serie de pesos, uniformemente aleatorios,  $w = w_1, w_2, \dots, w_b$  y los utiliza al calcular la regla de transición de estados. Estando en el estado  $i$  se selecciona el estado  $j$  según:

$$j = \left\{ \max \left[ \left( \sum_{k=1}^b w_k \tau_{i,j}^k \right)^\alpha \times \eta_{i,j}^\beta \right] \right\} \text{ si } q < q_0 \text{ en caso contrario}$$

#### MultiObjective Ant Colony System (MOACS)

MOACS, propuesto por Barán y Schaerer en [14], es una extensión del MACS-VRPTW, este último propuesto por Gambardella et al. [15]. Fue implementado considerando dos objetivos, utiliza una matriz de feromonas y dos visibilidades, una para cada objetivo del problema. La regla de transición de estados se calcula como:

$$j = \left\{ \max_{j \in J_i} \left\{ \tau_{i,j} [\eta_{i,j}^0]^\lambda [\eta_{i,j}^0]^{(1-\lambda)\beta} \right\} \right\}$$

Cada vez que una hormiga se mueve del estado  $i$  al estado  $j$ , realiza la actualización local de feromonas.

En el caso de encontrar una solución no dominada, se actualiza CP y se reinicializa la tabla de feromonas, considerando que la información fue aprendida por medio de soluciones dominadas. Si la solución encontrada es dominada se realiza la actualización de feromonas según la ecuación.

El siguiente algoritmo es el utilizado para el problema resuelto ya que es para una función bi-objetivo y de acuerdo a diferentes pruebas realizadas es el que mejor se aproxima a la solución para problemas bi-objetivos.

### **BicriterionAnt (BiAnt)**

Este algoritmo fue propuesto por Iredi et al. [16] para la resolución del problema del agente viajero con dos objetivos y mantiene dos tablas de feromonas  $t$  y  $t'$  para los dos objetivos considerados. La distribución de probabilidades para seleccionar el siguiente estado está dada por:

$$p_{ij}^k = \frac{\tau_{ij}^{\lambda\alpha} \cdot \tau_{ij}^{(1-\lambda)\alpha} \cdot \eta_{ij}^{\lambda\beta} \cdot \eta_{ij}^{(1-\lambda)\beta}}{\sum_{x \in J_i} \tau_{ij}^{\lambda\alpha} \cdot \tau_{ij}^{(1-\lambda)\alpha} \cdot \eta_{ij}^{\lambda\beta} \cdot \eta_{ij}^{(1-\lambda)\beta}} \quad \text{si } j \in J_i \quad (3.6)$$

Para cada hormiga  $t$  para  $t \in \{1, 2, \dots, m\}$ ,  $\lambda_t$  se calcula a partir de:

$$\lambda_t = \frac{t-1}{m-1}$$

De esta manera se consigue que las hormigas realicen búsquedas en distintas regiones del frente Pareto. La actualización y evaporación de feromonas se realiza para cada tabla según la ecuación (3.2).

```

procedure MOACO
  inicializar_parametros()
while not condicion_parada()
  generacion=generacion + 1
  for ant=1 to m // m es la cantidad de hormigas
  construir_solucion()
  evaluar_solucion()
  actualizar_feromonas() //según ecuación (3.2)
  actualizar_conjunto_pareto()
  end for
end while
end
procedure construir_solucion
  sol={ $\phi$ }
while existen_estados_no_visitados()
  siguiente=seleccionar_siguiente_estado() // según (3.4)
  sol=sol  $\cup$  {siguiente}
  marcar_como_visitado(siguiente)
  if(actualizacion_paso_a_paso)
    actualizar_feromonas_paso_a_paso()// según (3.6)
  end while
end

```

Figura 3.8 :Pseudocódigo de un algoritmo Ant System multiobjetivo [17].

En este capítulo vimos el comportamiento real de las hormigas, el algoritmo de Colonia de Hormigas, sus diferentes variantes, así como el algoritmo a implementar en el siguiente capítulo con los datos proporcionados.

## Capítulo 4

# Diseño e Implementación

En este capítulo se hace el modelado de datos y la implementación del algoritmo, se muestran las primeras pruebas y la discusión de las mismas.

### 4.1. Diseño

En el trabajo realizado por Charles A. Zelek and Gerald E. Shively, presentan un método para medir el costo del Secuestro de Carbono, tomando en cuenta, el valor del riego y el pago a los agricultores, fue este artículo en el que se basó para poder iniciar la investigación de los datos para nuestro problema.[19]

La tabla 4.1 son datos proporcionados por el Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas del Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla [18], y los datos existentes en el INEGI [20] de agricultura de los cafetales, los cuales nos permitieron generar las matrices del Algoritmo de Colonia de Hormigas.

Municipio	C ton ha <sup>-1</sup>	Superficie sembrada regada(ha) cafe	Valor del riego en pesos	Valor de Riego por hectárea	Superficie Comprometida(ha)	Monto Pagado	Monto Pagado Por Ha	Costo por hectárea TOTAL
CUETZALAN	244.76	3500	37,800	10.8	4,216.35	1,766,680.52	419.00	429.8
HUEYTEMALCO	90.2	4100	44,280	10.8	1,445.22	614,753.04	425.36	436.16
TLATLAUQUITEPEC	71.25	2500	27,000	10.8	7,006.77	3,225,924.68	460.40	471.2
XICOTEPEC DE JUAREZ	272.08	7441	155,671	20.92	1,529.28	662,951.08	433.50	454.42
ZIHUATEUTLA	670.8	5584	119,646	21.42	1,197.31	521,993.56	435.97	457.39
TLAOLA	70.52	2996	44,575	14.88	849.97	356,185.72	419.06	433.94

Tabla 4.1 Costos y Almacenamiento de Carbono por Municipio del Estado de Puebla sobre cafetales.

El Carbono por tonelada se obtuvo de las investigaciones del DICA[18], ahora bien, el costo se obtiene según el valor de riego total entre el número de Hectáreas, estos datos fueron tomados del INEGI[20].

La tabla siguiente muestra costo del Carbono asociado con el Almacenamiento de cada Municipio.

Municipio	Toneladas de Carbono x ha <sup>-1</sup>	Costo de Carbono x ha <sup>-1</sup>
CUETZALAN	244.76	429.8
HUEYTEMALCO	90.2	436.16
TLATLAUQUITEPEC	71.25	471.2
XICOTEPEC DE JUAREZ	272.08	454.42
ZIHUATEUTLA	670.8	457.39
TLAOLA	70.52	433.94

Tabla 4.2 Costos asociado al Almacenamiento de Carbono.

Ahora bien, para obtener la Matriz de distancia de Almacenamiento de Carbono, sumamos municipio i con el municipio j y sacamos el promedio.

Ejemplo para el Municipio de Cuetzalan y Hueytamalco.

Carbono\_Cuetzalan + Carbono\_Hueytamalco

$$244.76 + 90.2 = 334.96/2 = \mathbf{167.48}$$

	CUETZALAN	HUYTEMALCO	TLATLAUQUITEPEC	XICOTEPEC DE JUAREZ	ZIHUATEUTLA	TLAOLA
CUETZALAN	-	167.48	158.00	258.42	457.78	157.64
HUYTEMALCO	167.48	-	80.725	181.5	380.5	80.36
TLATLAUQUITEPEC	158.00	80.725	-	171.79	370.87	70.885
XICOTEPEC DE JUAREZ	258.42	181.5	171.79	-	471.44	171.3
ZIHUATEUTLA	457.78	380.5	370.87	471.44	-	370.5
TLAOLA	157.64	80.36	70.885	171.3	370.5	-

Tabla 4.3 Distancias de Carbono Almacenado por hectárea.

Para el caso del Costo obtenemos la Matriz de costos de Carbono, sumamos municipio i con el municipio j y sacamos el promedio.

Ejemplo para el Municipio de Cuetzalan y Hueytamalco.

CostoCarbono\_Cuetzalan + CostoCarbono\_Hueytamalco

$$429.8 + 436.16 = 865.95/2 = \mathbf{432.98}$$

	CUETZALAN	HUYTEMALCO	TLATLAUQUITEPEC	XICOTEPEC DE JUAREZ	ZIHUATEUTLA	TLAOLA
CUETZALAN	0	432.98	450.5	442.11	443.59	431.87
HUYTEMALCO	432.98	0	453.93	445.29	446.775	435.05
TLATLAUQUITEPEC	450.5	453.93	0	462.81	426.81	452.57
XICOTEPEC DE JUAREZ	442.11	445.29	462.81	0	455.91	444.18
ZIHUATEUTLA	443.59	446.775	426.81	455.91	0	445.66
TLAOLA	431.87	435.05	452.57	444.18	445.66	0

Tabla 4.4 Distancias del Costo de Carbono por hectárea.

## 4.2. Implementación

El algoritmo desarrollado fue La Colonia de hormigas bi-objetivo (BicriterionAnt). El código se muestra a continuación.

```
%Minerva Aidee Diaz
%BI CRITERIO COLONIA DE HORMIGAS CON LANDA
%Declaracion de Variables
a=1; %alfa coeficiente para matriz de feromona
b=2; %beta coeficiente para matriz de heuristica
S=0;
P=0; %Arreglo de las Probabilidades de ir de un estado a otro
Prob=0; %probabilidad de ir de un estado a otro
C=0;
Su=0;
ind=0;
k=1;
f=1;
r=1;
Q=100;%es una constante.. sirve para actualizar feromona T=Q/LONG
Long=0;%Longitud del camino recorrido
Long2=0;
landa=0;

Solu=0;%Arreglo de Solucion llamado sol donde guardaran las soluciones
camino=[.5 ;.5 ;.5 ;.5 ;.5 ;.5];%Inicializamos el camino
%Matriz de Distancia 1 --Carbono Almacenado

D= [ 0 167.4800 158.0000 258.4200 457.7800 157.6400;
    167.4800 0 80.7250 181.5000 380.5000 80.3600;
    158.0000 80.7250 0 171.7900 370.8700 70.8850;
    258.4200 181.5000 171.7900 0 471.4400 171.3000;
    457.7800 380.5000 370.8700 471.4400 0 370.5000;
    157.6400 80.3600 70.8850 171.3000 370.5000 0];
%Matriz de Distancia 2 ---Costo del Carbono

D2= [ 0 432.98 450.5 442.11 443.59 431.87;
    432.98 0 453.93 445.29 446.775 435.05;
    450.5 453.93 0 462.81 426.81 452.57;
    442.11 445.29 462.81 0 455.91 444.18;
    443.59 446.775 426.81 455.91 0 445.66;
    431.87 435.05 452.57 444.18 445.66 0];
```

```

%-----Matriz de informacion heuristica CARBONO
N=[
    0      0.0060  0.0063  0.0039  0.0022  0.0063;
    0.0060      0      0.0124  0.0055  0.0026  0.0124;
    0.0063  0.0124      0      0.0058  0.0027  0.0141;
    0.0039  0.0055  0.0058      0      0.0021  0.0058;
    0.0022  0.0026  0.0027  0.0021      0      0.0027;
    0.0063  0.0124  0.0141  0.0058  0.0027      0];

%-----Matriz de informacion heuristica COSTOS
N2=[
    0      0.0023  0.0022  0.0023  0.0023  0.0023;
    0.0023      0  0.0022  0.0022  0.0022  0.0023;
    0.0022  0.0022      0  0.0022  0.0023  0.0022;
    0.0023  0.0022  0.0022      0  0.0022  0.0023;
    0.0023  0.0022  0.0023  0.0022      0  0.0022;
    0.0023  0.0023  0.0022  0.0023  0.0022      0];

%-----Rastros de feromona CARBONO
T=[10 10 10 10 10 10;
    10 10 10 10 10 10;
    10 10 10 10 10 10;
    10 10 10 10 10 10;
    10 10 10 10 10 10;
    10 10 10 10 10 10];

%-----Rastros de feromona COSTOS
T2=[10 10 10 10 10 10;
    10 10 10 10 10 10;
    10 10 10 10 10 10;
    10 10 10 10 10 10;
    10 10 10 10 10 10;
    10 10 10 10 10 10];

for hh=1:3%Numero de iteraciones
for h=1:5 % N-1 6 Municipios menos uno
    r=h;
    for i=1:5
        landa=(h-1)/(5-1); %Calculo de landa para usarlo como coeficiente
        for j=1:6
            if(h==j)
                %igual
            else
                C(j) =((T(i,j)^(landa*a)*(T2(i,j)^((1-landa)*a)))*(N(i,j)^(landa*b))*(N2(i,j)^((1-landa)*b)));
                Su=C(j)+Su;
            end
        end
        P(i:6)=C(i:6)/Su %PROBABILIDADES-----
        camino;
        for(lo=1:6)
            if( camino(lo)>0.5)
                visitado=camino(lo);
                P(visitado)=0;%Marcar caminos visitados
            end
        end
        Su=0;
        C=0;
        L(i)=i;
        Prob=max(P);
    end
end

```

```

%Ciclo para ver la posicion de la probabilidad mas alta
for ind=1:6
    if(P(ind)==Prob)
        s=ind;
    end
end%fin ciclo probabilidad
camino(f)=s ;
Solu(k,1)=r;
Solu(k,2)=s;    %SOLUCIONES----->
k=k+1;
r=s;
f=f+1;
end
Solu(i+1,1)=r ;%Cerrar ciclo
Solu(k,2)=h ;    %SOL
Solu
k=1;
r=h+1;
f=1;

P=0;
Prob=0;
Su=0;
camino=[.5 ;.5 ;.5 ;.5 ;.5 ;.5]; %Camino que recorre

%Calcular La longitud del camino CARBONO
for lon=1:6
    nodo_r=Solu(lon,1);
    nodo_s=Solu(lon,2);
    Long=Long+D(nodo_r,nodo_s);
end
    %Calcular La longitud del camino COSTO
for lon=1:6
    nodo_r=Solu(lon,1);
    nodo_s=Solu(lon,2);
    Long2=Long2+D2(nodo_r,nodo_s);
end
Long %CABONO
Long2 %Costo
DELTAT=Long/Q %lo que se le llama bondad de la solucion PARA CARBONO
DELTAT2=Q/Long %lo que se le llama bondad de la solucion PARA COSTO
T=.8*T;
%ACTUALIZO FERMONASSS CARBONO
for lon=1:6
    nodo_r=Solu(lon,1);
    nodo_s=Solu(lon,2);
    T(nodo_r,nodo_s)=T(nodo_r,nodo_s)+DELTAT;
end
%ACTUALIZO FERMONASSS COSTO
for lon=1:6
    nodo_r=Solu(lon,1);
    nodo_s=Solu(lon,2);
    T2(nodo_r,nodo_s)=T2(nodo_r,nodo_s)+DELTAT2;
end
Soluciones(hh,h)=Long;
Soluciones2(hh,h)=Long2;

```

```

%ACTUALIZO FERMONASSS COSTO
for lon=1:6
    nodo_r=Solu(lon,1);
    nodo_s=Solu(lon,2);
    T2(nodo_r,nodo_s)=T2(nodo_r,nodo_s)+DELTAT2;
end
Soluciones(hh,h)=Long;
Soluciones2(hh,h)=Long2;
T
T2
Solu=0;
Long=0;
Long2=0;
fprintf('-----LA HORMIGAA %.0f TERMINA RECORRIDO', h);
end
Soluciones
Soluciones2
plot(Soluciones,Soluciones2,'o')
title('SECUESTRO DE CARBONO')

    xlabel('COSTO')
    ylabel('CARBONO ALMACENADO')
end
Soluciones=0;%Limpiar datos
Soluciones2=0;%Limpiar datos
%FIN DEL ALGORITMO

```

Fig 4.1 Programa de Colonia de Hormigas para Costo y Almacenamiento de Carbono.

Para los datos introducidos de 6 Municipios con tres iteraciones nos dan los siguientes resultados.

Soluciones Carbono (Carbono almacenado por Hectárea)=

1399.9	1245.3	1155.0	1083.6	1083.6
1328.5	1174.0	1155.0	1083.6	1083.6
1328.5	1174.0	1155.0	1083.6	1083.6

Soluciones Costo (Costo de Carbono por Hectárea)=

2680.7	2687.1	2250.9	1779.7	1779.7
2209.5	2215.9	2250.9	1779.7	1779.7
2209.5	2215.9	2250.9	1779.7	1779.7

En la siguiente muestra la grafica de los resultados obtenidos para la prueba de datos de 6 municipios con 3 iteraciones.

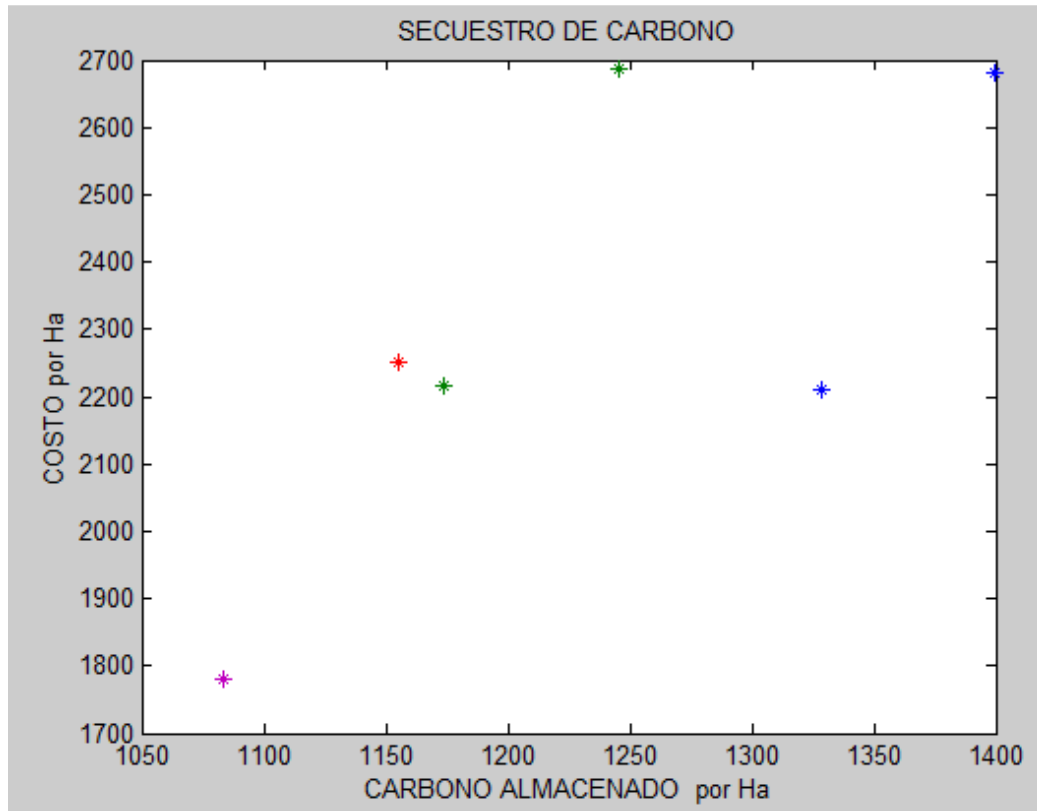


Fig 4.2 Gráfica 6 Municipios con tres iteraciones.

Posteriormente se realizo la prueba con 10 iteraciones, obteniendo los siguientes resultados.

Soluciones Carbono (Carbono almacenado por Hectárea) =

1328.5	1174.0	1155.0	1083.6	1083.6
1399.9	1245.3	1155.0	1083.6	1083.6
1399.9	1245.3	1155.0	1083.6	1083.6
1399.9	1245.3	1155.0	1083.6	1083.6
1399.9	1245.3	1155.0	1083.6	1083.6
1399.9	1245.3	1155.0	1083.6	1083.6
1399.9	1245.3	1155.0	1083.6	1083.6

1399.9	1245.3	1155.0	1083.6	1083.6
1399.9	1245.3	1155.0	1083.6	1083.6

Soluciones Costo (Costo de Carbono por Hectárea)=

2680.7	2687.1	2250.9	1779.7	1779.7
2209.5	2215.9	2250.9	1779.7	1779.7
2209.5	2215.9	2250.9	1779.7	1779.7
2209.5	2215.9	2250.9	1779.7	1779.7
2209.5	2215.9	2250.9	1779.7	1779.7
2209.5	2215.9	2250.9	1779.7	1779.7
2209.5	2215.9	2250.9	1779.7	1779.7
2209.5	2215.9	2250.9	1779.7	1779.7
2209.5	2215.9	2250.9	1779.7	1779.7
2209.5	2215.9	2250.9	1779.7	1779.7

La figura 4.3 Muestra los resultados de 6 municipios con 10 iteraciones.

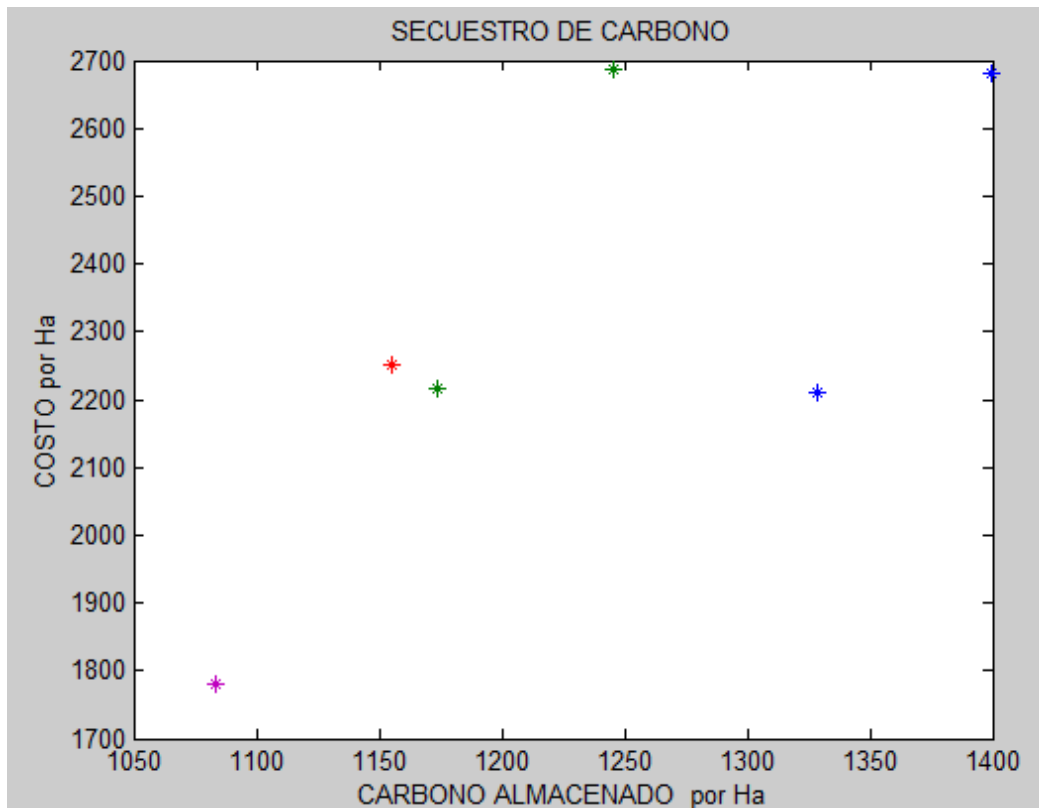


Fig 4.3 Gráfica 6 Municipios con diez iteraciones.

En la figura 4.2 y 4.3 visualizamos que es casi idéntica debido a que, como en todo problema de optimización multiobjetivo y como en la mayoría de las heurísticas existentes, las soluciones tienden a ser iguales o incluso las mismas, después de varias iteraciones.

Esto nos lleva a que 6 Municipios no son suficientes datos para poder tener una mejor aproximación al Costo del Carbono con su Almacenamiento, por lo tanto en el siguiente capítulo se hace la prueba para más datos y así llegar a una solución factible.

## Capítulo 5

# Pruebas

### 5.1 Soluciones Factibles

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas al Algoritmo Colonia de Hormigas Optimización Multiobjetivo, para datos reales combinados con un generador de problemas prueba.

Como se observo en el capítulo anterior, 6 datos en la matriz de distancias no son suficientes para poder obtener resultados con la mayor precisión posible, por lo tanto, se optó por tener datos de problemas prueba dentro del rango de los reales.

El algoritmo que nos permitió crear problemas prueba para las matrices de distancias es el siguiente.

```
for j1=6:n
  for k1=1:6
    if(j1==k1)
      D(j1,k1) =0;
      D2(j1,k1)=0;
    else
      D(j1,k1)= rand*200+70;%Datos artificiales
      D2(j1,k1)=rand*100+400;
    end
  end
end
end
```

Fig 5.1 Algoritmo de datos de problemas prueba para las distancias.

Por otro lado el algoritmo utilizado para crear problemas prueba ara la información heurística, se muestra a continuación.

```
%Crear Matrices de informacion heuristica
for j1=1:n
  for k1=1:n
    if(j1==k1)
      N(j1,k1) =0;
      N2(j1,k1)=0;
    else
      N(j1,k1)=1/D(j1,k1);%Datos Artificiales
      N2(j1,k1)=1/D2(j1,k1);
    end
  end
end
```

Fig 5.2 Algoritmo de datos de problemas prueba para las matrices de información heurística

Se realizaron las siguientes pruebas para 50 datos con diferente número de iteraciones. La figura 5.3 muestra la primera prueba para 50 datos y 5 iteraciones con un tiempo de 3.91 segundos.

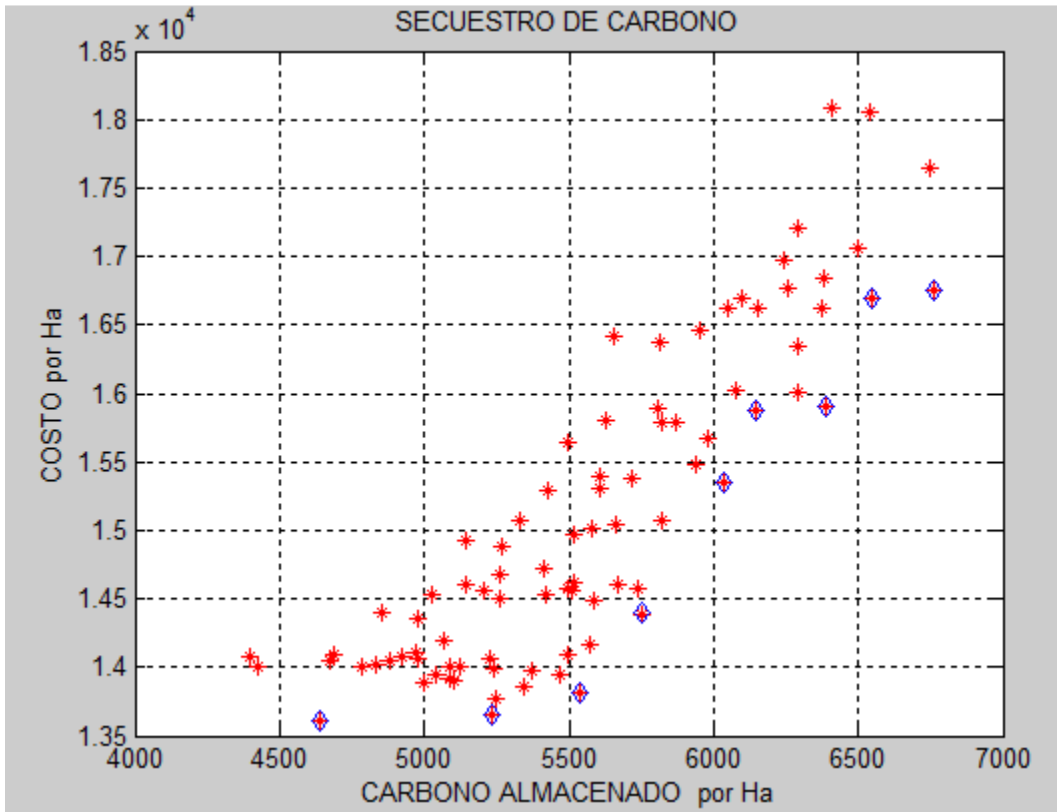


Fig 5.3 Gráfica para 50 datos con 5 iteraciones.

### **Datos del frente de Pareto**

CarbonoAlmacenado=[4642.757,5234.4973,5536,5755.292,6036,6385.5,6762.8,6545.755,5536.103,6149.6037]

CostodeCarbono=[13607,13657,13813,14392,15352,15900,16757,16696,13813,15872]

Para poder estimar el Costo de los *bonos verdes* tomaremos los datos del Frente de Pareto, dividiendo el Costo por Ha entre el Carbono por Ha.

Costos= 2.9308, 2.6090, 2.4951, 2.5007, 2.5434, 2.4900, 2.4778, 2.5507, 2.4951, 2.5810.

CostoTotal = 25.6736 pesos

**Promedio del costo de Bonos Verdes=2.5674 pesos**

Cuando se realizó la prueba para 50 datos y 10 iteraciones, se observa una mayor dispersión de los datos, ya que la matriz de feromonas fue modificada un mayor número de veces (Ver fig. 5.4).

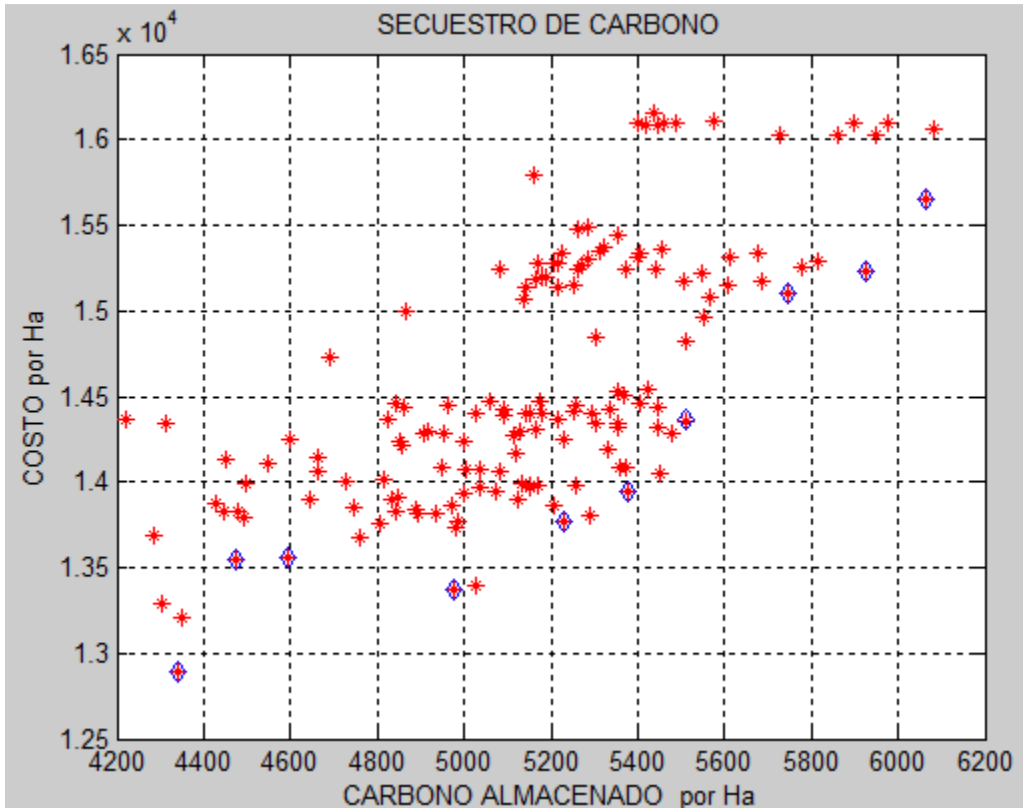


Fig 5.4 Gráfica para 50 datos con 10 iteraciones.

Tiempo=7.60 seg

**Datos del frente de Pareto**

X=[4338.65,4593.405,4472.335,4978.59,5232.2,5375.54,5510.517,5745.57  
78,5925.62,6065.6941]

Y=[12895,13558,13547,13370,13770,13942,14360,15098,15227,15647]

Costos= 2.9721 2.9516 3.0291 2.6855 2.6318 2.5936 2.6059  
2.6278 2.5697 2.5796

CostoTotal = 27.2467

**Promedio del costo de Bonos Verdes =2.72467pesos**

Las pruebas realizadas a 50 datos y 20 iteraciones, nuevamente se empiezan a compactar los datos, debido a que las hormigas empiezan a caminar donde hay una mayor cantidad de feromonas(Ver fig. 5.5).

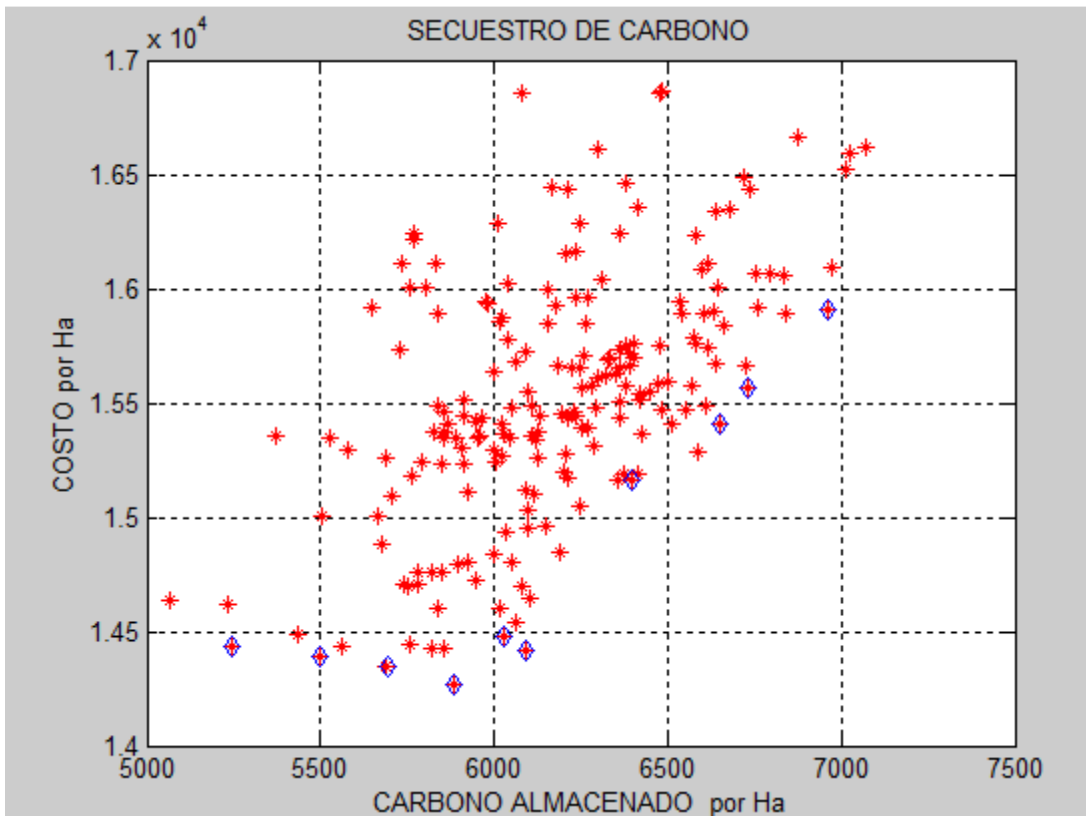


Fig 5.5 Gráfica para 50 datos con 20 iteraciones.

Tiempo=15.16 seg.

Datos del frente de Pareto

X=[5246.1422,5696.1591,6093.9685,6028.9941,6398.2449,5885.6496,6647.6897,6963.5936,5500,6729.0431]

Y=[14433,14350,14415,14477,15163,14270,15409,15910,14386,15567]

Costos= 2.7512 2.5192 2.3655 2.4012 2.3699 2.4245 2.3179  
2.2847 2.6156 2.3134

CostoTotal = 24.3632

**Promedio del costo de Bonos Verdes =2.43632**

En la figura 5.6, nos lleva a la conclusión de que 30 iteraciones no es el mejor número para 50 datos, ya que nos dispersa las soluciones.

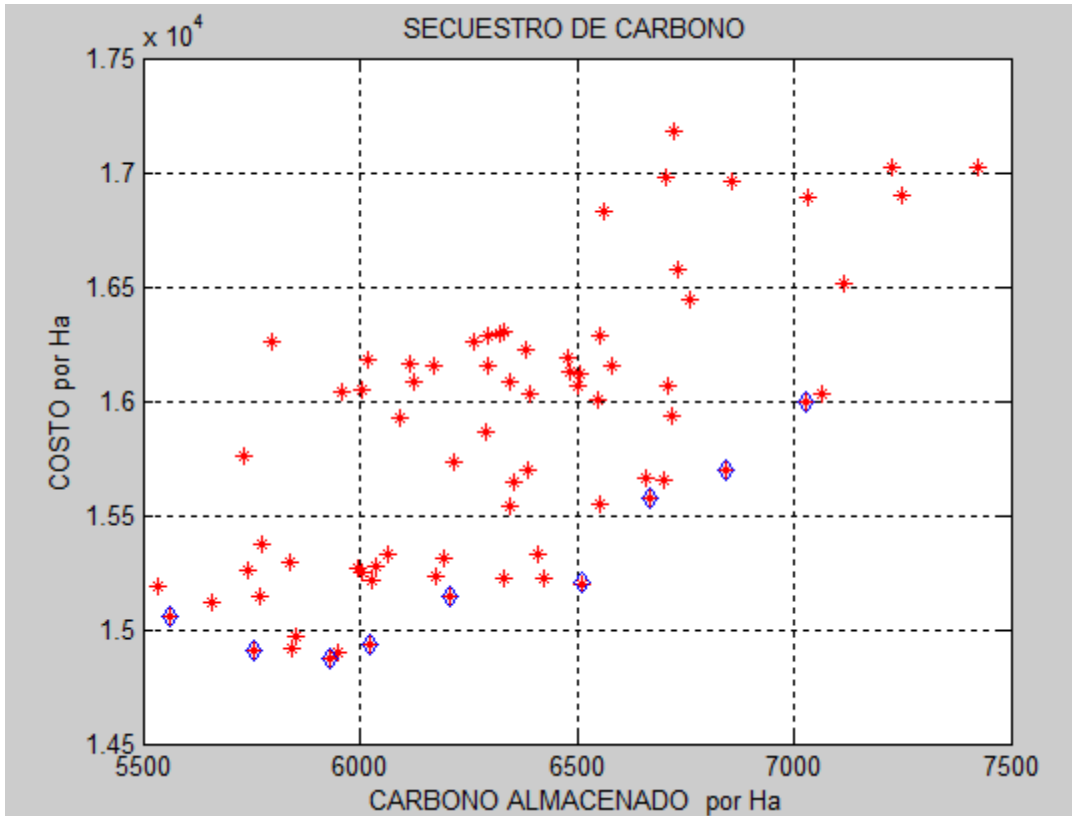


Fig 5.6 Gráfica para 50 datos con 30 iteraciones.

Tiempo=24.51 seg.

Datos del frente de Pareto

X=[5561.3521,5757.33, 5929.02, 6024.67, 6024.7, 6208.1, 6510.11,6666.6148,6843.4941,7029.78]

Y=[15056,14907, 14875,14938,14938, 15148, 15202,15572,15701,15997]

Costos= 2.7073 2.5892 2.5088 2.4795 2.4795 2.4400 2.3351  
2.3358 2.2943 2.2756

CostoTotal = 24.4451

**Promedio del costo de Bonos Verdes =2.44451 pesos**

En la figura 5.7, se visualiza la grafica de los 50 datos con 40 iteraciones.

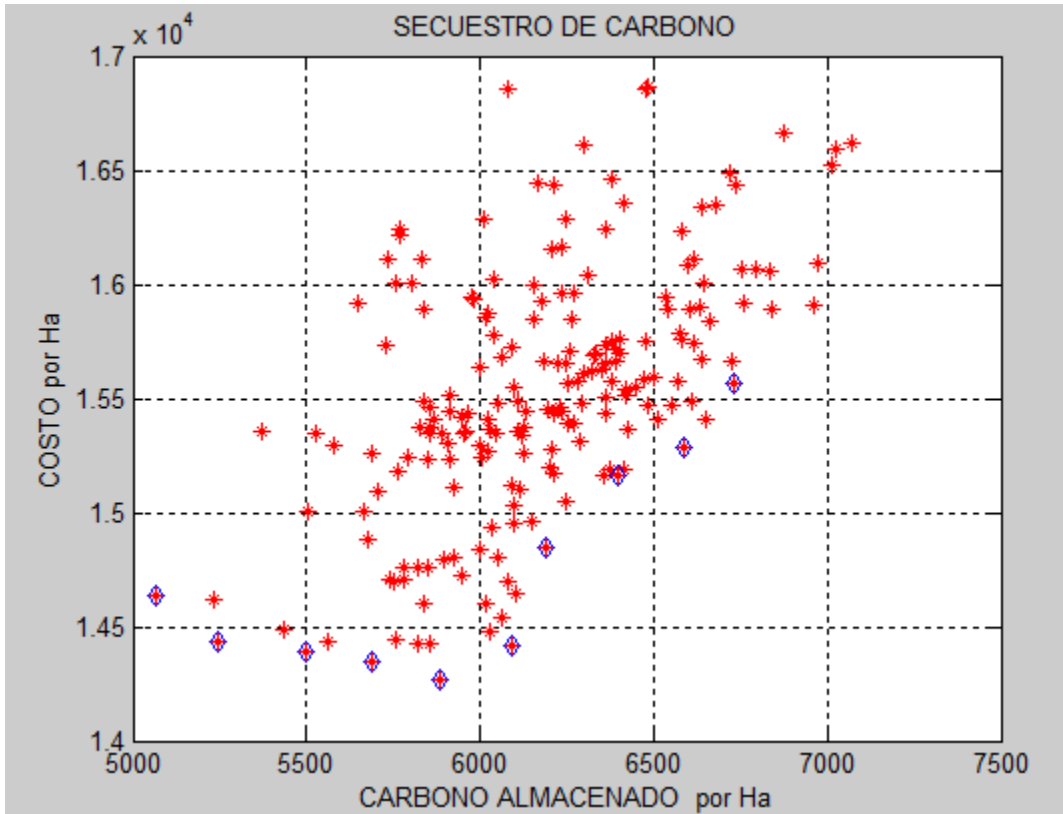


Fig 5.7 Gráfica para 50 datos con 40 iteraciones.

Tiempo=28.65 seg

Datos del frente de Pareto

X=[ 5066.57 , 5246.14, 5500, 5690.15 , 5885.64, 6093.97, 6189.96 ,6398.24, 6584.28, 6729.04]

Y=[ 14640, 14433, 14386, 14350, 14270, 14415, 14845, 15163, 15286, 15567]

Costos= 2.8895 2.7512 2.6156 2.5219 2.4245 2.3655 2.3982  
2.3699 2.3216 2.3134

CostoTotal = 24.9713

**Promedio del costo de Bonos Verdes =2.49713 pesos**

En la siguientes figuras se muestran las pruebas realizadas para 20 iteraciones fijas y moviendo el número de iteraciones.

Nuestra primera prueba es para 10 datos y 20 iteraciones(ver Fig. 5.8). Vemos que son muy pocos datos ya que se muestran demasiado dispersos.

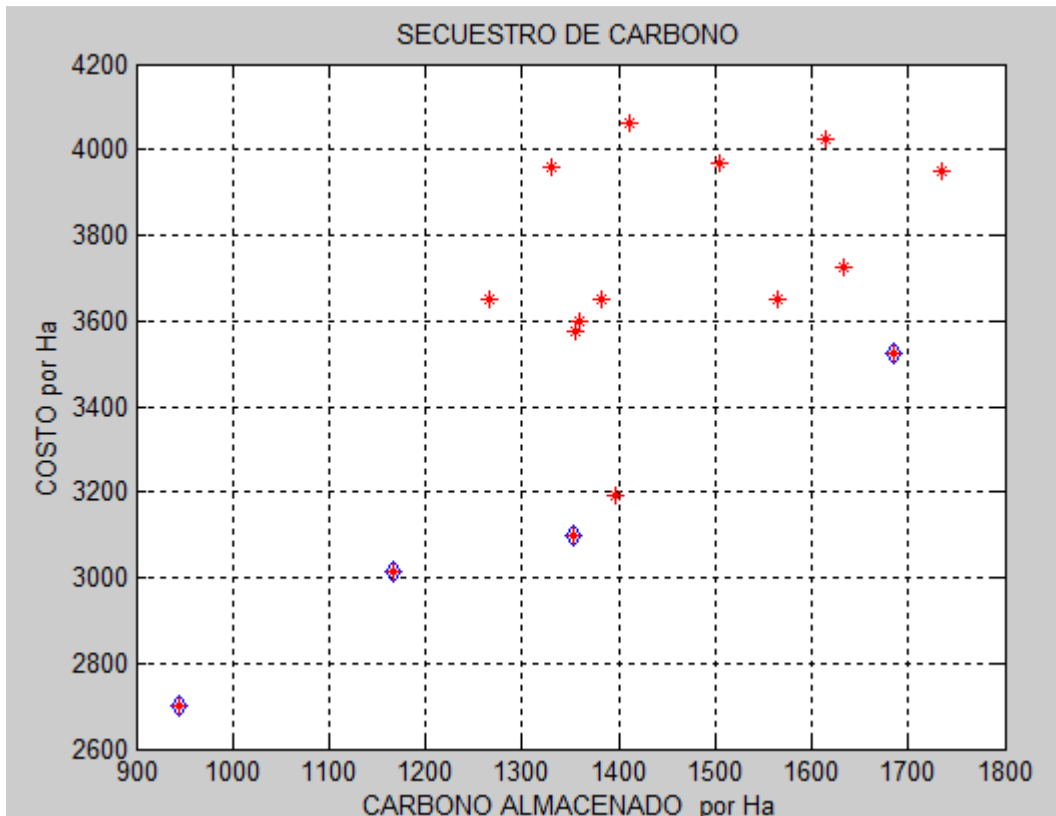


Fig 5.8 Gráfica para 10 datos con 20 iteraciones.

Tiempo=1.56 seg

Datos del frente de Pareto

X= [944.5, 1166.76, 1352.55, 1685.51]

Y=[2700, 3015.73, 3096.21, 3524.19]

Costos= 2.8587 2.5847 2.2892 2.0909

CostoTotal = 9.8234

**Promedio del costo de Bonos Verdes = 2.4558 pesos**

Las pruebas realizadas a 30 datos y 20 iteraciones, nuevamente se empiezan a compactar los datos, ya que ahora se tiene una mayor cantidad de datos (Ver fig. 5.9).

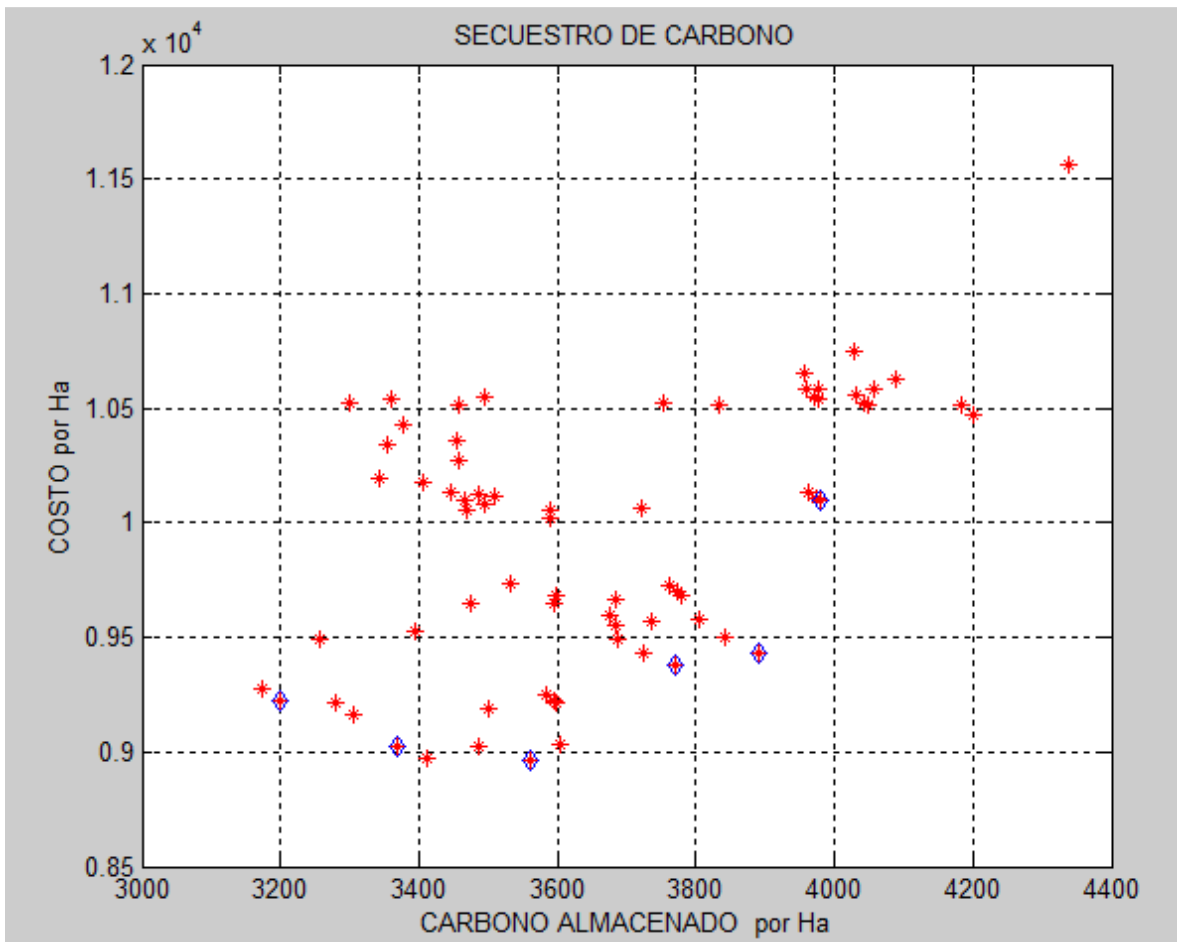


Fig 5.9 Gráfica para 30 datos con 20 iteraciones.

Tiempo=3.78 seg

Datos del frente de Pareto

X=[ 3200.13, 3368.89, 3560.57,3769.50, 3980.56, 3891.55]

Y=[9225.64, 9025.94, 8960.84,9379.78, 10096, 9430.63]

Costo= 2.8829 2.6792 2.5167 2.4883 2.5363

CostoTotal = 13.1034

**Promedio del costo de Bonos Verdes = 2.6207 pesos**

Las pruebas realizadas a 50 datos y 20 iteraciones, llegamos a la conclusión que 50 datos y 20 iteraciones nos muestra las mejores soluciones (Ver fig. 5.5 y fig 5.10).

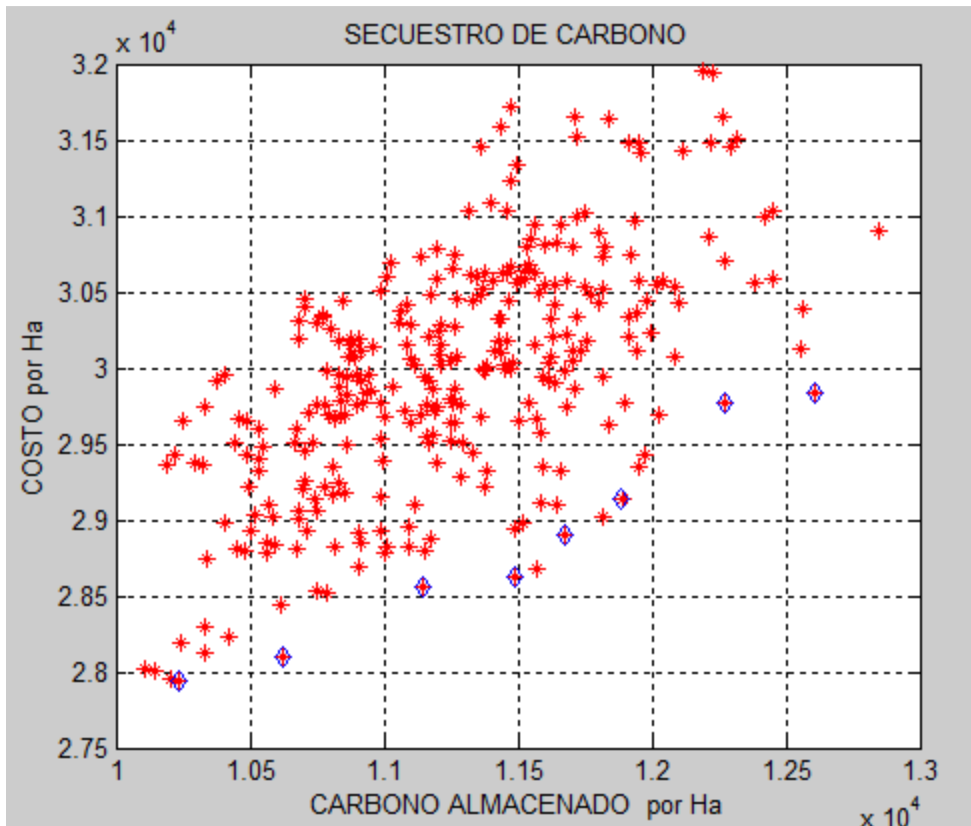


Fig 5.10 Gráfica para 50 datos con 20 iteraciones.

Tiempo=111.34 seg

Datos del frente de Pareto

X=[10234, 10624, 11148, 11487, 11678, 11888, 12270, 12608]

Y=[27942, 28099, 28565, 28620, 28901, 29136, 29773, 29829]

Costo= 2.7303 2.6449 2.5623 2.4915 2.4748

CostoTotal = 12.9039

**Promedio del costo de Bonos Verdes =2.5808 pesos**

En las anteriores gráficas notamos que no se diferencian mucho las soluciones y van de un rango de \$2.43-\$2.72 a pesar de modificar el número de datos e iteraciones esto hace que tengamos mayor certeza en nuestros resultados.

Se realizaron otras pruebas modificando el valor de alfa y beta para ver el comportamiento de las soluciones y así verificar que los valores asignados en las pruebas anteriores son los que nos dan una solución aceptable.

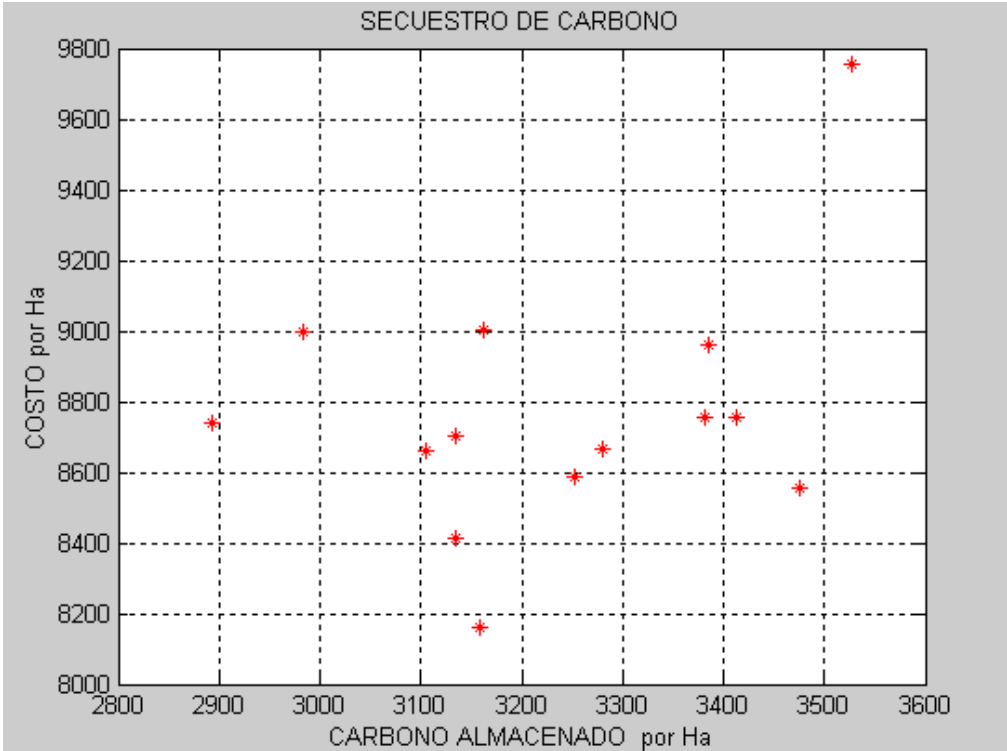


Fig 5.11 Gráfica para 30 datos con 20 iteraciones con alfa=0 beta=1

Como se mencionó en el capítulo 3 el valor de  $\alpha$  significa que el sendero de feromonas es muy importante y en esta gráfica se le asignó un valor  $\alpha=0$  significa que no nos importa el rastro de feromonas por lo tanto las soluciones se están dando muy dispersas sin ningún parecido a la gráfica e 20 iteraciones y 30 datos con un  $\alpha=1$ .

En la siguiente grafica se hizo una prueba de 30 datos con 20 iteraciones con un valor de alfa de 0.5.

Con la grafica de la figura 5.12 se observa que un  $\alpha=0.5$  no es suficiente para obtener soluciones factibles.

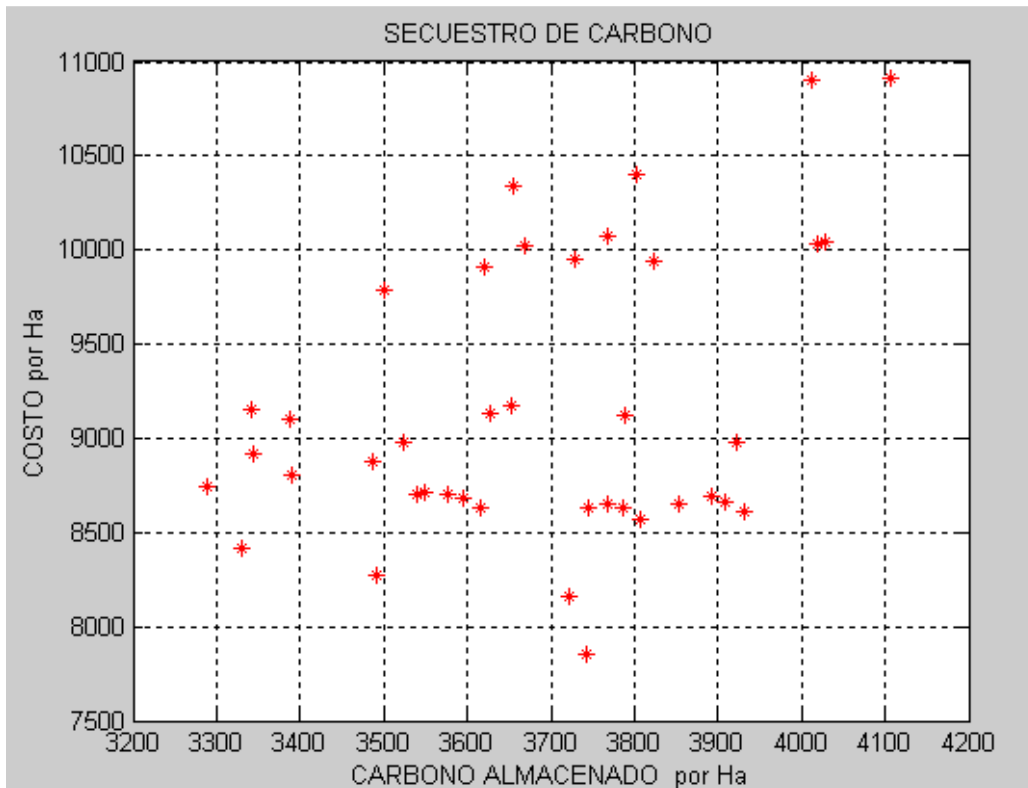


Fig 5.12 Gráfica para 30 datos con 20 iteraciones con alfa=0.5 beta=1

Observando la figura 5.13 y los datos arrojados por el frente de Pareto asignar un valor de  $\alpha=1.5$  aun arrojan soluciones factibles

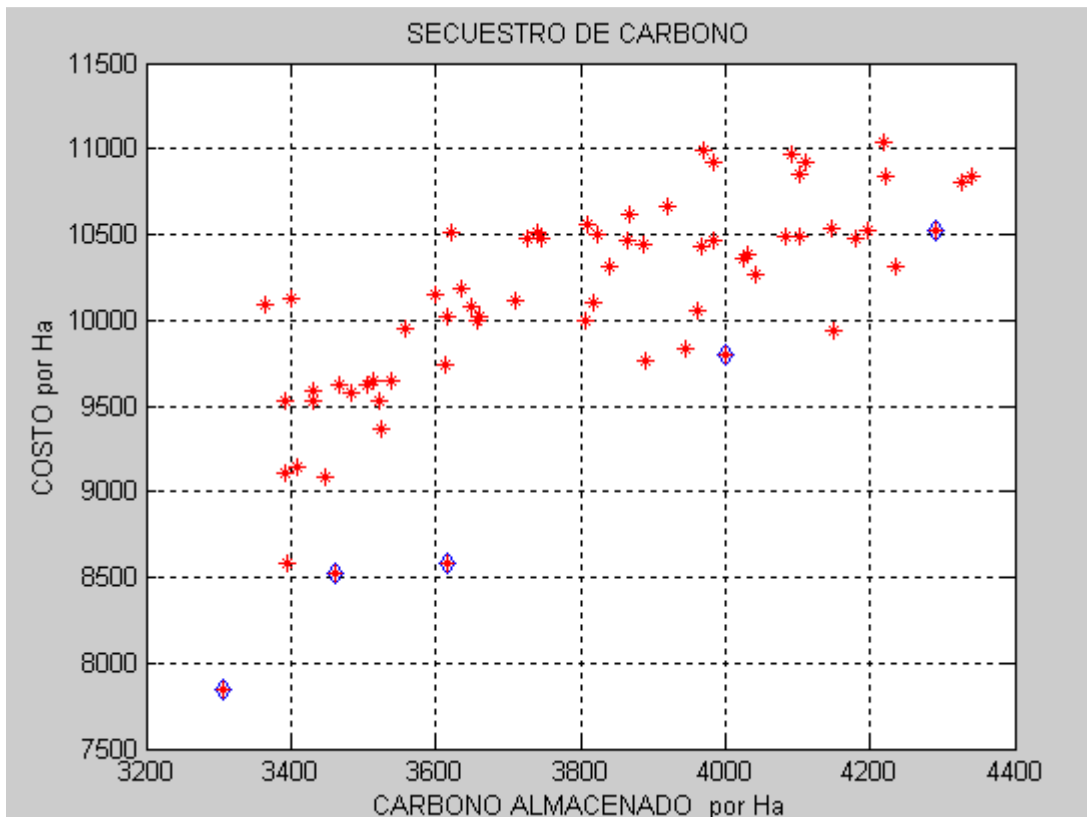


Fig 5.13 Gráfica para 30 datos con 20 iteraciones con  $\alpha=1.5$   $\beta=1$

T=5.28 seg

X=[3307.4, 3462.6, 3615.26, 4001.66, 4290.8]

Y=[7840, 8527, 8577.17, 9803.98, 10528]

Costo= 2.4263 2.4263 2.4263 2.4263 2.4263

CostoTotal=12.1317

**Promedio=2.4263 pesos**

En la grafica se hizo una prueba de 30 datos con 20 iteraciones con un valor de alfa de 3.

Con la grafica de la figura 5.14 se observa que un  $\alpha=3$  es un valor muy grande ya que las soluciones dadas no son tan aceptables.

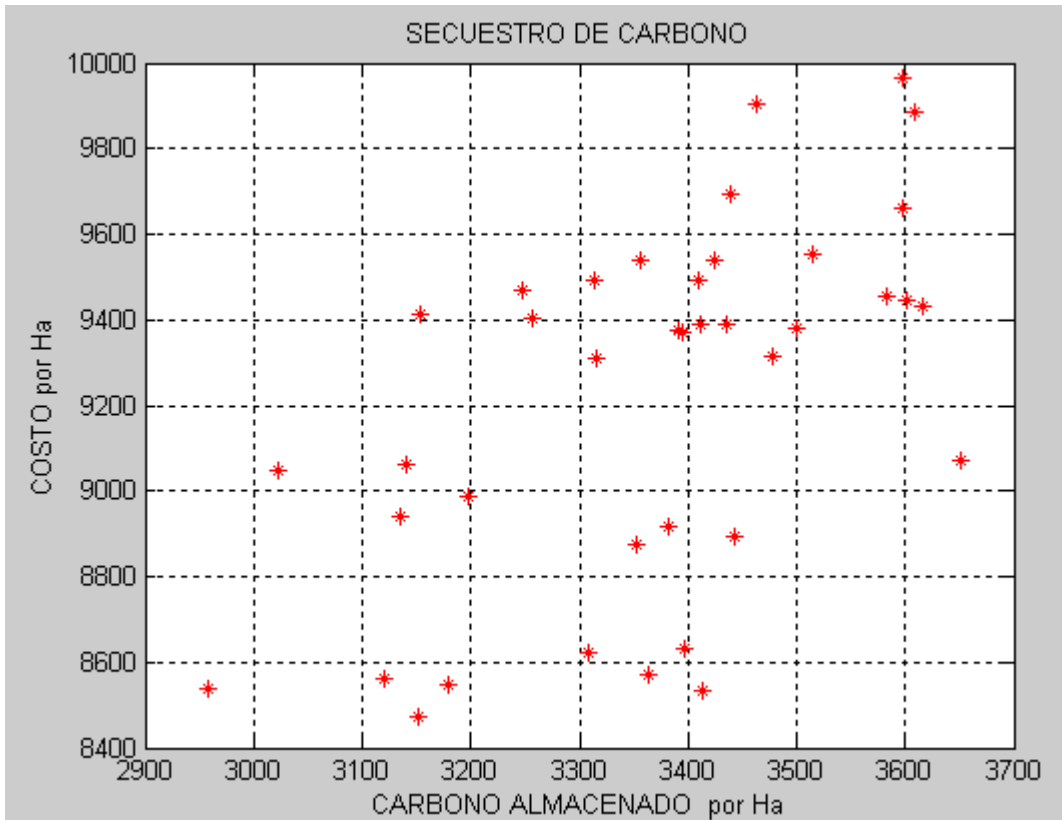


Fig 5.14 Gráfica para 30 datos con 20 iteraciones con alfa=3 beta=1

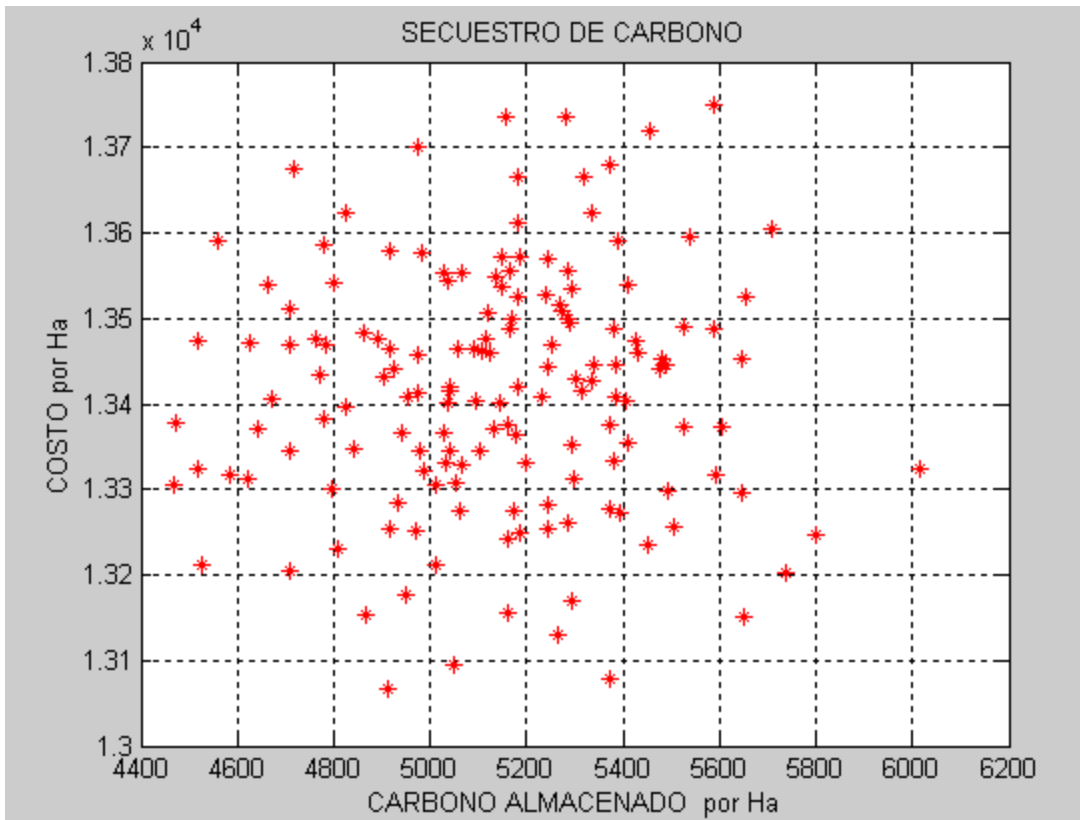


Fig 5.15 Gráfica para 30 datos con 20 iteraciones con  $\beta=0$   $\alpha=1$

Como se mencionó en el capítulo 3 el valor de  $\beta$  tienden a elegir los caminos más cortos. y en esta grafica se le asignó un valor  $\beta =0$ , y muestra un comportamiento de datos dispersos.

En la siguiente grafica se hizo una prueba de 30 datos con 20 iteraciones con un valor de beta de 3.

Con la grafica de la figura 5.16 se observa que un  $\beta = 3$  es un valor muy grande ya que las soluciones dadas no son tan aceptables.

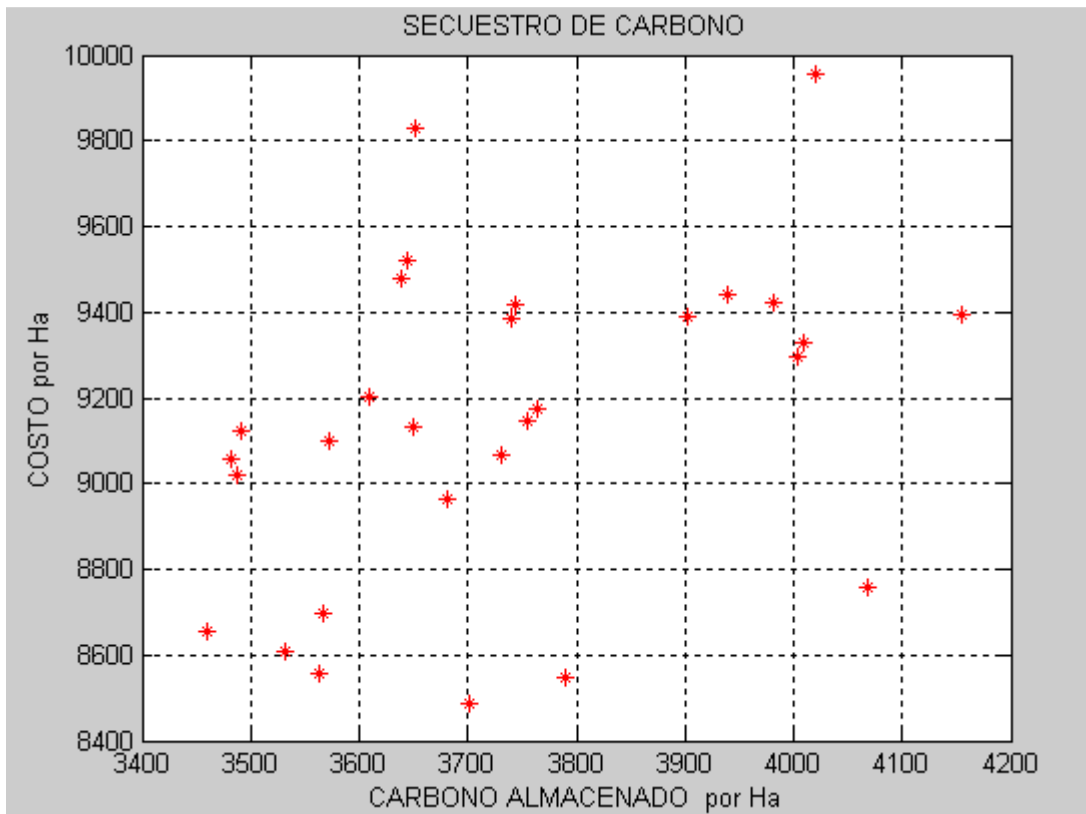


Fig 5.16 Gráfica para 30 datos con 20 iteraciones con beta=3

Hemos notado que los valores de alfa y beta son fundamentales en el algoritmo y que un alfa y beta iguales a 1 son los mejores valores que se pueden asignar para obtener soluciones aceptables.

## Capítulo 6

# Conclusiones

En esta tesis se prepresenta un software que minimizar el costo del secuestro de carbono y al mismo tiempo maximiza la obtención de este, obteniendo el costo de los bonos verdes.

Se usa la variante al Algoritmo de Colonia de Hormigas para resolver problemas bi-objetivo de estimar el Costo de Almacenamiento del Carbono.

Se realizó la implementación del Algoritmo de Colonia de Hormigas Bi-Objetivo (BicriterionAnt) para datos de Captura de Carbono de Cafetales de la Sierra Norte de Puebla, publicados en la tesis de Ticante[18] proporcionados por DICA obteniendo el Frente de Pareto, asi nos dimos cuenta que 6 municipios no son suficientes para poder obtener resultados con la mayor precisión posible, por lo tanto, se optó por generar problemas prueba dentro de los valores reales, reportados en la tesis.

En el capítulo 5, se presentaron diferentes pruebas variando el número de datos e iteraciones, encontrando Soluciones Factibles mostrando el Frente de Pareto con el cual estos datos calculados nos permitieron estimar así el Costo de los Bonos Verdes que va de \$2.43-\$2.72 por hectárea, de los Cafetales de la Sierra Norte de Puebla.

Y como trabajo a futuro, esta metodología se puede aplicar a otro tipo de cultivos, o pastizales, o bosques sin menoscabo de la estimación de los bonos verdes.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] Albrecht,A; Kandji, ST. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 99(1-3):15-27. 2003.

[2] Protocolo de Kioto, Instrumentos para reducir las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI), junio 2005

[3] Guadalupe Gálvez. *Milenio*, Puebla. 8 de octubre de 2007.

[4] Economía , *DW-WORLD.DE, DEUTSCHE WELLE* 3 de septiembre de 2006.

[5] Guiana Shield Initiative.

[http://www.guianashield.org/joomla/index.php?option=com\\_content&view=article&id=19&Itemid=27](http://www.guianashield.org/joomla/index.php?option=com_content&view=article&id=19&Itemid=27). Responsable: Iniciativa del estado Guayánes 2008.

[6] Kent McVay. Soil Microbiologist. Notas de Curso *Department of Agronomy Kansas State University*. August 2006

[7] José A. Benjamín Ordoñez Díaz. Captura de Carbono en un bosque templado, *Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo*, 1999

[8] C. Coello. Introducción a la Computación Evolutiva - Notas de Curso. *CINVESTAV, IPN Departamento de Ingeniería Eléctrica, Sección de Computación*, Mayo, 2003.

[9] Dorigo, M., Stützle, T., “*Ant Colony Optimization*”, Bradford Books, ISBN 0-262-04219-3, 25-33, 2004.

[10] Broggi, A., Massimo, C., Lombarda, P., Porta, M., “An Evolutionary Approach to Visual Sensing for Vehicle Navigation”, IEEE, *Design optimization of a microsuperconducting magnetic energystorage system*, Volume 35, Issue 5, Sep 1999 Page(s):4275 – 4284, 2003.

[11] Dorigo M., Maniezzo V. y Colorni A., “The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents”, *IEEE Transaction on Systems, Man, & Cybernetics*, Vol 26, No. 1, pg.1-13, 1996.

[12]M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Colorni. Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man. and Cybernetics*–Part B, 26(1):29–41, 1996.

[13] K. Doerner, W. Gutjahr, R. Hartl, C. Strauss y C. Stummer. “Pareto Ant Colony Optimization: A Metaheuristic Approach to Multiobjective Portfolio Selection”. *Proceedings of the 4th. Metaheuristics International Conference*. Porto, 243-248. 2002.

[14] B. Baran y M. Schaerer. “A multiobjective Ant Colony System for Vehicle Routing Problems with Time Windows”. Proc. Twenty first IASTED International Conference on Applied Informatics, pg. 97-102. Innsbruck, Austria. 2003

[15]L. Gambardella, E. Taillard y G. Agazzi. "MACS-VRPTW: A Multiple Ant Colony System for Vehicle Routing Problems with Time Windows". In D. Corne, M. Dorigo, F. Glover (Eds.), *New Ideas in Optimization*, McGraw-Hill, 73-76. 1999.

[16]S. Iredi, D. Merkle y M. Middendorf. "Bi-Criterion Optimization with Multi Colony Ant Algorithms". *Proc. First International Conference on Evolutionary Multi-criterion Optimization (EMO'01)*, *Lecture Notes in Computer Science* 1993, 359-372. 2001.

[17] M. Dorigo y G. Di Caro. "The Ant Colony Optimization Meta-Heuristic". In D. Corne, M. Dorigo, and F. Glover (Eds.), *New Ideas in Optimization*, McGraw Hill, London, UK, 11-32. 1999.

[18] José Antonio Ticante Roldán. Investigaciones Edafológicas sobre el estado de degradación de agrosistemas cafetaleros y otros agrosistemas en la Sierra Norte de Puebla. *UNAM* 2000..

[19] Charles A. Zelek and Gerald E. Shively, Measuring the Opportunity Cost of Carbon Sequestration in Tropical Agriculture, *Land Economics*, 79(3):342-354, Agosto 2003.

[20] INEGI, superficies sembrada y cosechada, volumen y valor de la producción agrícola por tipo de cultivo y principales cultivos, Año agrícola 2001/02. <http://www.inegi.gob.mx/inegi>. Responsable: INEGI. Actualización 2008.