

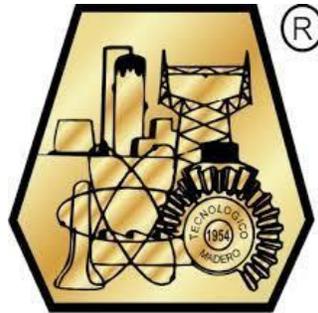


EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN



"POR MI PATRIA Y POR MI BIEN"

TESIS

**GENERACIÓN AUTOMÁTICA DE PARÁMETROS PARA EL MODELO
EPIDEMIOLÓGICO SEIMR/R-S**

Que para obtener el Grado de
Maestro en Ciencias de la Computación

Presenta
Ing. José Alfredo Brambila Hernández
G02070820
No. de CVU 1011850

Director de Tesis
Dr. Héctor Joaquín Fraire Huacuja
No. de CVU 123070

Co-Director de Tesis
Dr. Teodoro Eduardo Macias Escobar

Cd. Madero Tamaulipas

febrero de 2022

Ciudad Madero, Tamaulipas, **24/enero/2022**

OFICIO No.: U.019/22
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE
IMPRESIÓN DE TESIS

C. JOSÉ ALFREDO BRAMBILA HERNÁNDEZ
No. DE CONTROL G02070820
P R E S E N T E

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su Examen de Grado de Maestría en Ciencias de la Computación, se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

"GENERACIÓN AUTOMÁTICA DE PARÁMETROS PARA EL MODELO EPIDEMIOLÓGICO SEIMR/R-S"

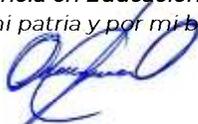
El Jurado está integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE:	DRA. CLAUDIA GUADALUPE GÓMEZ SANTILLÁN
SECRETARIO:	DR. NELSON RANGEL VALDEZ
VOCAL:	DR. HÉCTOR JIAQUÍN FRAIRE HUACUJA
SUPLENTE:	DRA. LAURA CRUZ REYES
DIRECTOR DE TESIS:	DR. HÉCTOR JIAQUÍN FRAIRE HUACUJA
CO-DIRECTOR:	DR. TEODORO EDUARDO MACÍAS ESCOBAR

Es muy satisfactorio para la División de Estudios de Posgrado e Investigación compartir con usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica
"Por mi patria y por mi bien"



MARCO ANTONIO CORONEL GARCÍA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



ccp. Archivo
MACG



Av. 1° de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz S/N Col. Los Mangos C.P. 89440 Cd. Madero, Tam.

Tel. 01 (833) 357 48 20, ext. 3110, e-mail: depi_cdmadero@tecnm.mx

tecnm.mx | cdmadero.tecnm.mx



Declaración de originalidad

Declaro y prometo que este documento de tesis es producto de mi trabajo original y que no infringe los derechos de terceros, tales como derechos de publicación, derechos de autor, patentes y similares. Por lo tanto, la obra es de mi autoría y soy titular de los derechos que surgen de la misma.

Declaro también que en las citas textuales que he incluido (las cuales aparecen entre comillas) y en los resúmenes que he realizado de publicaciones ajenas, indico explícitamente los datos de los autores y publicaciones. Este trabajo tesis fue evaluado con la herramienta Turnitin obteniendo como resultado un 5% de similitud con otros trabajos.

Además, en caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, acepto toda la responsabilidad de tal infracción y relevo de ésta a mi director y codirectores de tesis, así como al Tecnológico Nacional de México, al Instituto Tecnológico de Ciudad Madero y a sus respectivas autoridades.

José Alfredo Brambila Hernández

Resumen

El presente proyecto de investigación aborda el problema de la estimación de parámetros biológicos para un modelo epidemiológico basado en ecuaciones diferenciales, conocer los valores que deben tomar los parámetros biológicos es de suma importancia, ya que de ello depende el correcto funcionamiento del modelo. Se ha trabajado con el modelo SEIMR/R-S, el cual es de reciente creación, este modelo integra y mejora las características de los modelos SIR, SEIR y SEI3RD. Particularmente en este proyecto se ha trabajado con el ajuste de parámetros biológicos para tratar de ajustar la serie de fallecidos producida por el modelo, tomando como referente para hacer el ajuste un registro histórico con el acumulado de muertes por COVID-19 por día, en un periodo de días determinado, para resolver esto se ha propuesto un estimador de parámetros basado en un algoritmo evolutivo, específicamente un algoritmo genético, utilizando una representación de números reales para su cromosoma, su función objetivo consiste en encontrar la distancia promedio entre la serie resultado de la simulación y el registro histórico, entre más pequeña sea la distancia mejor la solución candidata será mejor evaluada, cada solución se compone de los parámetros biológicos que afectan directa e indirectamente a la serie de fallecidos del modelo.

Agradecimientos

Agradezco infinitamente todo el apoyo y sus enseñanzas a mi director de tesis, Dr. Héctor Joaquín Fraire Huacuja, de verdad gracias por confiar en mí, le agradezco el ser un guía y un ejemplo para mí, no tengo palabras para expresar el cariño y respeto que le tengo.

Agradezco a mi co-director de tesis, Dr. Teodoro Eduardo Macias Escobar por su apoyo y valiosos comentarios para la realización de este proyecto.

Agradezco a la Dra. Laura Cruz Reyes, por permitirme formar parte del proyecto “Modelos matemáticos de soporte a la toma de decisiones para la reducción del impacto socio-económico de la epidemia de COVID-19”, y agradezco todas sus enseñanzas.

Agradezco también al Dr. Jesús Velázquez Bermúdez por las enseñanzas que me ha dejado a lo largo de este proyecto.

Agradezco por todo el apoyo a mis maestros: Dra. Claudia Gómez Santillán, Dr. Nelson Rangel Valdez, Dra. María Lucila Morales Rodríguez, Dra. Guadalupe Castilla Valdez, Dr. Juan Frausto Solís, Dr. Juan Javier González Barbosa, Dr. Rodolfo Abraham Pazos Rangel y Dr. José Antonio Martínez Flores, gracias por todas sus enseñanzas y consejos.

Agradezco también a las personas que fueron mis jefes y que me inspiraron a seguir adelante y a superarme, mis exrectores de la Universidad Politécnica de Altamira, Dr. Enrique Fernández Fassnacht, Mtra. Sonia Maricela Sánchez Moreno y Mtro. Oscar Javier Alonso Banda, gracias por siempre confiar en mí.

También quiero agradecer a mis maestros de Licenciatura, Maestra Eurí Salgado Escobar, Maestra Laura Vélez Chong, Maestro Víctor Hugo Guerrero Treviño, Maestro Apolinar Ramírez Saldívar, gracias por todo.

Por último, quiero agradecer a mi familia por todo el apoyo que me han brindado todos estos años, a mis padres José Luis y Guadalupe, a mi tío Paco por apoyarme y me permitiera estudiar una carrera, a mis hermanos, agradezco de corazón a mi Evellyn por siempre ser mi apoyo y a nuestro hijo Axel por ser el motor que nos mueve día a día.

Tabla de Contenido

Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Antecedentes del proyecto	1
1.2. Problema de investigación	1
1.3. Objetivos de la tesis	2
1.3.1. Objetivo general	2
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. Alcances y delimitaciones	3
1.4.1. Alcances	3
1.4.2. Delimitaciones.....	3
1.5. Justificación y beneficios.....	3
Capítulo 2. Marco teórico.....	4
2.1. Modelos Epidemiológicos	4
2.1.1. Modelo SIR	4
2.1.2. Modelo SEIR.....	5
2.1.3. Modelo SEI3RD.....	6
2.1.4. Modelo SEIMR/R-S.....	7
2.2 Complejidad computacional	14
2.2.1 Problema de decisión	14
2.2.2 Clase P.....	14
2.2.3 Clase NP.....	14
2.2.4 Clase NP-Completo.....	15
2.2.5 Problema NP-Hard	15
2.2.6 Problema de optimización.....	15
2.3. Métodos de optimización.....	15
2.3.1 Métodos exactos.....	16
2.3.2. Métodos Heurísticos.....	16
2.3.3 Métodos metaheurísticos.....	17
2.3.4 Soluciones vecinas	17
2.3.5 Operador de vecindario	18
2.3.6 Óptimo local.....	18
2.4. Metaheurísticos poblacionales.....	18
2.4.1 Algoritmos evolutivos	18
2.4.2 Algoritmo Genético.....	19

2.5 Estrategias de ajuste de parámetros	20
2.5.1 Estrategia de ajuste de parámetros estática	20
Capítulo 3. Estado del arte.....	21
3.1 Revisión de trabajos relacionados con el ajuste de parámetros biológicos	21
Capítulo 4. Implementación del modelo SEIMR/R-S	24
4.1 Validación con el caso Base de la ciudad de Bogotá.....	24
4.2. Caso Tampico, Madero y Altamira Modelo	29
Capítulo 5. Algoritmo genético propuesto	32
5.1. Representación de la solución.....	32
5.2. Función Objetivo	32
5.3. Función de evaluación	33
5.4. Generación de la Población inicial	34
5.5. Selección	35
5.5.1. Selección por Torneo Determinista.....	35
5.5.2. Selección por Ruleta.....	36
5.6. Cruza para Representación Real	36
5.6.1. Cruza de dos puntos	37
5.6.2. Cruza SBX.....	37
5.7. Mutación para Representación Real	38
5.7.1. Mutación por Inserción	38
5.8. Algoritmo genético para el ajuste de la serie de muertos	39
Capítulo 6. Experimentación	40
6.1. Descripción de las instancias utilizadas.....	40
6.1.1. Instancias generadas con información del registro histórico de Secretaría de Salud de Tamaulipas	40
6.1.2 Instancias generadas con información del registro histórico de Secretaría de Salud Nacional	41
6.2. Configuración del Algoritmo Genético para Generación Automática de Parámetros Biológicos	43
6.2.1. Configuración para Instancia Tampico	45
6.2.2. Configuración para Instancia Madero	54
6.2.3. Configuración para Instancia Altamira	63
6.3. Experimentación con instancias generadas con información del registro histórico de Secretaría de Salud de Nacional.	72
Capítulo 7. Conclusiones y trabajos futuros	80

7.1. Cumplimientos de objetivos	80
7.1.1. Objetivo general	80
7.1.2. Objetivos específicos.....	80
7.2. Contribuciones principales	80
7.3. Publicaciones	81
7.4 Trabajos Futuros	82
Anexo A: Construcción de la Base de Datos para el Simulador del Modelo SEIMR/R-S ..	83
Anexo B: Informe de Originalidad de Turnitin	97
Anexo C: Instancias Utilizadas.....	101
Bibliografía.....	157

Capítulo 1. Introducción

Desde que la Organización Mundial de la Salud (OMS) declaró el brote de COVID-19 como una pandemia mundial el día 11 de marzo de 2020, diversos grupos de profesionales de la salud y científicos se han dedicado a tratar de predecir la propagación y el efecto de la pandemia, esto es un trabajo muy complicado y para ello se requieren herramientas que le permitan a los médicos, epidemiólogos y profesionales que trabajan en el control de la pandemia analizar la información de la evolución de la infección de forma rápida y efectiva, para ello se ha construido un simulador a partir de un nuevo modelo epidemiológico llamado SEIMR/R-S y un ajustador automático de parámetros biológicos para el mismo.

SEIMR/R-S corresponde a un modelo matemático generalizado de pandemias que mejora los modelos tradicionales de simulación agregada al considerar los impactos interregionales en una macrorregión (conurbada); SEIMR/R-S también considera el impacto de modelar la población dividida en segmentos sociodemográficos en función de la edad y el estrato económico. [Velásquez-Bermúdez, 2021].

El modelo SEIMR/R-S está construido a partir de ecuaciones diferenciales que dependen de ciertos parámetros biológicos para su correcto funcionamiento, algunos de ellos tienen un significado científico y otros pueden provenir de aproximaciones, desafortunadamente, la mayoría de los valores de los parámetros biológicos se desconocen, es por ello que la estimación de parámetros se vuelve esencial para modelar sistemas biológicos de forma correcta.

1.1. Antecedentes del proyecto

Este proyecto forma parte del proyecto “*Modelos matemáticos de soporte a la toma de decisiones para la reducción del impacto socio-económico de la epidemia de COVID-19*” realizado por el Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Ciudad Madero con el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

1.2. Problema de investigación

El problema de investigación consiste determinar los valores de los parámetros biológicos del modelo epidemiológico SEIMR/R-S propuesto por Jesús Velázquez

Bermúdez [Velásquez-Bermúdez, 2021] para que, al realizar la simulación de 365 días, la serie de muertos se ajuste al registro histórico en un periodo determinado.

El objetivo es desarrollar un método para estimar los valores de los parámetros biológicos de un simulador para el modelo SEIMR/R-S, para que produzca una simulación aproximada de los registros de muertes por COVID-19 acumulados por día en una región determinada.

Para este problema, se trabajará en la configuración de la serie de muertos, la cual se obtiene con la ecuación (1.1) que calcula el valor de la serie acumulada de muertes en la región rg y el segmento ss en el día $t+1$.

$$\frac{\partial D_{rg,ss}(t+1)}{\partial t} = \sum_{st \in IIF} \mu\sigma_{ss} \times I_{st,rg,ss}(t) \quad (1.1)$$

Donde:

$st \in IIF$ es el conjunto de estados de infección intermedios (I_1, I_2 e I_3).

$\mu\sigma_{ss}$ es la tasa de mortalidad según segmento (ver tabla 2.1).

$I_{st,rg,ss}(t)$ es el valor de un estado de infección intermedio para el día t .

Indirectamente esta ecuación depende de los estados de infección del modelo, por lo que los parámetros que afectan a la serie son: $\mu, \eta_2, \delta_2, \pi_3, \eta_3, \delta_3$, y ω para los cuales debemos encontrar un valor para cada uno, que le permitan al modelo generar una simulación de los muertos por COVID-19 aproximada a los datos reales capturados a una fecha determinada. Con los valores resultantes de los parámetros, se podrán hacer predicciones más precisas del número de muertos en una pandemia.

1.3. Objetivos de la tesis

1.3.1. Objetivo general

El objetivo de este proyecto es desarrollar un método para configurar automáticamente los parámetros biológicos de un simulador del modelo SEIMR/R-S, de tal manera que la serie de muertos generada se ajuste al registro histórico de muertos realizado desde el inicio de la pandemia.

1.3.2. Objetivos específicos

- Elaborar la propuesta
- Implementar un simulador del modelo
- Diseñar e implementar un Algoritmo Genético para ajustar automáticamente los parámetros biológicos del modelo SEIMR/R-S que afectan a la serie de muertos
- Evaluación experimental del simulador con ajuste automático de parámetros.

1.4. Alcances y delimitaciones

1.4.1. Alcances

El proyecto además de diseñar e implementar un método para configurar automáticamente los parámetros biológicos que afectan a la serie de muertos, también cubre la implementación de un simulador basado en el modelo epidemiológico SEIMR/R-S, el cual será desarrollado en el lenguaje de programación Java.

1.4.2. Delimitaciones

En este proyecto de investigación se considera únicamente el ajuste de la serie de muertos por COVID-19, por lo que no se hará un ajuste de las demás series que forman parte del modelo SEIMR/R-S.

1.5. Justificación y beneficios

La necesidad de obtener parámetros automáticos viene de la propuesta de implementar un simulador basado en el modelo epidemiológico SEIMR/R-S, el cual pretende servir como una herramienta fácil de usar para los médicos y epidemiólogos involucrados en los trabajos de análisis y predicción de una epidemia o pandemia. La interfaz del simulador deberá permitir modificar de forma manual los valores que pueden tomar los parámetros biológicos y volver a calcular los valores obtenidos por la simulación y las gráficas para cada estado, esto permitirá ver el comportamiento simulado de la epidemia de forma gráfica. Por otra parte, hacer el ajuste manual de parámetros biológicos para ajustar los valores de la simulación a los valores reales no es una tarea fácil, por lo que un método integrado en el simulador que ajuste automáticamente los parámetros a partir de un registro real de un periodo de n días le permitiría al simulador hacer predicciones más cercanas a la realidad.

Capítulo 2. Marco teórico

En este capítulo se describen algunos de los modelos epidemiológicos más conocidos, desde el primer modelo epidemiológico SIR hasta el modelo SEIMR/R-S, con el cual estaremos trabajando, además también se abordan conceptos relacionados con el desarrollo del ajustador de parámetros biológicos, como son los métodos de optimización heurísticos, de los cuales en este trabajo se ha utilizado un algoritmo evolutivo, particularmente un algoritmo genético, en esta sección también se describen los métodos exactos y los metaheurísticos, y para una mejor comprensión de los métodos de optimización heurísticos también se habla de conceptos como óptimo local, soluciones vecinas y operadores de vecindario.

2.1. Modelos Epidemiológicos

2.1.1. Modelo SIR

El modelo epidemiológico SIR es uno de los más simples, divide a la población en tres compartimentos (ver figura 2.1), fue desarrollado por William Ogilvy Kermack y Anderson Gray Kendrick en 1927 [Kermack & Kendrick, 1927]. El Proceso SIR, comienza con una persona susceptible que se infecta y pasa al estado de infectados, cuando esta persona infectada ya no es capaz de transmitir la infección a otro individuo este se pasa al estado de recuperados.

El modelo SIR describe la epidemia con tres estados:

1. Susceptible (S): inicialmente toda la población es propensa a infectarse
2. Infectado (I): población que ha sido infectada
3. Recuperado (R): población que se ha recuperado de la infección

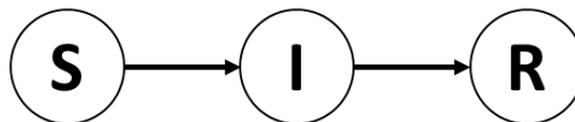


Figura 2.1. Diagrama del modelo epidémico SIR

Los parámetros biológicos utilizados en el modelo SIR se muestran a continuación en la tabla tomada parcialmente de [Velásquez-Bermúdez, 2021].

Tabla 2.1. Parámetros biológicos del modelo SIR

Parámetro	Descripción
γ	Tasa de recuperación de enfermos clínicamente
β	Intensidad de contacto inverso infectividad

El modelo SIR se representa en base a tres ecuaciones diferenciales basadas en fracciones de personas en cada estado, las ecuaciones son las siguientes:

$$\frac{\partial S(t+1)}{\partial t} = -\beta \times I(t) \times S(t) \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial I(t+1)}{\partial t} = \beta \times I(t) \times S(t) - \gamma \times I(t) \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial R(t+1)}{\partial t} = \gamma \times I(t) \quad (2.3)$$

Donde

S (t), I (t), R (t) representan la población de individuos susceptibles, infectados y recuperados, respectivamente. Sumando estas ecuaciones, se debe cumplir la siguiente condición

$$\frac{\partial S(t+1)}{\partial t} + \frac{\partial I(t+1)}{\partial t} + \frac{\partial R(t+1)}{\partial t} = 0 \quad (2.4)$$

2.1.2. Modelo SEIR

El modelo SEIR divide a la población en cuatro compartimentos diferentes (ver figura 2.2), los cuales son llamados también estados epidémicos, estos estados son: susceptibles (S), expuestos (E), infecciosos (I) y recuperados (R). Los parámetros biológicos del modelo SEIR son los mismos símbolos SIR más el parámetro ψ (ver tabla 2.2) que representa el inverso del período de latencia / incubación del virus (κ) [Velásquez-Bermúdez, 2021].

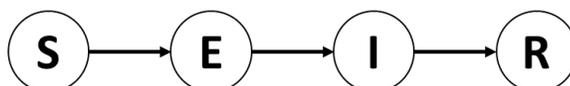


Figura 2.2. Diagrama de estados del modelo SEIR

Las ecuaciones del modelo SEIR son las mismas que las del modelo SIR añadiendo la ecuación del estado epidémico expuestos:

$$\frac{\partial E(t+1)}{\partial t} = \beta \times I(t) \times S(t) - \Psi \times E(t) + \lambda^E \times NPX(t) \quad (2.5)$$

Los parámetros biológicos utilizados en el modelo SEIR se muestran a continuación en la tabla tomada parcialmente de [Velásquez-Bermúdez, 2021].

Tabla 2.2. Parámetros biológicos del modelo SEIR

Parámetro	Descripción
γ	Tasa de recuperación de enfermos clínicamente
ψ	Período de latencia del virus inverso
β	Intensidad de contacto inverso infectividad

2.1.3. Modelo SEI3RD

El modelo epidemiológico SEI3RD divide a la población en ocho compartimientos (ver figura 2.3), fue desarrollado para simular como se transmiten y evolucionan las infecciones agudas, este modelo asume que el patógeno causa una infección, la cual es seguida de una inmunidad de por vida [Mejía et al, 2020].

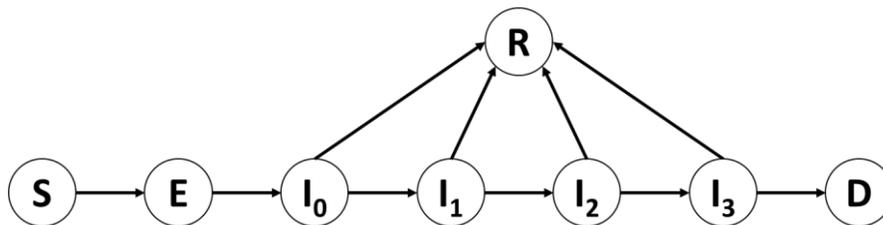


Figura 2.3. Diagrama del modelo SEI3RD

Los ocho compartimientos expuestos por el Dr. Juan Diego Mejía Becerra [Mejía et al, 2020] en los cuales se puede dividir la población se a continuación describen:

1. Susceptibles (S): Grupo de la población que aún no ha sido expuesto a un patógeno, por lo cual son susceptibles a ser infectados por el mismo.

2. Expuestos (E): Grupo de la población que ya está en el periodo de latencia del virus, es decir, han sido expuestos al patógeno, pero aún no son infecciosos.
3. Infecciosos Asintomáticos (I0): Grupo de la población que ha sido infectado por el virus, son infecciosos y pueden infectar a otros individuos, pero no han desarrollado síntomas. Por lo regular las personas asintomáticas no saben que están contagiadas por el virus.
4. Infecciosos con síntomas moderados (I1): Grupo de la población que ha sido infectado, son infecciosos y presentan síntomas moderados o leves. Para este grupo de personas la enfermedad se puede manejar en casa.
5. Infecciosos con síntomas severos (I2): Grupo de la población que ha sido infectado, son infecciosos y presentan síntomas severos, pero no críticos, debido a esto requieren hospitalización.
6. Infecciosos con síntomas críticos (I3): Grupo de la población que ha sido infectado, son infecciosos y presentan síntomas críticos, la población que se encuentra en este estado requiere ser atendida en una unidad de cuidados intensivos.
7. Recuperados (R): Son los individuos que se han recuperado, y han desarrollado anticuerpos por lo que no el modelo considera que no se pueden volver a infectar.
8. Muertos (D): Son los individuos que han fallecido por el virus, ya que no pudieron superar la infección.

2.1.4. Modelo SEIMR/R-S

El modelo SEIMR/R-S es un modelo epidemiológico resultante de la integración de los modelos SIR, SEIR y SEI3RD, una característica común en estos tres modelos es que la población se agrupa en un solo grupo de homogéneo, el modelo SEIMR/R-S extiende esto a un sistema de modelado multirregional al considerar el desarrollo de la epidemia en un territorio (macrorregión) que incluye múltiples regiones en las que los segmentos sociodemográficos de la población se distribuyen de forma no uniforme [Velásquez-Bermúdez, 2021].

Incluir la modelización de segmentos regionales y sociodemográficos (en este caso, edad y estrato económico) implica asociar los parámetros biológicos con estos aspectos. Por tanto, los parámetros biológicos pueden estar relacionados con índices: rg (región), ss (segmento sociodemográfico), ag (edad) y/o se (estrato económico).

El modelo SEIMR/R-S describe la epidemia con los siguientes estados:

- Susceptible (S): inicialmente toda la población que es susceptible a infectarse.
- Expuesto (E): Población que ha sido infectada y se encuentra en período de incubación (latencia). El modelo SIR no incluye este estado.
- Multi-Infectado (IM): Población que ha sido infectada y tiene activo el patógeno en diferentes estados de desarrollo ($I_0, I_1, I_2, \dots, I_N$). Los estados infectados activos se ordenan según la gravedad de la infección. El SIR y SEIR modelados consideran solo un estado infectado. Por conveniencia, el último estado se llama "IN"
- Recuperado (R): Población que se ha recuperado de la infección.
- R-S está relacionado con el modelo Región-Segmento que considera múltiples regiones donde viven personas clasificadas en múltiples segmentos sociodemográficos.

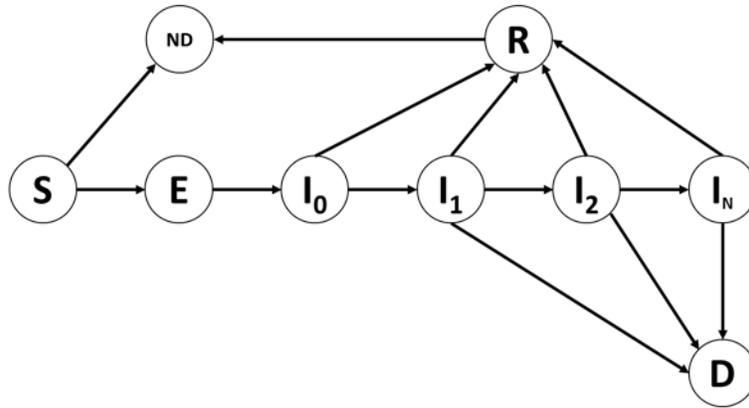


Figura 2.4. Diagrama de transición de estados del modelo SEIMR/RS

Las ecuaciones diferenciales del modelo segmentado regionalmente propuestas por el Dr. Jesús Velásquez Bermúdez [Velásquez-Bermúdez, 2021] se muestran a continuación:

$$\frac{\partial S_{rg,ss}(t+1)}{\partial t} = -S I_{rg,ss}(t) - \mu^N \times S_{rg,ss}(t) + \lambda_{rg,ss}^S \times NPX(t) \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial E_{rg,ss}(t+1)}{\partial t} = S I_{rg,ss}(t) - \Psi \times E_{rg,ss}(t) + \lambda_{rg,ss}^E \times NPX(t) \quad (2.7)$$

$st=I_0$

$$\frac{\partial I_{st,rg,ss}(t+1)}{\partial t} = \Psi \times E_{rg,ss}(t) - \delta \alpha_{st,ss} \times I_{st,rg,ss}(t) + \lambda_{rg,ss}^I \times NPX(t) \quad (2.8)$$

$st \in IIF$

$$\frac{\partial I_{st,rg,ss}(t+1)}{\partial t} = \delta \zeta_{st-1,ss} \times I_{st-1,rg,ss}(t) - \delta \alpha_{st,ss} \times I_{st,rg,ss}(t) \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial R_{st,rg,ss}(t+1)}{\partial t} = \sum_{st \in IIF} \delta \beta_{st-1,ss} \times I_{st,rg,ss}(t) - \mu^N \times R_{rg,ss}(t) + \sum_{ss \in SSR(rg)} \lambda_{rg,ss}^R \times NPX(t) \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial D_{rg,ss}(t+1)}{\partial t} = \sum_{st \in IIF} \mu \sigma_{ss} \times I_{st,rg,ss}(t) \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial ND_{rg,ss}(t+1)}{\partial t} = \mu^N \times SR_{rg,ss}(t) + \mu^N \times RR_{rg}(t) \quad (2.12)$$

Donde

$S_{rg,ss}(t)$ es el valor de la fracción de población susceptible en la región rg y el segmento ss para el día t .

$S2I_{rg,ss}(t)$ es la ecuación que calcula la fracción de población susceptible que se infecta en una región rg más los infectados de una región destino rd . (Ver ecuación 2.22).

$E_{rg,ss}(t)$ es el valor de la fracción de la población expuesta en la región rg y el segmento ss para el día t .

$R_{rg,ss}(t)$ es el valor de la fracción de la población recuperada en la región rg y el segmento ss para el día t .

$D_{rg,ss}(t)$ es el valor de la fracción de la población fallecida en la región rg y el segmento ss para el día t .

$ND_{rg,ss}(t)$ es el valor de la fracción de la población fallecida por causas naturales en la región rg y el segmento ss para el día t .

IO es el conjunto de estados de infección que contiene al estado I_0 .

IIF es el conjunto de estados de infección que contiene a los estados $I_1, I_2 \dots I_n$.

2.4.1.1 Modelado regional

Movimiento de infectados

El incrementando la tasa de difusión en la localidad de destino debido a los infectados por venir de otras regiones, se calcula como:

$$II_{rg}(t) = \sum_{ss \in SSR(rg)} \sum_{ro \in ROR(rg)} \varphi_{ro,rg,ss} \times IS_{ro,ss}(t) \quad (2.13)$$

La disminución de la tasa de difusión en la región de origen debido a que los infectados se mudan a otras regiones, se calcula como:

$$IE_{rg}(t) = \sum_{ss \in SSR(rg)} \sum_{rd \in RDE(rg)} \varphi_{rg,rd,ss} \times \phi_{rg,rd,ss} \times IS_{ro,ss}(t) \quad (2.14)$$

El efecto neto en la región rg será:

$$IS_{rg,ss}(t) = \sum_{st \in I1F} I_{st,rg,ss}(t) \quad (2.15)$$

$$IX_{rg}(t) = \sum_{ss \in SSR(rg)} IS_{rg,ss}(t) \quad (2.16)$$

$$IR_{rg}(t) = IX_{rg}(t) + II_{rg}(t) - IE_{rg}(t) \quad (2.17)$$

Dónde:

$I_{st,rg,ss}(t)$ es la fracción de la población infectada en el estado st que vive en la región rg y el segmento ss .

$IS_{rg,ss}(t)$ es la fracción de la población infectada que vive en la región rg y el segmento ss .

$IX_{rg}(t)$ es la fracción de la población infectada que vive en la región rg .

$II_{rg}(t)$ es la fracción ponderada de la población infectada que viaja a la región rg .

$IE_{rg}(t)$ es la fracción ponderada de la población infectada que viaja desde la región rg .

Movimientos susceptibles

Aumentando la tasa de difusión en la localidad de destino (región rd) debido a las personas susceptibles que provienen de otras regiones que pueden estar infectadas en la región rg , se calcula como:

$$SI_{ro,rg,ss}(t) = \varphi_{ro,rg,ss} \times \phi_{ro,rg,ss} \times S_{ro,ss}(t) \quad (2.18)$$

Se incluirá el siguiente reemplazo de parámetro

$$\varphi\phi_{ro,rg,ss} = \varphi_{ro,rg,ss} \times \phi_{ro,rg,ss} \quad (2.19)$$

Disminución de la tasa de difusión en la región de origen ro debido a que las personas susceptibles se mudan a otras regiones que no pueden infectarse en la región rg , se calcula como:

$$SE_{rg,rd,ss}(t) = \varphi\phi_{ro,rg,ss} \times S_{rd,ss}(t) \quad (2.20)$$

La población susceptible que vive en el segmento ss de la región rg debe ser disminuida por las personas susceptibles que pertenecen a otras regiones:

$$SN_{rg,ss}(t) = S_{rg,ss} - \sum_{rd \in RDE(rg)} SE_{rg,rd,ss}(t) \quad (2.21)$$

Dónde

$S_{rg,ss}(t)$ fracción de la población susceptible que vive en la región rg y el segmento ss .

$SI_{ro,rg,ss}(t)$ fracción de la población susceptible del segmento ss que viaja de la región ro a la región rg .

$SE_{rg,rd,ss}(t)$ fracción de la población susceptible del segmento ss que viaja de la región rg a la región rd .

Modelado de Segmento Socio Demográfico

Una persona infectada en cualquier segmento puede infectar a cualquier persona susceptible en cualquier segmento sociodemográfico.

El proceso de cálculo implica que, a nivel de una región, la población de cualquier segmento puede infectar a la población de cualquier otro segmento. Para hacer esto, la difusión (infección de susceptibles de infectados) se maneja a un nivel detallado en las ecuaciones diferenciales para todos los estados infectados, pero en la ecuación diferencial la transmisión infectada se calcula en base a la suma de todos los estados infectados en todos los segmentos ss .

El contagio de la población susceptible que vive en la región rg y que pertenece al segmento ss será la suma de los contagios que ocurren en la región rg (personas que no viajan fuera de la región rg) más el contagio que ocurren en las regiones de destino rd esto es:

$$S2I_{rg,ss}(t) = \beta\beta_{rg,ss} \times IR_{rg}(t) \times SN_{rg,ss}(t) + \sum_{rd \in RDE(rg)} \beta\beta_{rg,ss} \times IR_{rd}(t) \times SE_{rg,rd,ss}(t) \quad (2.22)$$

2.4.1.2 Parámetros biológicos modelo SEIMR/R-S

El modelo epidemiológico SEIMR/R-S utiliza cuatro tipos de parámetros epidemiológicos, el primer tipo son los parámetros que cargan directamente al modelo, el segundo tipo son los parámetros calculados, estos se calculan a partir de los parámetros que se cargan directamente al modelo, el tercer tipo son los parámetros sociodemográficos, que también se calculan en base a los parámetros que se cargan directamente al modelo y la información relacionada con los estratos y edades de la población, y el cuarto tipo son los parámetros asociados al modelado regional que contempla la movilidad entre regiones.

A continuación, se muestran las tablas con los parámetros biológicos que se cargan directamente al modelo SEIMR/R-S tomadas de [Velásquez-Bermúdez, 2021].

Tabla 2.3. Parámetros biológicos del modelo SEIMR/R-S

Parámetro	Descripción
μ^N	Tasa de mortalidad natural
κ	El período de latencia del virus antes de desarrollarse
μ_{ag}	Tasa de mortalidad epidémica
$\omega_{rg,ss}$	Probabilidad de que una persona pueda ser contagiada
$\delta_{ag,st}$	Probabilidad de $I_0, I_1, I_2, I_3, \dots$ de recuperación
$\pi_{ag,st}$	Tiempo que un paciente en $I_0, I_1, I_2, I_3, \dots$ se recupera
$\eta_{ag,st}$	Tiempo de un paciente en $I_0, I_1, I_2, I_3, \dots$ al siguiente estado de infección
β	Tasa de transmisibilidad de un individuo en el estado st
ζ	Tasa total libre de contacto en I_1, I_2, I_3, \dots
$c_{ag,st}$	Probabilidad libre de contagio en el estado I_1, I_2, I_3, \dots

Los parámetros biológicos calculados utilizados en el modelo SEIMR/R-S se presentan a continuación en la siguiente tabla tomada de [Velásquez-Bermúdez, 2021]:

Tabla 2.4. Parámetros biológicos calculados del modelo SEIMR/R-S

Parámetro	Ecuación	Descripción
$\gamma_{ag,st}$	$1/\pi_{ag,st}$	Fracción de personas que se recuperan en un día
$\sigma_{ag,st}$	$1/\eta_{ag,st}$	Fracción de personas que desarrollan síntomas

Parámetro	Ecuación	Descripción
β_{st}	$-\xi_{st} \log(1 - c_{ag,st})$	$I_0, I_1, I_2, I_3, \dots$ estado tasa de transmisibilidad
ψ	$1/\kappa$	Período inverso de latencia del virus
$\sigma\delta_{ag,st}$	$\delta_{ag,st} \sigma_{ag,st}$	$\delta_{ag,st} \sigma_{ag,st}$
$\delta\sigma_{ag,st}$	$(1 - \delta_{ag,st}) \sigma_{ag,st}$	$(1 - \delta_{ag,st}) \sigma_{ag,st}$
$\delta\gamma_{ag,st}$	$\delta_{ag,st} \gamma_{ag,st}$	$\delta_{ag,st} \gamma_{ag,st}$
$\delta\delta_{ag,st}$	$\delta\gamma_{ag,st} + \delta\sigma_{ag,st}$	$\delta\gamma_{ag,st} + \delta\sigma_{ag,st}$
μ_{ag}	$\sum_{st \in IF} \delta\sigma_{ag,st}$	$\sum_{st \in IF} \delta\sigma_{ag,st}$
$\beta\rho_{rg,ss}$	<i>Model</i>	Función de probabilidad de contagio de características regionales y sociodemográficas
$\beta\beta_{rg,ss}$	$\sum_{ag \in AGS(ss)} \delta\delta_{ag,st} \times \beta\rho_{rg,ss}$	Intensidad de contacto inverso x infectividad

Los parámetros biológicos socio demográficos se muestran en la siguiente tabla tomada de [Velásquez-Bermúdez, 2021]:

Tabla 2.5. Parámetros biológicos socio demográficos del modelo SEIMR/R-S

Parámetro	Ecuación	Descripción
$\delta\alpha_{st,ss}$	$\sum_{ag \in AGS(ss)} \delta\delta_{ag,st}$	Tasa de salida total por estado de infección y segmento
$\delta\zeta_{st,ss}$	$\sum_{ag \in AGS(ss)} \delta\sigma_{ag,st}$	Empeoramiento de la tasa de salida por estado de infección y segmento
$\delta\beta_{st,ss}$	$\sum_{ag \in AGS(ss)} \delta\gamma_{st,ag}$	Tasa de salida de recuperados por estado de infección y segmento
$\mu\sigma_{ss}$	$\sum_{ag \in AGS(ss)} \mu_{ag}$	Tasa de mortalidad según segmento
μ_{ag}	$\sum_{st \in IF} \delta\sigma_{ag,st}$	Tasa de mortalidad según edad

Los parámetros asociados con el modelado regional se muestran en la siguiente tabla tomada de [Velásquez-Bermúdez, 2021]:

Tabla 2.6. Parámetros biológicos asociados al modelado regional modelo SEIMR/R-S

Parámetro	Descripción
-----------	-------------

$\phi_{ro,rg,ss}$	Fracción de la población del segmento ss que se mueve desde la región de origen (ro) a la región de destino (rd)
$\phi_{rg,rd,ss}$	Fracción de tiempo que pasa la población del segmento ss de la región de origen (ro) en la región de destino (rd)
$\varphi\phi_{rg,rd,ss}$	$\Phi_{rg,rd,ss} \times \phi_{rg,rd,ss}$

2.2 Complejidad computacional

2.2.1 Problema de decisión

Un problema de decisión es el que tiene como respuesta sí o no [Sipser, 2006], desde un punto de vista formal Abraham Duarte Muñoz [Duarte et al, 2010] lo define como:

“Dado un lenguaje L de palabras construido sobre un alfabeto α , la comprobación de que una palabra x está en L recibe el nombre de problema de decisión”.

2.2.2 Clase P

Los problemas para los cuales existe alguna fórmula polinómica o algoritmo polinómico se denominan P. Se dice que un problema puede resolverse en tiempo polinomial cuando el tiempo de ejecución de un algoritmo que lo puede resolver puede relacionarse con el tamaño de las variables de entrada usando una formula polinómica [Duarte et al, 2010].

2.2.3 Clase NP

En el área de la optimización combinatoria existe una gran cantidad de problemas que son difíciles de resolver, es decir, aun no se han encontrado algoritmos que obtengan una solución óptima para ellos en tiempo polinómico, por lo cual no es posible que se puedan resolver en un tiempo razonable de ejecución. Existen problemas para los cuales aún no se ha encontrado un algoritmo polinómico que los pueda resolver, si se puede conocer si un valor corresponde a una solución en tiempo polinómico, a este tipo de problemas de les denomina NP. Los problemas de la clase P son también pertenecen a la clase NP, ya que es posible comprobar en tiempo polinómico que un determinado valor es la solución al problema [Duarte et al, 2010].

2.2.4 Clase NP-Completo

Existe otro tipo de problema llamado NP-Completo, para este tipo de problemas no se conoce un algoritmo que lo pueda resolver en tiempo polinómico, aun no se ha podido formalmente demostrar que exista, pero los matemáticos creen que no existe. Este problema es un subconjunto de la clase NP. Se dice que un problema A del tipo NP-Completo, se puede reducir a otro problema B cuando es posible crear un algoritmo que pueda resolver el problema A utilizando un algoritmo como una caja negra para resolver el problema B, considerando que la caja negra resuelve B se ejecuta en un único paso, el algoritmo para resolver A es polinómico [Duarte et al, 2010].

2.2.5 Problema NP-Hard

Los problemas NP-Hard o NP-Duros no son un subconjunto de los problemas NP, es decir para los problemas NP-Hard no existe un algoritmo polinomial que nos permita comprobar una solución. Para que se pueda considerar un problema como NP-Hard, deberá de existir un problema NP-Completo que sea reducible a ese problema, es decir debe de existir algún algoritmo polinómico que se pueda usar como una caja negra que pueda resolver el problema NP-Duro para resolver un problema de tipo NP-Completo [Duarte et al, 2010].

2.2.6 Problema de optimización

Como problema de optimización se puede decir que es aquel problema en el que existen varias soluciones posibles, además de un método para comparación entre ellas, de forma que un problema de optimización solo puede existir si se dispone de un conjunto de soluciones candidatas distintas que puedan ser comparadas entre si [Duarte et al, 2010].

2.3. Métodos de optimización

Los métodos de optimización pueden clasificarse en dos tipos de métodos, los exactos y los heurísticos. La diferencia entre ambos es que los métodos exactos nos garantizan encontrar de forma sistemática una solución óptima a un problema de optimización, mientras que los métodos heurísticos encuentran una solución aproximada al problema en un tiempo relativamente pequeño, pero sin garantizar encontrar la solución óptima.

2.3.1 Métodos exactos

Los métodos exactos se han aplicado con éxito a una gran cantidad de problemas, entre ellos se encuentran los algoritmos voraces, los algoritmos de divide y vencerás, los algoritmos de ramificación y poda, y los algoritmos de bracktraking entre otros. Todos estos algoritmos resuelven los problemas que pertenecen a la clase P de forma óptima y en un tiempo razonable, para la clase de problemas denominada NP se desconocen algoritmos exactos que puedan resolver el problema en tiempo polinómico, aunque exista un algoritmo que encuentre la solución, este tardaría mucho tiempo en encontrarla por lo que no sería aceptable. Un algoritmo exacto siempre dependerá del problema o familia de problemas a resolver, por lo cual, cuando el problema cambia, se debe diseñar un algoritmo exacto para el nuevo problema y demostrar que es óptimo [Duarte et al, 2010].

2.3.2. Métodos Heurísticos

La palabra heurística proviene del vocablo griego “heurisken” que se podría traducir como “encontrar, descubrir o hallar”. Desde el punto de vista científico, el primero en usar el termino heurística fue el matemático George Pólya [Polya, 1971] quien lo utilizó en su libro “How to solve it” [Duarte et al, 2010].

Stelios H. Zanakis define los métodos heurísticos como procedimientos simples y convencionales, los cuales se supone que pueden lograr soluciones buenas, aunque no sean necesariamente óptimas, para problemas difíciles de manera rápida y sencilla [Zanakis and Evans, 1981].

Para la mayoría de los problemas del mundo real, no existe un algoritmo exacto que sea de complejidad polinómica que sea capaz de encontrar la solución a dichos problemas. El uso de estos algoritmos se hace no viable, debido a la cantidad de tiempo necesario para encontrar la solución dentro de todo el espacio de soluciones no es aceptable. Debido a esto, se necesita utilizar algoritmo heurísticos o aproximados que puedan obtener una solución de calidad en un tiempo que sea razonable. [Duarte et al, 2010].

Los heurísticos utilizan reglas, estrategias o aproximaciones basadas generalmente en conocimientos empíricos para guiar la búsqueda. Nicholson y Reeves ofrecen las siguientes definiciones de heurística:

- “Un procedimiento para resolver problemas por medio de un método intuitivo en el que la estructura del problema puede interpretarse y explotarse inteligentemente para obtener una solución razonable” [Nicholson, 2007].
- “Una técnica que busca buenas soluciones con un tiempo de computación razonable sin garantizar la optimalidad” [Reeves, 1993].

2.3.3 Métodos metaheurísticos

La principal limitación de los métodos heurísticos es nula capacidad para salir de óptimos locales debido a que no utilizan mecanismos para continuar con la búsqueda de la solución óptima en caso se quedar atrapados, para resolver esto, se han introducido algoritmos de búsqueda, los cuales son más inteligentes llamados metaheurísticas, los cuales se encargan de evitar este problema. Fred Glover fue quien acuñó el término metaheurística o meta-heurística en el año 1986 [Duarte et al, 2010].

Las siguientes definiciones aportadas por diferentes investigadores describen sus principales propiedades:

- Son métodos aproximados que han sido diseñados para la resolución de problemas de optimización combinatoria difíciles, en los cuales los métodos heurísticos clásicos no son eficientes [Duarte et al, 2010].
- Un metaheurístico es un proceso iterativo que combina conceptos derivados de las ciencias naturales, la biología, las matemáticas, la física y la inteligencia artificial, para guiar de forma inteligente una heurística subordinada durante la exploración y explotación del espacio de búsqueda con el fin de encontrar soluciones cercanas al óptimo de forma eficiente [Kelly & Osman, 1996].

2.3.4 Soluciones vecinas

En optimización una solución \vec{x}' vecina de \vec{x} es aquella que se encuentra dentro de su vecindario $N(\vec{x})$ es decir “próxima”, un vecindario son todas aquellas soluciones que pueden ser producidas a partir de \vec{x}' mediante una sola perturbación [Duarte et al, 2010].

2.3.5 Operador de vecindario

Un operador de vecindario transforma una solución inicial \vec{x} y permite alcanzar todas sus soluciones en $N(\vec{x})$ mediante movimientos (aplicaciones del operador). En problemas de ordenamiento lineal usualmente se utilizan intercambios o inserciones [Santiago, 2013].

2.3.6 Óptimo local

Un óptimo local es una solución $\vec{x} \mid \neg \exists \vec{x}' \in N(\vec{x}) \mid f(\vec{x}) > f(\vec{x}')$ [Duarte et al, 2010]. En optimización multiobjetivo la noción de óptimo local tiene que ser definida en términos de óptimo de Pareto. Una solución \vec{u} se dice que es un óptimo local con respecto a un vecindario $N(\vec{u})$ si $\neg \exists \vec{u}'$ tal que $\vec{u}' < \vec{u}$ donde $<$ representa la dominancia de Pareto [Liefvooghe et al, 2011].

2.4. Metaheurísticos poblacionales

Estos metaheurísticos comienzan el proceso de optimización a partir de diferentes puntos de búsqueda el cual llevan a cabo manteniendo un conjunto de soluciones diverso llamado población. Al conjunto de individuos de la población se le asigna un valor de aptitud, conforme la búsqueda avanza los individuos con mejor aptitud conocida (mejores soluciones encontradas) son conservados, y los de baja aptitud descartados [Santiago, 2018].

Dentro de los metaheurísticos poblacionales más utilizados se encuentran:

- Algoritmos genéticos (GA)
- Algoritmos meméticos (MA)
- Búsqueda dispersa (SS)

2.4.1 Algoritmos evolutivos

Este tipo de algoritmos son metaheurísticos guiados por una búsqueda poblacional, en la que los individuos de la población con mejores valores de aptitud tienen mayor posibilidad de supervivencia, así como de generar descendencia (soluciones derivadas) [Duarte et al, 2010]. Existe una variedad de algoritmos evolutivos, así como estrategias evolutivas empleadas, sin embargo, los algoritmos evolutivos más utilizados son: el algoritmo genético y el algoritmo memético (algoritmo genético extendido).

2.4.2 Algoritmo Genético

Estos algoritmos son una clase particular de algoritmo evolutivo, introducidos por John Henry Holland [Holland, 1992]. Utilizan tres operaciones principales de reproducción; selección, cruza y mutación [Duarte et al, 2010].

- Selección: mecanismo probabilista que favorece a los individuos más aptos para tener descendencia.
- Cruza: intercambio de información entre dos individuos o más para generar descendencia.
- Mutación: cambio aleatorio a la información de un individuo.
- Selección ambiental: proceso análogo a la selección natural mediante el cual solo los individuos más aptos sobreviven.

Después de la aplicación de los operadores genéticos el proceso de selección ambiental permite depurar a los individuos menos aptos, sobreviviendo los de mayor valor de aptitud. En el caso de la optimización mono-objetivo generalmente son los que tienen mejor valor de la función objetivo, a continuación, se muestra un algoritmo genético básico.

Algoritmo 2.1. Algoritmo Genético Básico

```

1: pop = generarPoblacionInicial()
2: Evaluar(pop)
3: WHILE NOT terminado DO
4: BEGIN
5:   FOR Tamaño pop/2
6:   BEGIN
7:     Seleccionar 2 individuos de la anterior generación para la cruza
8:     Cruzar los 2 individuos con una cierta probabilidad para dos descendientes
9:     Mutar los dos individuos descendientes con una cierta probabilidad
10:    Evaluar la aptitud de los dos descendientes mutados
11:    Añadir los dos descendientes mutados a la nueva generación
12:   END
13: IF la población ha convergido THEN
14:   Terminado = TRUE
15: END IF
16: END

```

2.5 Estrategias de ajuste de parámetros

Desde los primeros Algoritmo Evolutivos han podido observar ejemplos de parámetros cuyos valores permanecieron fijos a lo largo de la ejecución del algoritmo, los cuales son llamados estáticos y parámetros cuyos valores se modifican dinámicamente durante la ejecución llamados dinámicos.

2.5.1 Estrategia de ajuste de parámetros estática

El ajuste de parámetros puede plantear dilemas al momento de cómo realizarlo, en ocasiones se adopta un enfoque de ejecución múltiple, en el que se prueban varias configuraciones de parámetros en un intento de ajustar un algoritmo evolutivo, pero dado a que explorar el espacio de parámetros de un algoritmo evolutivo consume mucho tiempo y es computacionalmente costoso, se hace un entorno más general fuera de línea, la idea de esto es encontrar configuraciones de parámetros que sean óptimas para una clase de problemas usando un procedimiento de barrido u optimización en un conjunto de pruebas seleccionado de problemas muestra, y luego usar esas configuraciones en problemas de la misma clase [De Jong, 2007].

Capítulo 3. Estado del arte

En este capítulo se presentan los trabajos relacionados con el ajuste de parámetros biológicos, el propósito de este capítulo es revisar los métodos que se están utilizando para el ajuste de parámetros biológicos y a que modelos epidemiológicos se están aplicando.

3.1 Revisión de trabajos relacionados con el ajuste de parámetros biológicos

En el trabajo de Li Changguo se propone hacer una estimación de parámetros del modelo SIR mediante el algoritmo de Newton-Raphson y la técnica de Markov Chain Monte Carlo (MCMC), en este trabajo solo estiman los valores de β y λ [Changguo et al, 2018].

Carmen Coll Begoña Cantó en su trabajo, asume que los valores de los parámetros son desconocidos. En este trabajo se parte de la observación para obtener valores iniciales para los parámetros biológicos, se generan un conjunto de datos k y un vector de parámetros p , una vez que el vector de parámetros tiene valores se utiliza en un sistema de ecuaciones, a partir de los datos del conjunto k de datos observado, se quiere estimar el valor de vector p , es decir, quiere encontrar el vector de parámetro que minimiza la función cuadrática, esto se puede hacer n veces, mediante el método de mínimos cuadrados han mostrado el método de gradiente descendente y una condición para asegurar que el parámetro estimado tenga una norma menor que 1, además proponen una ecuación de recurrencia cuando se consideran más datos observados y establecen una condición para asegurar que las aproximaciones consecutivas del parámetro sean lo suficientemente cercanas [Begoña & Sánchez, 2017].

A. S. Talawar y U. R. Aundhakar estiman los valores de los parámetros de una versión estocástica del modelo SIR que incluye la estimación de muerto, teniendo en cuenta que los tiempos de recuperación e infección son continuos. Utilizan un enfoque de Markov Chain Monte Carlo (MCMC) para manejar la estimación los parámetros β , κ , γ y μ [Talawar & Aundhakar, 2016].

Soufiane Bentout en su trabajo utiliza el modelo epidemiológico SEIR, con los métodos de mínimos cuadrados y la curva de mejor ajuste que minimiza la suma de los residuos cuadrados han estimado el parámetro epidémico β y el número de reproducción básico R_0 , para probar han utilizado los datos de casos confirmados de COVID-19 en Argelia que están

disponibles en el mapa epidemiológico de Google, los datos consisten en el número diario notificado de casos nuevos y casos acumulados de COVID-19 en Argelia del 25 de febrero al 18 de abril de 2020. [Bentout et al, 2020].

Tabla 3.1. Tabla comparativa de métodos de estimación de parámetros

Trabajo	Método utilizado para estimación de parámetros	Modelo Epidemiológico	Parámetros estimados	Comparación de resultados
<i>"Parameter Estimation on a Stochastic SIR Model with Media Coverage"</i> . (Changguo et al, 2018)	Algoritmo de Newton-Raphson y el método de Markov Chain Monte Carlo (MCMC)	SIR	β y λ	El registro de datos de una infección tomadas para comparación es simulado, los datos son generados por el algoritmo Gillespie, para 120,000 personas a 80 días.
<i>"Estimation of parameters in a structured SIR model"</i> . (Begoña & Sánchez, 2017)	Método de mínimos cuadrados y método de gradiente descendente	SIR	$f_1, f_2, f_3, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$	El registro de datos de una infección tomadas para comparación es simulado para una población de 90,000 personas y un registro de 15 días
<i>"Parameter Estimation of SIR Epidemic Model Using MCMC Methods"</i> . (Talawar & Aundhakar, 2016)	Método de Markov Chain Monte Carlo (MCMC)	Versión estocástica del modelo SIR	β, κ, γ y μ	Generan sus propios registros a partir de datos históricos de las epidemias por Influenza, para una población de 1000 personas y un registro a 40 días
<i>"Parameter estimation and prediction for coronavirus disease outbreak 2019 (COVID-19) in Algeria"</i> . (Bentout et al, 2020)	Métodos de mínimos cuadrados y curva de mejor ajuste.	SEIR	β y R_0	Utilizan el registro de casos de COVID-19 de Argelia del 25 de febrero al 18 de abril para comparación. Se aplica a toda la población de Argelia.

En la tabla 3.1 se observa que la mayoría de métodos de estimación de parámetros se hace para el modelo SIR, al ser un modelo básico no es posible poder predecir las muertes producidas por una pandemia, es el mismo caso para el modelo SEIR, el ajuste de los parámetros del modelo SEIMR/RS para ajustar la simulación de muertes es muy importante, porque se puede proyectar a futuro el panorama de la pandemia y con esto evaluar si las políticas de control implementadas están funcionando, y si no replantearlas. Con respecto a

la comparación de resultados, los tres primeros trabajos lo hacen contra datos simulados, los resultados generados por el modelo SEIMR/R-S a través de la generación de parámetros automáticos se realizarán para la zona conurbada de Tampico, Madero y Altamira por lo que se trabajará con datos reales.

Capítulo 4. Implementación del modelo

SEIMR/R-S

Previo al diseño y desarrollo del Algoritmo Genético para Generación Automática de Parámetros Biológicos, se implementaron las ecuaciones del modelo epidemiológico SEIMR/R-S en una aplicación desarrollada en JAVA, una vez realizada la implementación se realizó una validación a la aplicación y al modelo matemático.

4.1 Validación con el caso Base de la ciudad de Bogotá

La validación tanto de la aplicación como del modelo matemático consistió en reproducir los resultados del caso que se tomó como base, los cuales son presentados en el trabajo “*Modelación Matemática de la Propagación del SARS-CoV-2 en la Ciudad de Bogotá*” presentado por Juan Diego Mejía Becerra [Mejía et al, 2020], los cuales fueron obtenidos con el modelo epidemiológico SEI3RD, de este documento se utilizaron las condiciones iniciales y los valores de los parámetros biológicos reportados, con el fin de revisar que el modelo SEIMR/R-S produce valores similares a los reportados y con esto comprobar el correcto funcionamiento del mismo.

Los valores de los parámetros biológicos utilizados se muestran a continuación en las tablas 4.1 y 4.2, las cuales nos muestran los parámetros biológicos por estado de infección y los parámetros biológicos generales respectivamente

Tabla 4.1. Parámetros biológicos por estado de infección

COD_STA	BETAB	DELXB	PHIXB	ETAXB
I0	0.3271875	0.3	10	4.1
I1	0.15114	0.8	8	5
I2	0.0201	0.7143	8	6
I3	0.0201	0.5	10	10

Tabla 4.2. Parámetros biológicos generales

DELT	MIUN	KAPP	MIUB	PCONB	PTRA
------	------	------	------	-------	------

1	0	1	0.001	1	0.1
---	---	---	-------	---	-----

Según Juan Diego Mejía Becerra [Mejía et al, 2020], la población total considerada para la ciudad de Bogotá es de 7,413,000 habitantes, internamente el modelo trabaja con la fracción de población, lo cual es resultado de dividir el número de personas entre la población total. Se toma como día inicial de la epidemia el 15 de marzo de 2020. El modelo SEIMR/R-S queda configurado con una única región, la cual es Bogotá y un único segmento sociodemográfico. El modelo SEI3RD no considera el estado de muerte natural (ND) por lo que el modelo SEIMR/R-S para esa serie tendrá como resultado cero, las condiciones iniciales se muestran en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Condiciones iniciales para la ciudad de Bogotá

Estado Infección	Desc. Estado	Núm. Personas	Fracción Pob.
I0	Asintomáticos	225	3.0352E-05
I1	Moderados	115	1.5513E-05
I2	Severos	1	1.35E-07
I3	Críticos	0	0
RE	Recuperados	0	0
ND	Muerte natural	0	0
ED	Muertes	0	0
EX	Expuestos	200	2.698E-05
SU	Susceptibles	7412258	0.99992702

La simulación se ejecutó a un año, de los cuales se han tomado algunos días de la simulación y se presenta a continuación una muestra de los resultados en la tabla 4.4 para el modelo SEI3RD (caso base) y en la tabla 4.5 una muestra de los resultados obtenidos por el modelo SEIMR/R-S, para ambos casos no se considera el manejo de cuarentena.

Tabla 4.4. Muestra de resultados generados con el modelo SEI3RD (caso base)

Fecha	SU	EX	I0	I1	I2	I3	RE	ED
15/03/2020	7412459	200	225	115	1	0	0	0
16/03/2020	7412367.989	91.01132917	379.8353659	137.3146341	5.463095238	0.047619048	18.33928571	0
17/03/2020	7412222.86	145.1290149	394.6016935	182.9405259	10.20775685	0.303004535	43.95596742	0.002380952
18/03/2020	7412065.907	156.9525276	460.5216368	224.6998731	16.12788736	0.758787741	75.0146279	0.017531179
19/03/2020	7411880.954	184.9533731	525.0328701	271.8675362	22.90789771	1.450903604	112.7781936	0.055470566
18/04/2020	7304327.799	14684.58434	41294.2227	23809.63353	3241.51503	598.6275998	24861.78364	181.8338647
19/04/2020	7287393.105	16934.69402	47689.74721	27526.51798	3750.121528	693.1226984	28800.92604	211.7652446
20/04/2020	7267876.439	19516.66661	55051.59685	31814.95743	4337.772752	802.3876442	33353.75867	246.4213796
21/04/2020	7245401.305	22475.13331	63517.66243	36759.91651	5016.509304	928.709487	38614.22284	286.5407618
22/04/2020	7219542.027	25859.27875	73242.78691	42458.00715	5800.121952	1074.719934	44690.08245	332.9762361
23/04/2020	7189819.229	29722.79775	84399.916	49018.7522	6704.377923	1243.444224	51704.7708	386.7122328
22/06/2020	712229.6385	6728.472603	69182.89266	235075.5362	137500.2415	103732.9961	5956021.891	192528.3314
23/06/2020	706175.4279	6054.21066	62024.1651	213976.6745	128078.8251	99907.32703	5999068.388	197714.9812

24/06/2020	700724.9438	5450.484094	55628.15921	194609.4317	119103.291	96015.586	6038757.757	202710.3476
25/06/2020	695815.4797	4909.464126	49912.30793	176861.6019	110581.8606	92085.61269	6075322.546	207511.1269
26/06/2020	691391.2217	4424.25797	44802.78927	160622.5911	102517.1414	88142.85431	6108983.737	212115.4075
27/06/2020	687402.4341	3988.787635	40233.70686	145784.6851	94906.9602	84210.33751	6139950.538	216522.5502
30/09/2020	649773.1977	0.407744454	3.687518598	12.80063264	11.34440516	42.98014675	6477343.302	285812.2802
01/10/2020	649772.8266	0.37104576	3.355061148	11.63812041	10.30332738	39.22234185	6477347.854	285814.4292
02/10/2020	649772.489	0.337655431	3.052639756	10.58159887	9.358277615	35.7907423	6477352	285816.3903
03/10/2020	649772.1817	0.307274607	2.777533597	9.621357428	8.500348801	32.65730034	6477355.775	285818.1799
04/10/2020	649771.902	0.279631495	2.527269144	8.748580441	7.72146487	29.79634882	6477359.212	285819.8127
05/10/2020	649771.6476	0.254478909	2.299597588	7.955264155	7.014302778	27.18440274	6477362.342	285821.3026
08/01/2021	649769.0697	3.39E-05	3.05E-04	0.001032896	8.75E-04	0.003923888	6477394.199	285836.7246
09/01/2021	649769.0697	3.09E-05	2.78E-04	9.40E-04	7.96E-04	0.003573144	6477394.2	285836.7248
10/01/2021	649769.0697	2.81E-05	2.53E-04	8.56E-04	7.25E-04	0.00325374	6477394.2	285836.725
11/01/2021	649769.0697	2.56E-05	2.30E-04	7.79E-04	6.60E-04	0.002962878	6477394.201	285836.7252
12/01/2021	649769.0696	2.33E-05	2.10E-04	7.10E-04	6.01E-04	0.002698008	6477394.201	285836.7253
13/01/2021	649769.0696	2.12E-05	1.91E-04	6.46E-04	5.47E-04	0.002456809	6477394.201	285836.7255
08/03/2021	649769.0694	1.34E-07	1.21E-06	4.08E-06	3.44E-06	1.56E-05	6477394.204	285836.7268
09/03/2021	649769.0694	1.22E-07	1.10E-06	3.71E-06	3.14E-06	1.42E-05	6477394.204	285836.7268
10/03/2021	649769.0694	1.11E-07	1.00E-06	3.38E-06	2.86E-06	1.29E-05	6477394.204	285836.7268
11/03/2021	649769.0694	1.01E-07	9.11E-07	3.08E-06	2.60E-06	1.18E-05	6477394.204	285836.7268
12/03/2021	649769.0694	9.22E-08	8.29E-07	2.80E-06	2.37E-06	1.07E-05	6477394.204	285836.7268
13/03/2021	649769.0694	8.40E-08	7.55E-07	2.55E-06	2.15E-06	9.76E-06	6477394.204	285836.7268

Tabla 4.5. Muestra de resultados generados con el modelo SEIMR/R-S

Fecha	SU	EX	I0	I1	I2	I3	RE	ED
15/03/2020	7412458.999	200.151	225.3552	114.9015	1.000755	0	0	0
16/03/2020	7412367.968	91.1799	379.5456	137.1405	5.463381	0.04766559	18.31011	0
17/03/2020	7412222.895	145.2948	394.3716	183.1011	10.22994	0.3031917	43.95909	0.002379573
18/03/2020	7412065.888	157.1556	460.3473	224.6139	16.16034	0.756126	74.8713	0.01756881
19/03/2020	7411880.934	184.5837	524.8404	272.0571	22.90617	1.452948	112.6776	0.05544924
18/04/2020	7304327.866	14684.55996	41294.19063	23809.59231	3239.481	598.2291	24861.79353	181.6185
19/04/2020	7287393.238	16934.70198	47689.68225	27526.47051	3750.978	693.1155	28800.91347	212.0118
20/04/2020	7267876.589	19516.64988	55051.53255	31814.96514	4336.605	800.604	33353.75568	246.1116
21/04/2020	7245401.485	22475.10405	63517.62333	36759.88092	5018.601	926.625	38614.24287	286.8831
22/04/2020	7219542.198	25859.21268	73242.73803	42457.9575	5796.966	1074.885	44690.08593	332.8437
23/04/2020	7189819.478	29722.79415	84399.82194	49018.68489	6701.352	1245.384	51704.78544	386.9586
22/06/2020	712231.329	6731.004	69182.93445	235075.7186	137501.2166	103728.3299	5956032.746	192738
23/06/2020	706177.1319	6056.421	62024.20035	213976.838	128079.7384	99902.85123	5999079.369	197927.1
24/06/2020	700726.6495	5448.555	55628.18982	194609.5601	119104.1521	96011.32275	6038768.794	202374.9
25/06/2020	695817.242	4907.406	49912.32204	176861.7262	110582.6862	92081.54319	6075333.713	207564
26/06/2020	691392.9412	4425.561	44802.76353	160622.6601	102517.9352	88138.93914	6108994.96	212011.8
27/06/2020	687404.1542	3988.194	40233.68685	145784.7993	94907.67531	84206.63916	6139961.878	216459.6
30/09/2020	649775.099	0.407715	3.684261	12.82449	11.34189	42.9954	6477354.491	286141.8
01/10/2020	649774.7283	0.3713913	3.358089	11.63841	10.30407	39.21477	6477359.087	286141.8
02/10/2020	649774.4318	0.3372915	3.054156	10.60059	9.34038	35.80479	6477363.238	286141.8
03/10/2020	649774.1353	0.3068982	2.779875	9.6369	8.52495	32.69133	6477367.019	286141.8
04/10/2020	649773.8388	0.2794701	2.527833	8.74734	7.70952	29.80026	6477370.429	286141.8
05/10/2020	649773.5423	0.2542659	2.29803	7.93191	7.012698	27.20571	6477373.542	286141.8
08/01/2021	649771.0218	3.39515E-05	0.000305416	0.001030407	0.000874734	0.003921477	6477405.418	286141.8
09/01/2021	649771.0218	3.09122E-05	0.000277988	0.000941451	0.000793191	0.003573066	6477405.418	286141.8
10/01/2021	649771.0218	2.80953E-05	0.000252783	0.000852495	0.000724991	0.003254307	6477405.418	286141.8
11/01/2021	649771.0218	2.55749E-05	0.000230544	0.000778365	0.000659757	0.0029652	6477405.418	286141.8
12/01/2021	649771.0218	2.32768E-05	0.000209788	0.000709424	0.000600453	0.002698332	6477405.418	286141.8
13/01/2021	649771.0218	2.12012E-05	0.000190514	0.000646414	0.000547079	0.002453703	6477405.418	286141.8
08/03/2021	649771.0218	1.34175E-07	1.20832E-06	4.07715E-06	3.44705E-06	1.55673E-05	6477405.418	286141.8
09/03/2021	649771.0218	1.22315E-07	1.09712E-06	3.71391E-06	3.1357E-06	1.41588E-05	6477405.418	286141.8
10/03/2021	649771.0218	1.11195E-07	1.00076E-06	3.38033E-06	2.85401E-06	1.28986E-05	6477405.418	286141.8
11/03/2021	649771.0218	1.01558E-07	9.11799E-07	3.0764E-06	2.60196E-06	1.17867E-05	6477405.418	286141.8
12/03/2021	649771.0218	9.19212E-08	8.30256E-07	2.80211E-06	2.36475E-06	1.07489E-05	6477405.418	286141.8
13/03/2021	649771.0218	8.37669E-08	7.56126E-07	2.55007E-06	2.15718E-06	9.78516E-06	6477405.418	286141.8

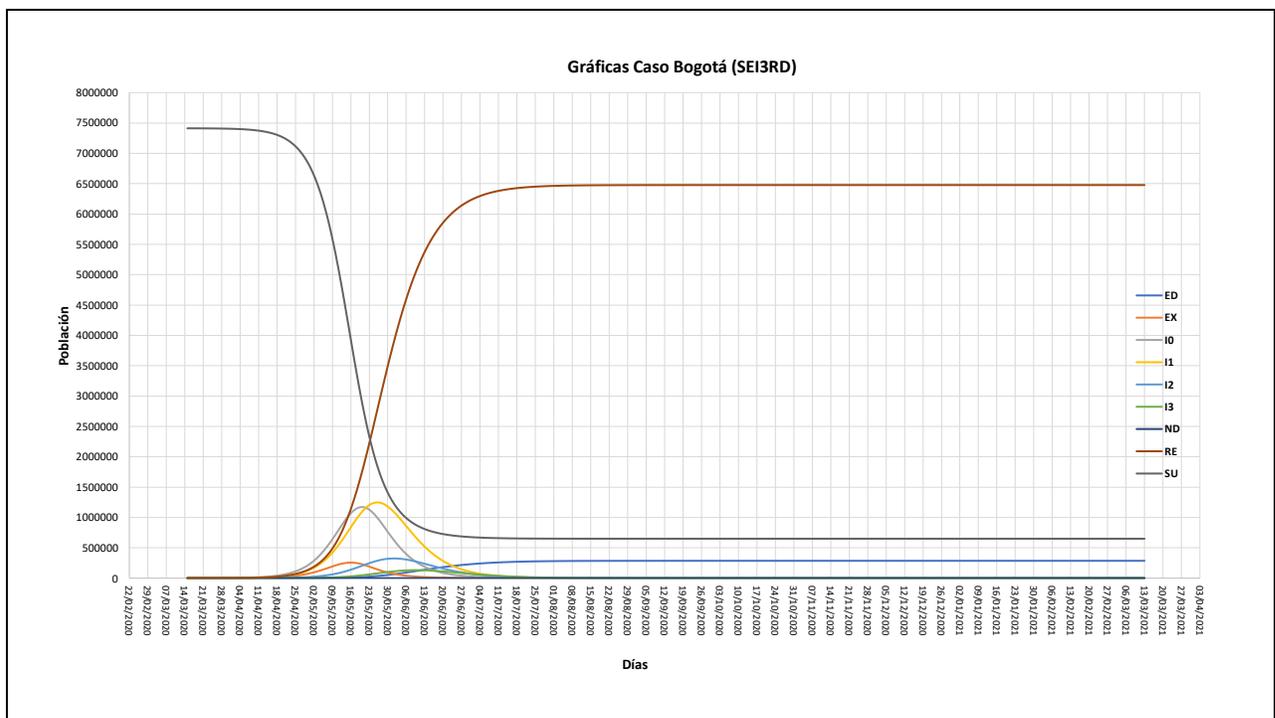
Para analizar la diferencia, se calculó la raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre las series producidas por el modelo SEI3RD reportadas en el documento de Mejía Becerra [Mejía et al, 2020] y las generadas por el modelo SEIMR/R-S con la configuración del caso

de la ciudad de Bogotá, con esto se comprobó que, aunque el modelo SEIMR/R-S genera un número más bajo de muertos, en general se puede decir que su funcionamiento es correcto.

Tabla 4.6. RMSE de series producidas SEI3RD y SEIMR/R-S

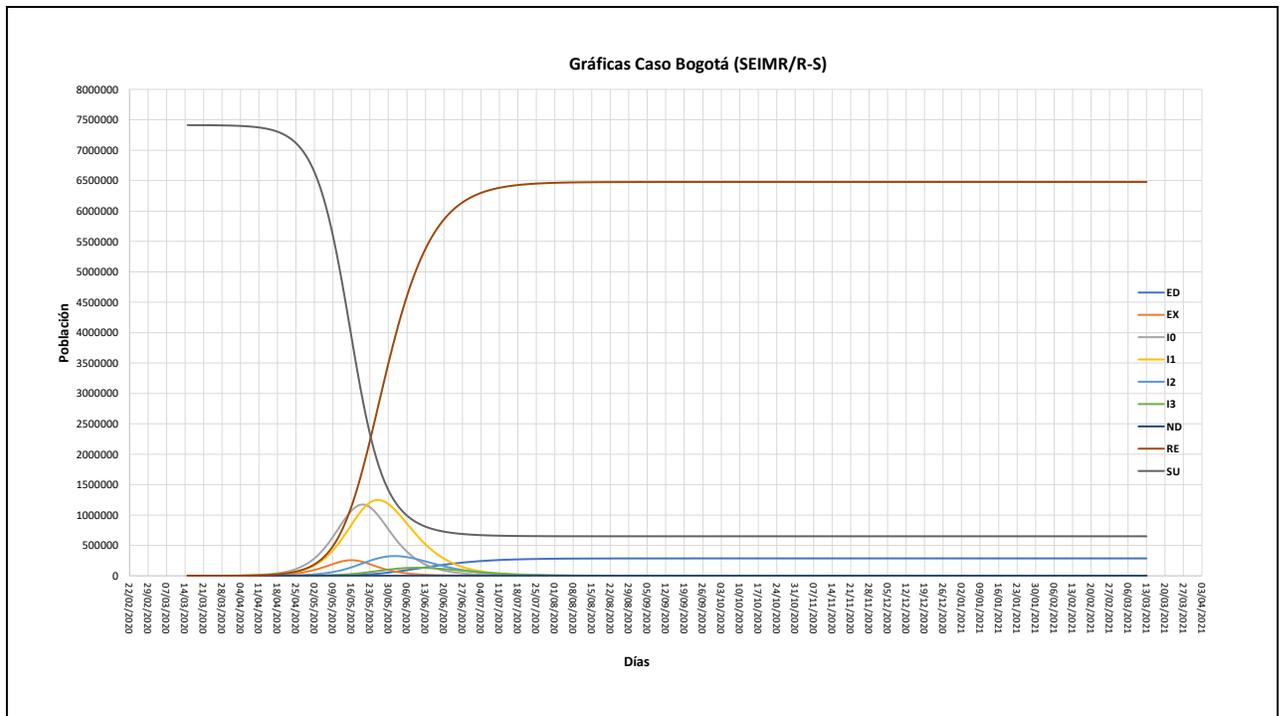
Serie	RMSE
SU	1.87888885
EX	0.63166743
I0	0.76720458
I1	0.73293848
I2	0.76862524
I3	1.88942067
RE	9.82815148
ED	247.452792

Los resultados obtenidos por el modelo SEI3RD para una simulación de 365 días se muestra en la siguiente gráfica.



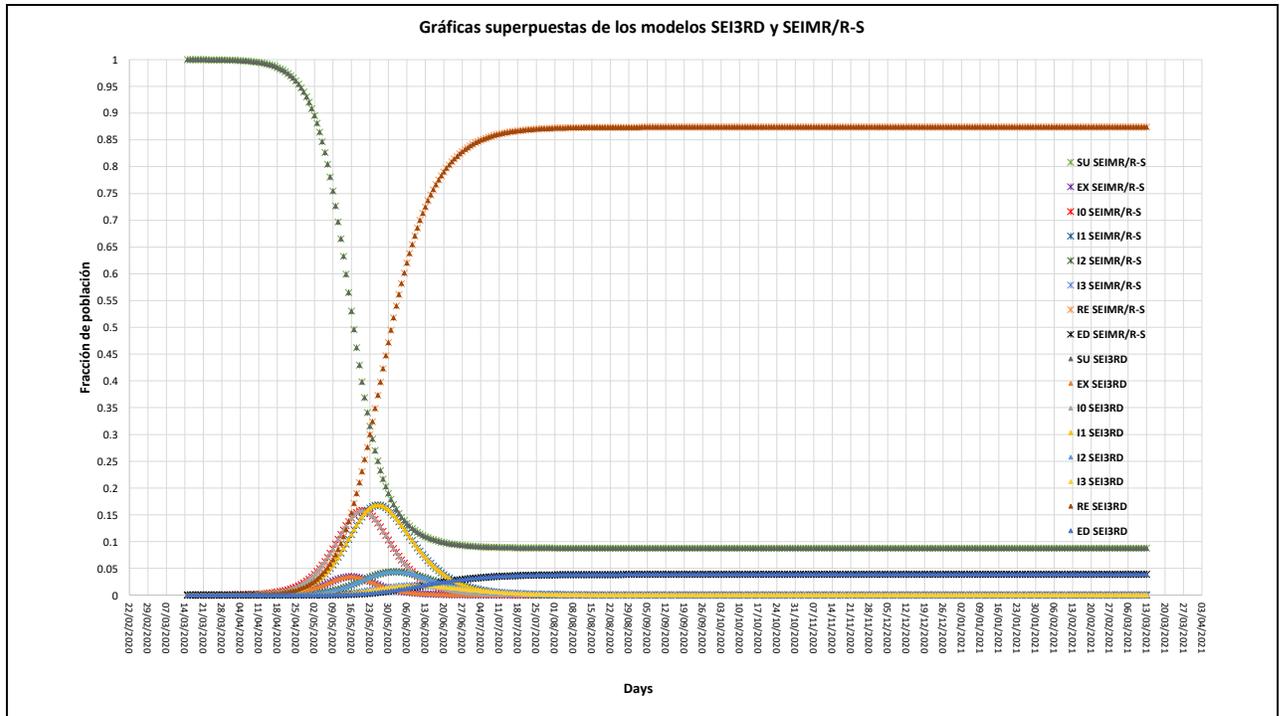
Gráfica 4.1. Muestra de resultados generados con el modelo SEI3RD

Los resultados obtenidos por el modelo SEIMR/R-S para una simulación de 365 días se muestra en la siguiente gráfica.



Gráfica 4.2. Muestra de resultados generados con el modelo SEIMR/R-S

A continuación, se muestran las gráficas producidas por los modelos SEI3RD y SEIMR/R-S superpuestas, en ellas se puede observar un comportamiento similar entre ambos modelos.



Gráfica 4.3. Gráficas superpuestas de los modelos SEI3RD y SEIMR/R-S

4.2. Caso Tampico, Madero y Altamira Modelo

Originalmente el caso Tampico, Madero y Altamira (TMA) se configuró para trabajar con tres regiones (Tampico, Madero y Altamira) y seis segmentos socio-demográficos dependientes de dos estratos económicos (Estrato 1 pobres, Estrato 2 no pobres) y de tres grupos de edades (Edad00 de 0 a 29 años, Edad30 de 30 a 59 años y Edad60 de 60 años en adelante). Para el propósito de este trabajo, se ha configurado un caso con las tres regiones y un segmento único por región, esto por lo complicado que es conseguir un registro de fallecidos por COVID-19 filtrado por edad y estrato económico.

Los valores de los parámetros biológicos utilizados se muestran a continuación en las tablas 4.7 y 4.8. Para este caso y como en el original de Tampico, Madero y Altamira, se han tomado como referencia los valores reportados por Juan Diego Mejía Becerra [Mejía et al, 2020] en su trabajo.

Tabla 4.7. Parámetros biológicos por estado de infección

COD_STA	BETAB	DELXB	PHIXB	ETAXB
---------	-------	-------	-------	-------

I0	0.3271875	0.3	10	4.1
I1	0.15114	0.8	8	5
I2	0.0201	0.7143	8	6
I3	0.0201	0.5	10	10

Tabla 4.8. Parámetros biológicos

DELT	MIUN	KAPP	MIUB	PCONB	PTRA
1	0	1	0.001	1	0.1

La población según el censo del INEGI de 2015 para cada ciudad es: Tampico de 327,308 habitantes, Madero 216,664 habitantes y Altamira 246,549 habitantes, la macrorregión TMA conformada por las tres ciudades tiene un total de 790,521 habitantes.

Las condiciones iniciales para Tampico se muestran en la tabla 4.9, esta información corresponde al día uno de la pandemia. La fracción de población para las condiciones se obtiene dividiendo el número de personas por estado epidemiológico entre el total de la población de la región (no de la macrorregión), los susceptibles son el total de la población de la región menos la suma de las personas en los demás estados de infección de la región.

Tabla 4.9. Condiciones iniciales para Tampico

Estado Infección	Desc. Estado	Núm. Personas	Fracción Pob.
I0	Asintomáticos	0	0
I1	Moderados	1	3.06E-06
I2	Severos	0	0
I3	Críticos	0	0
RE	Recuperados	0	0
ND	Muerte natural	0	0
ED	Muertes	0	0
EX	Expuestos	0	0
SU	Susceptibles	327,307	0.999996945

A continuación, las condiciones iniciales para Ciudad Madero son presentadas en la tabla 4.10.

Tabla 4.10. Condiciones iniciales para Madero

Estado Infección	Desc. Estado	Núm. Personas	Fracción Pob.
I0	Asintomáticos	0	0
I1	Moderados	2	9.23E-06
I2	Severos	0	0
I3	Críticos	0	0

RE	Recuperados	0	0
ND	Muerte natural	0	0
ED	Muertes	0	0
EX	Expuestos	0	0
SU	Susceptibles	216,662	0.999990769

Las condiciones iniciales de la tercera región que corresponde a Altamira se muestran en la tabla 4.11.

Tabla 4.11. Condiciones iniciales para Altamira

Estado Infección	Desc. Estado	Núm. Personas	Fracción Pob.
I0	Asintomáticos	0	0
I1	Moderados	1	4.06E-06
I2	Severos	0	0
I3	Críticos	0	0
RE	Recuperados	0	0
ND	Muerte natural	0	0
ED	Muertes	0	0
EX	Expuestos	0	0
SU	Susceptibles	246,548	0.999995944

La pandemia en la zona TMA inició en Tampico el día 16 de marzo, pero el primer caso para la última de las tres regiones se suscitó el día 24 de marzo, por lo que se toma esa fecha como el día uno para toda la macrorregión.

La fracción de población para cada una de las tres ciudades se obtiene dividiendo la población de la ciudad entre la población total de la macrorregión (TMA), esta información se muestra en la tabla 4.12.

Tabla 4.12. Condiciones iniciales para Altamira

Región	Segmento	Fracción Pob.
Tampico	Estrato único	0.41404087
Madero	Estrato único	0.27407748
Altamira	Estrato único	0.31188166

Capítulo 5. Algoritmo genético propuesto

En esta sección se describe la propuesta de implementación de un algoritmo genético para resolver el problema de generación automática de parámetros biológicos para el modelo SEIMR/R-S.

5.1. Representación de la solución

La representación de la solución, se hace a través de un cromosoma con valores reales entre 0 y 1, donde cada gen representa un valor para un parámetro del modelo, los parámetros utilizados son siete, los cuales son μ , η_2 , δ_2 , π_3 , η_3 , δ_3 y ω , estos son los parámetros que afectan a la ecuación que genera la serie de muertos.

0.0013	0.93	0.005	0.003	0.23335	0.3333	0.773
--------	------	-------	-------	---------	--------	-------

Figura 5.1. representación del cromosoma de solución

Los parámetros mencionados, se describen en la siguiente tabla:

Tabla 5.1. Descripción de parámetros biológicos

Parámetro	Descripción
μ	Tasa de mortalidad epidémica
η_2	Tiempo en el que un paciente en el estado I_2 pasa al siguiente estado de infección
δ_2	Probabilidad de un paciente en el estado I_2 de recuperación
π_3	Tiempo en el que un paciente en el estado I_3 se recupera
η_3	Tiempo en el que un paciente en el estado I_3 pasa al siguiente estado de infección
δ_3	Probabilidad de un paciente en el estado I_3 de recuperación
ω	Probabilidad de que una persona pueda ser contagiada

5.2. Función Objetivo

La función objetivo para este problema es minimizar la distancia de los valores producidos por el modelo SEIMR/R-S con respecto a un registro de fallecidos por COVID-

19 histórico, por ejemplo, el registro de secretaria de salud para el caso de México u el registro de otro organismo de salud en el mundo, lo que le permitirá al simulador generar una serie de muertos por COVID-19 más cercana a los valores reales registrado, la función objetivo es:

$$\begin{aligned} \text{Miminzar } d &= \frac{\sum_i^n |r_i - s_i|}{n} \\ &\text{para } 1 \leq i \leq n \end{aligned} \quad (5.1)$$

Donde

r_i es el valor real para el día “ i ” capturado por secretaria de salud.

s_i es el valor simulado generado para el día “ i ” por el modelo SEIMR/R-S.

n es el número de días del reporte de muertos por COVID-19.

5.3. Función de evaluación

Para evaluar a las soluciones, se toman del cromosoma cada uno de sus alelos y se reescalán en base a un intervalo de variación para cada parámetro, los intervalos de variación usados para cada parámetro se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 5.2. Intervalos de variación

Parámetro	Límite inferior	Límite superior
μ	0.000001	0.999999
η_2	4	120
δ_2	0.000001	0.999999
π_3	4	120
η_3	4	120
δ_3	0.000001	0.999999
ω	0.4	1.0

Se utiliza una función de reescalado para cambiar el valor contenido en el vector de resultados a un valor dentro del intervalo de variación, la función es la siguiente:

$$\begin{aligned} x &\rightarrow f(a, b, z) \\ f(a, b, z) &= (z * (b - a)) + a \end{aligned} \quad (5.2)$$

Donde:

x es valor reescalado que está dentro del intervalo de variación para cada parámetro.

z es un alelo del cromosoma que se va a reescalar.

a es el valor inicial del intervalo de variación del parámetro.

b es el valor final del intervalo de variación del parámetro.

Los elementos del vector de soluciones se reescalan y se pasan al modelo como parámetros (el proceso de reescalado no altera los valores del cromosoma), y se manda a ejecutar la simulación del modelo SEIMR/R-S, los resultados de esta simulación se comparan contra los datos del registro real (registrados por SSA), se calcula la distancia promedio, la cual será devuelta por el método.

Algoritmo 5.1: Función de evaluación

Input: *individuo, region, numeroDiasRegistroHistorico*

Output *distancia*

```

1:  $n = \text{tamañoCromosoma}$ 
2: FOR  $i=0$  to  $n$ 
3:    $\text{parametrosReescalados}_i = \text{funcReescalado}(\text{individuo}_i, \text{intervaloParametros}_i)$ 
4: END FOR
5:  $\text{parámetros modelo SEIMR/R-S} = \text{parametrosReescalados}$ 
6: ejecutar simulación del modelo
7:  $\text{serie} = \text{valores de la serie de muertos del modelo SEIMR/R-S para region}$ 
8: FOR  $i=0$  TO  $\text{tamañoRegistroHistorico}$ 
9:    $\text{suma} += \text{valorAbsoluto}(\text{serie}_{\text{registro}_i.\text{dia}} - \text{registro}_i)$ 
10: END FOR
11:  $\text{distancia} = \text{suma} / \text{numeroDiasRegistroHistorico}$ 
12: RETURN  $\text{distancia}$ 

```

5.4. Generación de la Población inicial

La población inicial se genera de forma aleatoria, ya que se utiliza un cromosoma de valores reales, para cada gen se genera un valor aleatorio entre 0 y 1. El valor asignado a cada elemento del cromosoma(alelo) siempre será mayor que cero, de esta forma se cuida que el individuo sea factible. Para el tamaño de la población inicial se utiliza el tamaño de $5n$, donde n es el número de elementos del cromosoma.

Algoritmo 5.2: Generación de la población Inicial

Input: *numParametros*

Output: *individuo*

```

1: Crear arreglo individuo de tamaño numParametros
2:  $\text{val} = 0$ 

```

```

3: FOR  $i=0$  TO  $numParametros$ 
4:   WHILE  $val == 0$ 
5:      $val = \text{número aleatorio entre } 0 \text{ y } 1$ 
6:   END WHILE
7:    $individuo_i = val$ 
8: END REPEAT
9: RETURN  $individuo$ 

```

5.5. Selección

El proceso de selección es una parte fundamental para que un algoritmo genético funcione, este proceso suele ser realizado de forma probabilística, por lo que los individuos menos aptos son capaces de sobrevivir.

5.5.1. Selección por Torneo Determinista

Este método fue propuesto por Wetzel en 1983 [Wetzel, 1983] y también fue estudiada por Brindle en su tesis doctoral en 1981 [Brindle, 1981]. La idea básica de esta técnica es hacer la selección en base a comparaciones directas de los individuos. Existen dos versiones de la selección, la primera es mediante un torneo determinística y la segunda con un torneo probabilística, para este caso se utilizó la versión determinística.

A continuación, se muestra el algoritmo utilizado para la implementación del método de selección:

Algoritmo 5.3: Selección por Torneo Determinista

Input: $listaPoblacion$, $tamañoPoblacion$

Output: $listaNuevosPadres$

```

1:  $n = tamañoPoblacion$ 
2: crear  $listaBarajados$ 
3: FOR 1 TO 2
4:   ; Proceso de barajado
5:   FOR 1 TO  $n$ 
6:      $numGenerado = \text{número aleatorio entre } 0 \text{ y } n$ 
7:     IF  $numGenerado \text{ NOT IN } listaBarajados$ 
8:       Agregar  $numGenerado$  a  $listaBarajados$ 
9:     END IF
10:  END
11:  ; Proceso de competencia
12:  WHILE  $listaBarajados \text{ NOT vacía}$ 
13:     $i1 = \text{remover elemento posición cero de } listaBarajados$ 
14:     $i2 = \text{remover elemento posición cero de } listaBarajados$ 
15:    IF aptitud individuo en  $listaPoblacion_{i1} > \text{aptitud individuo en } listaPoblacion_{i2}$ 

```

```

16:             agregar a listaNuevosPadres valor de listaPoblacioni1
17:         ELSE
18:             agregar a listaNuevosPadres valor de listaPoblacioni2
19:         END IF
20:     END WHILE
21: END FOR
22: RETURN listaNuevosPadres

```

5.5.2. Selección por Ruleta

En este proceso se hace la selección de las soluciones que serán padres.

La técnica de selección por ruleta fue propuesta en 1975 por Kenneth Alan De Jong [De Jong, 1975], y ha sido el método más utilizado desde los orígenes de los algoritmos genéticos, debido a que es simple, se considera ineficiente, ya que su complejidad es $O(n^2)$. Asimismo, permite que el individuo menos apto pueda ser seleccionado más de una vez. Sin embargo, es uno de los métodos de selección más utilizado por su simplicidad.

A continuación, se muestra el algoritmo utilizado para la implementación del método de selección:

Algoritmo 5.4: Selección por ruleta

Input: *listaPoblacion*, *tamañoPoblacion*

Output: *listaNuevosPadres*

```

1: FTestada = sumaAptitud(listaPoblacion)/tamañoPoblacion
2: FOR i=1 TO tamañoPoblacion
3:     individuoi de listaPoblacion = Aptitud(individuoi)/FTestada
4: END
5: T = sumar valores esperados de los individuos de listaPoblacion
6: FOR i=1 TO tamañoPoblacion
7:     r = número aleatorio entre 0 y T
8:     FOR j=1 TO tamañoPoblacion
9:         IF individuoj de listaPoblacion > r
10:            agregar a listaNuevosPadres valor de listaPoblacionj
11:        END IF
12:    END
13: END
14: RETURN listaNuevosPadres

```

5.6. Cruza para Representación Real

Cuando se utilizan vectores de número reales para la codificación del cromosoma, entonces se deben definir operadores de cruce acordes a esta codificación. [Coello, 2018].

5.6.1. Cruza de dos puntos

El primero en implementar una cruza de n puntos fue Kenneth Alan De Jong (De Jong, 1975), como una forma generalizada de la cruza de un punto. El valor de $n = 2$ minimiza los efectos disruptivos (o destructivos) de la cruza.

Carlos Coello comenta que la cruza de dos puntos es mejor que la cruza de un punto, y que se asocia con un mayor efecto disruptivo de la cruza el incremento del valor de n [Coello, 2011].

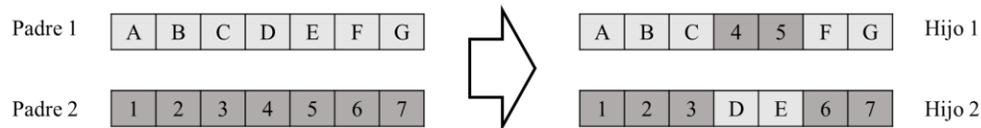


Figura 4.1. Cruza de dos puntos

A continuación, se muestra el algoritmo utilizado para la implementación del método de cruza:

Algoritmo 5.5: Cruza de dos puntos

Input: *individuo1, individuo2*

Output: *nuevoIndividuo*

- 1: $n = \text{tamañoCromosoma}$
 - 2: $\text{nuevoIndividuo} = \text{individuo1}$
 - 3: $\text{cromosoma}_{n/2}$ de $\text{nuevoIndividuo} = \text{cromosoma}_{n/2}$ de individuo2
 - 4: $\text{cromosoma}_{(n/2)+1}$ de $\text{nuevoIndividuo} = \text{cromosoma}_{(n/2)+1}$ de individuo2
 - 5: evaluar (nuevoIndividuo)
 - 6: **RETURN** nuevoIndividuo
-

5.6.2. Cruza SBX

La Cruza Binaria Simulada (SBX) fue propuesta por Deb en 1995 [Deb & Agrawal, 1995], como la mayoría de los operadores de cruza funciona con dos padres y produce dos hijos. Este operador intenta imitar el efecto de la cruza de un punto que es usada con una codificación binaria, a continuación, se muestra el algoritmo.

Algoritmo 5.6: Cruza SBX

Input: *individuo1, individuo2*

Output: *listaHijos*

- 1: $n = \text{tamañoCromosoma}$
 - 2: $\text{hijo1} = \text{nuevoIndividuo}$
 - 3: $\text{hijo2} = \text{nuevoIndividuo}$
 - 4: $nc = 1$
 - 5: $u = \text{número aleatorio entre } 0 \text{ y } 1$
-

```

6: beta = 0
7: IF u <= 0.5
8:   beta =  $(2u)^{\left(\frac{1}{nc+1}\right)}$ 
9: ELSE
10:  beta =  $\left(\frac{1}{2(u-1)}\right)^{\left(\frac{1}{nc+1}\right)}$ 
11: END IF
12: FOR i=1 TO n
13:  hijo1i = 0.5 * ((individuo1i + individuo2i) - beta * |individuo2i - individuo1i |)
14:  hijo2i = 0.5 * ((individuo1i + individuo2i) + beta * |individuo2i - individuo1i |)
15: END FOR
17: evaluar (hijo1)
18: evaluar (hijo2)
16: agregar hijo1 a listaHijos
17: agregar hijo2 a listaHijos
18: RETURN listaHijos

```

5.7. Mutación para Representación Real

Cuando se utilizan vectores de número reales para la codificación del cromosoma, entonces se deben definir operadores de mutación acordes a esta codificación además de los operadores de cruce, se debe tomar en cuenta la alta cardinalidad que tendrá el alfabeto en este caso. [Coello, 2018].

Para este trabajo se utilizará únicamente mutación por inserción.

5.7.1. Mutación por Inserción

En este método se selecciona un hijo a mutarse de manera probabilística, se selecciona un valor en forma aleatoria y se le inserta en una posición arbitraria [Coello, 2018].

Algoritmo 5.7: Mutación por Inserción

Input: *Individuo*

Output: *Individuo*

```

1: n = tamañoCromosoma
2: indice = número aleatorio entre 0 y n
3: valor = 0
4: WHILE valor == 0
5:   valor = generaNumAleatorioEntre(0, 1)
6: END
7: cromosomaindice de Individuo = valor
8: evaluar (Individuo)
8: RETURN Individuo

```

5.8. Algoritmo genético para el ajuste de la serie de muertos

Se realizó una implementación del Algoritmo Genético para la generación automática de parámetros biológicos que ajustan la serie de muertos y se ha integrado al simulador a continuación, se muestran los algoritmos.

Algoritmo 5.8: Algoritmo genético para el ajuste de la serie de muertos

Input: *numeroDeGeneraciones, porcentajeMuta, tamañoPoblacion*

Output: *poblacion₀*

```
1: listaPoblacion = generaPoblacionInicial(tamañoPoblacion)
2: evaluaAptitudIndividuo(listaPoblacion)
3: FOR 1 TO numeroDeGeneraciones
4:   listaIndividuosPCruza = obtenerListaIndividuosMetodoSeleccion()
5:   poblacion = metodoDeCruza(listaIndividuosPCruza)
6:   mutacion(poblacion,porcentajeMuta)
7:   ordenar(poblacion)
8: END FOR
9: RETURN poblacion0
```

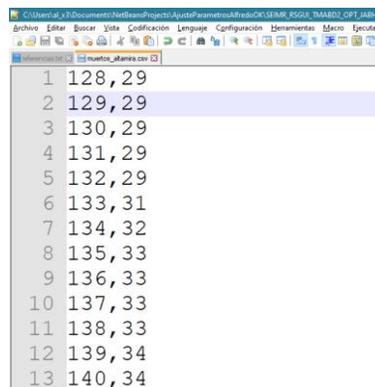
Capítulo 6. Experimentación

En este capítulo se describe la experimentación realizada para determinar la mejor configuración del algoritmo genético para ajuste automático de parámetros biológicos del modelo SEIMR/R-S, el tipo de configuración de parámetros del algoritmo genético realizada en este trabajo es estática.

6.1. Descripción de las instancias utilizadas

6.1.1. Instancias generadas con información del registro histórico de Secretaría de Salud de Tamaulipas

Las instancias utilizadas corresponden al registro de fallecidos por COVID-19 para las ciudades de Tampico, Madero y Altamira reportado por la secretaria de salud de Tamaulipas y recopilado por el equipo de trabajo del proyecto COVID-19 del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, cada archivo contiene el registro de fallecidos por COVID-19 para una ciudad, el periodo comprendido va desde el día 30 de julio de 2020 hasta el 14 de octubre de 2020, el formato de archivo es CSV, cada línea en la instancia corresponde a un día de registro, el primer valor de cada línea corresponde al día de la pandemia y el segundo al número de fallecidos para ese día, por ejemplo 128,29 corresponde a 29 fallecidos por COVID-19 para el día 30 de julio de 2020 (día 128 de pandemia para TMA), el registro de fallecidos es acumulado, es decir a los nuevos registrados de cada día se le suma los fallecidos registrados del día anterior, en la figura 5.1 se muestra un ejemplo de un archivo de instancia.



1	128,29
2	129,29
3	130,29
4	131,29
5	132,29
6	133,31
7	134,32
8	135,33
9	136,33
10	137,33
11	138,33
12	139,34
13	140,34

Figura 6.1. Registro de fallecidos por COVID-19 en formato CSV

6.1.2 Instancias generadas con información del registro histórico de Secretaría de Salud Nacional

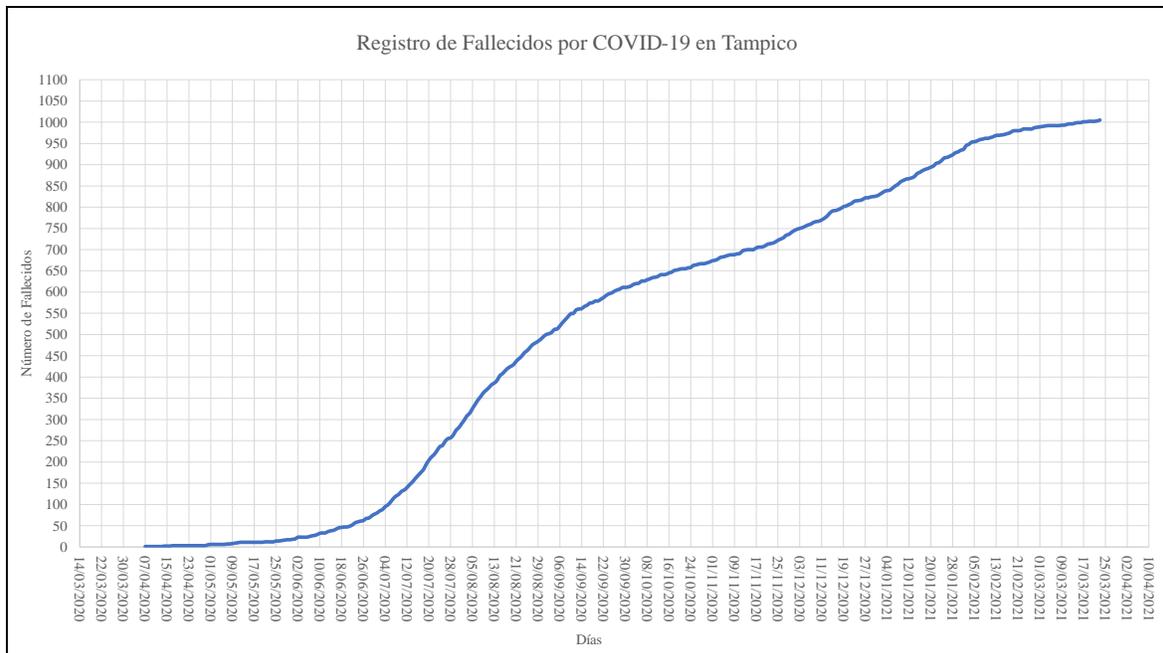
Las instancias se han construido a partir de una base de datos en formato CSV obtenida en “Datos Abiertos Bases Históricas” en la sección de Documentos en el portal de la Secretaría de Salud que se encuentra en la plataforma del gobierno de México [Secretaría de Salud, 2021].

De la base de datos se extrajo la información referente al registro de fallecidos por COVID-19 para las ciudades de Tampico, Madero y Altamira, posteriormente se contabilizaron los fallecidos por día y se generó un archivo por ciudad, cada archivo representa una instancia y contiene el registro histórico de los fallecidos por COVID-19 que consta de 500 días, comprendiendo un periodo del 7 de abril de 2020 al 4 de agosto de 2021, para el ajuste de parámetros se utilizará un periodo de 351 días comprendiendo un periodo del 7 de abril de 2020 al 23 de marzo de 2021.

Index	Date	Count
1	15	1
2	16	1
3	17	1
4	18	1
5	19	1
6	20	1
7	21	1
8	22	2
9	23	2
10	24	2
11	25	3
12	26	3
13	27	3

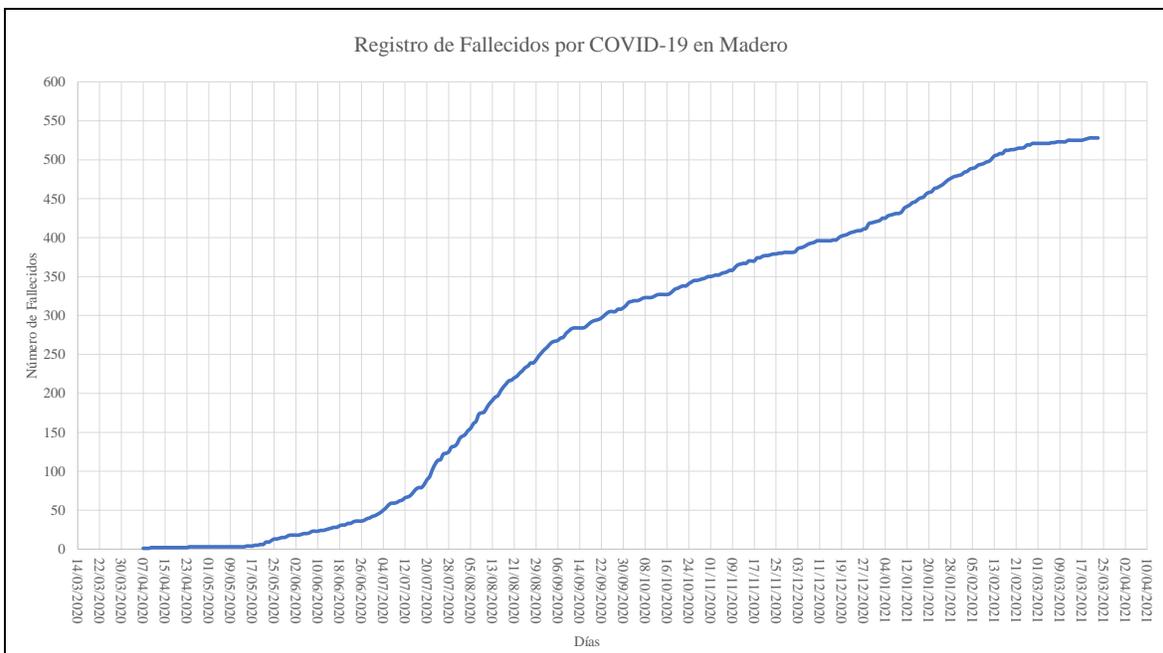
Figura 6.2. Registro de fallecidos por COVID-19 en formato CSV

A continuación, se muestra la gráfica de la instancia para Tampico generada con la información de Secretaría de Salud de México [Secretaría de Salud, 2021].



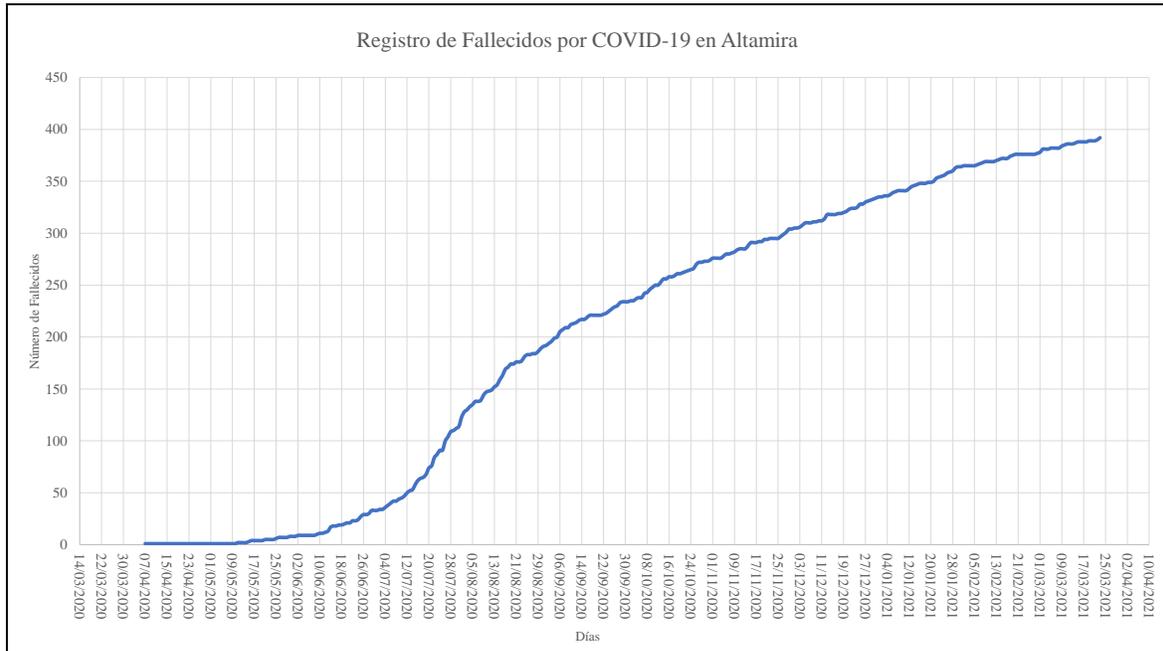
Gráfica 6.1. Registro de fallecidos por COVID-19 en Tampico

Para Ciudad Madero a continuación, se muestra la gráfica de la instancia generada con la información de Secretaría de Salud de México [Secretaría de Salud, 2021].



Gráfica 6.2. Registro de fallecidos por COVID-19 en Madero

Para Altamira, se muestra la gráfica de la instancia generada con la información de Secretaría de Salud de México [Secretaría de Salud, 2021].



Gráfica 6.3. Registro de fallecidos por COVID-19 en Altamira

6.2. Configuración del Algoritmo Genético para Generación Automática de Parámetros Biológicos

Para el algoritmo genético se han implementado dos operadores de selección: selección por ruleta y selección por torneo determinista, dos operadores de cruce: cruce de dos puntos y cruce SBX, y un operador de muta: mutación por inserción, la condición de parada es estática para 150 y 300 generaciones, a continuación, se listan los parámetros del algoritmo genético definidos de forma arbitraria y los que se van a configurar. Para estos ajustes se utilizaron las instancias generadas con información del registro histórico de Secretaría de Salud de Tamaulipas.

Parámetros definidos de forma arbitraria

- Porcentaje de cruce 100%
- Porcentaje de mutación 20%
- Tamaño de población 5N (N = tamaño del cromosoma)
- Condición de parada: Estática

- Mutación por inserción

Parámetros para ajustar

- Operador de Selección: Ruleta, Torneo Determinista
- Operador de cruza: Cruza de dos puntos, Cruza SBX
- Numero de generaciones: 150, 300

Con los parámetros que se van a ajustar, se han definido ocho configuraciones diferentes, las cuales se muestran en la tabla 6.1, el algoritmo se ejecutó 30 veces para cada configuración, para cada una de las tres instancias (registro de fallecidos para Tampico, Madero y Altamira) dando un total de 720 experimentos.

Tabla 6.1. Configuraciones de los parámetros del algoritmo genético.

Núm. Conf.	Selección	Cruza	Mutación	Núm. Gen.
1	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción	150
2	Ruleta	SBX	Inserción	150
3	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción	150
4	Torneo Determinista	SBX	Inserción	150
5	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción	300
6	Ruleta	SBX	Inserción	300
7	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción	300
8	Torneo Determinista	SBX	Inserción	300

El equipo donde se ha realizado la experimentación cuenta con el siguiente hardware:

- Equipo de escritorio con Procesador AMD Ryzen 3 2200G a 3.50 GHz, 16 GB de Memoria Ram DDR4 y unidad de estado sólido (SSD) de 480 GB
- Sistema operativo Windows 10
- Lenguaje utilizado Java (Microsoft OpenJDK 11)
- IDE utilizado NetBeans 11.2

A continuación, se muestran los resultados para cada una de las tres instancias utilizadas en este trabajo, en las tablas se muestran los valores de distancia promedio, el cual es la distancia promedio entre la serie generada y el registro real en el lapso de días de registro, la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el tiempo en segundo, así como número de generaciones, método de selección, cruza y muta utilizados para cada experimento.

6.2.1. Configuración para Instancia Tampico

Los resultados de la experimentación para la instancia de Tampico se han dividido en dos tablas, cada una contiene las 8 configuraciones y los 30 experimentos por configuración, la tabla 6.2 contiene los experimentos con 150 generaciones y la tabla 6.3 los experimentos con 300 generaciones.

Tabla 6.2. Experimentación instancia Tampico para 150 generaciones.

Exp.	Distancia Promedio	RMSE	T. Seg	No. Gen	Selección	Cruza	Muta
1	27.15047633	38.47341283	146.485	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
2	16.14654551	21.07651188	140.05	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
3	17.26539744	21.65234921	135.758	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
4	30.03516238	40.55634343	134.77	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
5	19.38769362	28.09489731	134.581	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
6	17.48454504	26.12828861	133.917	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
7	18.29883873	26.96474003	128.148	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
8	22.80166479	31.97841962	128.054	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
9	31.06818974	41.51449029	128.622	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
10	20.42164205	29.47712589	130.751	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
11	19.22247825	28.0506776	131.688	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
12	15.70587053	20.04596693	130.383	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
13	39.18111338	48.13287848	127.978	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
14	30.93821035	41.85002179	128.59	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
15	47.54502067	56.5929228	127.028	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
16	26.82455009	36.5682673	127.388	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
17	23.21025726	32.40306672	127.027	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
18	19.36838994	28.22831567	126.62	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
19	20.74781544	29.7592306	127.567	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
20	26.21636745	35.88455551	126.485	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
21	20.17342184	25.18200556	126.45	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
22	22.40646231	31.5681544	128.071	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
23	30.44482206	37.72678081	127.182	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
24	16.1970611	19.75031299	126.607	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
25	17.0104888	21.25199671	126.596	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
26	14.00461572	18.06691232	128.657	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
27	21.61364747	29.98240569	127.116	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
28	13.86268655	21.17253493	123.519	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
29	34.67727504	44.54903915	129.921	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
30	35.11816959	45.29971147	131.576	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
31	14.08067016	20.57629579	123.228	150	Ruleta	SBX	Inserción
32	34.7466382	48.15155512	116.66	150	Ruleta	SBX	Inserción
33	30.71411799	38.73621636	116.995	150	Ruleta	SBX	Inserción
34	22.85811466	31.94465745	118.204	150	Ruleta	SBX	Inserción
35	8.223567035	11.36138033	126.594	150	Ruleta	SBX	Inserción
36	16.3927453	24.63462381	116.32	150	Ruleta	SBX	Inserción
37	32.07756996	41.07032926	124.127	150	Ruleta	SBX	Inserción
38	28.78232298	38.26471361	122.099	150	Ruleta	SBX	Inserción
39	25.07205417	34.46865741	123.151	150	Ruleta	SBX	Inserción
40	32.14957409	41.73685803	121.699	150	Ruleta	SBX	Inserción
41	10.9765011	14.81988343	124.537	150	Ruleta	SBX	Inserción
42	18.6680924	27.54729438	118.315	150	Ruleta	SBX	Inserción
43	13.40138184	17.71317499	124.301	150	Ruleta	SBX	Inserción
44	25.96395905	36.05453084	118.188	150	Ruleta	SBX	Inserción
45	17.84221147	26.14494923	115.006	150	Ruleta	SBX	Inserción
46	10.86114237	15.30727125	124.452	150	Ruleta	SBX	Inserción
47	16.69738638	25.05294314	120.093	150	Ruleta	SBX	Inserción
48	24.38112676	33.38353491	117.387	150	Ruleta	SBX	Inserción
49	40.06401538	47.47249957	120.152	150	Ruleta	SBX	Inserción
50	29.09098111	41.41708365	120.065	150	Ruleta	SBX	Inserción

51	18.11281181	21.99686618	117.531	150	Ruleta	SBX	Inserción
52	19.64577926	28.56118671	122.276	150	Ruleta	SBX	Inserción
53	28.98340923	39.37785212	123.324	150	Ruleta	SBX	Inserción
54	16.47988415	20.30340051	127.997	150	Ruleta	SBX	Inserción
55	26.63617061	36.41051916	119.058	150	Ruleta	SBX	Inserción
56	25.06715802	33.76321576	118.132	150	Ruleta	SBX	Inserción
57	22.35636802	31.71448781	119.879	150	Ruleta	SBX	Inserción
58	10.66955275	14.51500003	124.96	150	Ruleta	SBX	Inserción
59	23.5207478	29.90218328	125.333	150	Ruleta	SBX	Inserción
60	28.21979129	38.38685294	123.739	150	Ruleta	SBX	Inserción
61	24.17676701	33.63977739	123.889	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
62	15.56262761	23.82329805	122.688	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
63	26.87484551	37.37922363	125.275	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
64	15.65378203	19.1933799	124.66	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
65	34.94765663	45.2095115	124.066	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
66	27.96444087	38.04358326	123.591	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
67	30.51522804	40.98222669	123.715	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
68	18.65284278	27.46548506	124.016	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
69	32.18472673	42.83081152	123.726	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
70	26.05310769	36.11096704	124.143	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
71	15.00562835	19.0097356	123.864	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
72	16.43502299	21.34999259	123.902	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
73	32.72693253	43.38814102	123.802	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
74	24.96244542	34.6696837	124.385	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
75	29.81161846	40.23141563	123.273	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
76	41.36783377	51.02390936	123.91	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
77	25.02021233	34.32409651	123.537	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
78	26.92310531	37.04340211	124.437	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
79	18.58917246	27.44409536	124.382	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
80	25.72517439	35.44632974	124.057	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
81	22.91283518	32.06285397	124.237	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
82	19.3098414	28.14123768	124.213	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
83	36.06681621	48.01093195	124.165	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
84	29.93655802	40.39890463	123.778	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
85	35.54081535	43.5229629	124.601	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
86	26.14266005	36.12333409	124.112	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
87	13.27446607	17.63646496	124.566	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
88	18.92366603	27.76242472	124.696	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
89	31.59499212	42.21435144	124.897	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
90	13.90746204	20.81693541	124.141	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
91	21.12364702	30.07495752	123.967	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
92	24.71444841	34.08175697	121.033	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
93	18.45773378	27.22373861	122.048	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
94	13.39660709	20.0907023	122.529	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
95	45.84395483	55.43912217	120.742	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
96	18.28298687	27.04297141	123.767	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
97	21.61015728	30.58561329	124.838	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
98	18.03476936	26.74515473	121.726	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
99	33.9976068	43.56180514	123.742	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
100	23.40898087	32.53269493	118.021	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
101	25.62092606	35.12923961	122.136	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
102	18.05092855	22.03215284	125.118	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
103	58.4500172	68.92369555	122.437	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
104	32.50802435	43.19487091	123.747	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
105	8.211089636	11.38621857	123.982	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
106	32.29212008	42.91164753	121.182	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
107	28.0820728	38.17640672	123.99	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
108	18.06499747	22.06804659	124.246	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
109	14.57600603	18.77115351	119.702	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
110	34.22364345	43.55235342	123.453	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
111	29.29047744	39.14734429	122.183	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
112	20.17575228	28.70614065	123.152	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
113	38.28716077	47.88079015	120.717	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
114	23.55257322	31.40148908	122.04	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
115	26.22848343	36.51400436	121.065	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
116	28.37275904	38.10638215	120.101	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
117	21.62113944	30.61129794	122.955	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción

118	41.49927784	51.17149454	124.435	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
119	27.58488168	37.03221341	123.542	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
120	35.85388991	45.20786068	121.43	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción

Tabla 6.3. Experimentación instancia Tampico para 300 generaciones.

Exp.	Distancia Promedio	RMSE	Tiempo(s)	N. Gen	Selección	Cruza	Muta
121	14.7227137	22.5297911	243.293	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
122	22.1235787	31.5432555	241.66	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
123	30.0475404	39.792036	240.592	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
124	19.8488516	28.9147721	241.61	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
125	25.7139559	35.3093245	245.838	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
126	20.3540822	29.4683986	240.962	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
127	17.7447681	21.7445028	240.393	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
128	15.4452608	20.0250254	239.873	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
129	13.9061368	18.6760109	242.232	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
130	25.9613133	35.2257732	240.054	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
131	31.3765484	41.8312672	245.022	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
132	35.0662296	45.6441209	251.722	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
133	15.080895	18.715013	243.141	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
134	14.4828078	22.6073415	242.787	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
135	22.0761589	31.0022644	241.78	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
136	21.4616955	30.3979802	240.781	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
137	21.3729267	29.9860938	240.658	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
138	22.9911515	32.391756	242.598	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
139	27.387087	37.2557134	242.298	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
140	15.0149331	19.1550578	243.375	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
141	24.9638868	34.1406838	240.765	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
142	21.2882473	30.2790468	240.613	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
143	30.5049212	41.0395349	239.455	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
144	13.573999	16.9174729	243.463	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
145	22.8667761	32.6763569	253.344	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
146	30.7992781	40.0135552	251.879	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
147	19.2536848	27.4389277	246.039	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
148	16.1803105	20.3563315	244.007	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
149	18.0390592	26.4637769	243.716	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
150	36.1478868	46.0826215	244.014	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
151	32.4971736	40.1689473	241.451	300	Ruleta	SBX	Inserción
152	30.5391903	40.313896	248.028	300	Ruleta	SBX	Inserción
153	32.7695893	41.8610139	250.725	300	Ruleta	SBX	Inserción
154	19.7152578	27.8527308	236.377	300	Ruleta	SBX	Inserción
155	32.619541	43.1185579	237.24	300	Ruleta	SBX	Inserción
156	43.0301068	52.2263784	250.921	300	Ruleta	SBX	Inserción
157	25.841521	34.901496	240.773	300	Ruleta	SBX	Inserción
158	28.899736	37.6860379	244.289	300	Ruleta	SBX	Inserción
159	27.6309824	37.3939533	241.231	300	Ruleta	SBX	Inserción
160	9.53251333	12.9885833	240.015	300	Ruleta	SBX	Inserción
161	11.9664886	16.5556723	245.182	300	Ruleta	SBX	Inserción
162	30.1362945	39.1964463	244.224	300	Ruleta	SBX	Inserción
163	23.9773538	31.9087296	238.245	300	Ruleta	SBX	Inserción
164	32.2750828	43.5384785	246.1	300	Ruleta	SBX	Inserción
165	24.5657688	34.0114181	246.636	300	Ruleta	SBX	Inserción
166	31.9587936	41.2366945	250.238	300	Ruleta	SBX	Inserción
167	23.6067339	32.4550205	249.925	300	Ruleta	SBX	Inserción
168	24.0936857	34.1641584	234.287	300	Ruleta	SBX	Inserción
169	22.6254449	33.9243874	235.446	300	Ruleta	SBX	Inserción
170	23.6827951	33.1185674	236.38	300	Ruleta	SBX	Inserción
171	16.3432674	20.4929477	249.311	300	Ruleta	SBX	Inserción
172	18.3572463	27.2509401	248.361	300	Ruleta	SBX	Inserción
173	24.7475855	33.5312238	250.207	300	Ruleta	SBX	Inserción
174	33.3467724	41.4490138	239.879	300	Ruleta	SBX	Inserción
175	24.6849667	34.9385918	237.92	300	Ruleta	SBX	Inserción
176	24.7612687	34.4739901	252.214	300	Ruleta	SBX	Inserción
177	18.1090012	22.0877074	247.81	300	Ruleta	SBX	Inserción
178	18.4183808	27.0489374	244.91	300	Ruleta	SBX	Inserción

179	19.5027997	27.6377597	247.451	300	Ruleta	SBX	Inserción
180	26.7478517	35.9061966	285.583	300	Ruleta	SBX	Inserción
181	39.1350565	48.6861531	241.105	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
182	23.4293832	32.9775581	251.7	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
183	20.3822717	29.3008703	244.211	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
184	16.1474298	21.2780552	239.623	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
185	14.6368459	18.1023756	248.33	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
186	23.1413193	32.1690732	244.357	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
187	18.735329	27.6412647	237.241	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
188	24.3698103	34.1505427	243.042	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
189	20.0848695	29.1534301	240.012	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
190	39.4189099	48.9970541	241.115	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
191	24.6563753	33.9095044	247.056	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
192	17.7237809	26.3560268	237.26	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
193	38.3847486	48.0860269	244.128	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
194	15.6718171	20.4746295	237.457	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
195	26.0378657	36.04382	244.613	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
196	14.6882077	22.5909528	251.75	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
197	13.6255534	17.1391504	239.887	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
198	30.7965383	40.3487163	250.038	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
199	18.6825198	27.5026189	249.966	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
200	15.854668	24.1696554	247.345	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
201	17.4788402	22.410979	236.108	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
202	17.2006827	20.8572185	244.42	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
203	35.8014806	45.1988301	249.821	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
204	29.312447	39.739948	252.683	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
205	37.9336641	47.4458133	251.578	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
206	30.6953354	41.2100294	246.369	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
207	40.3419024	49.8830268	251.585	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
208	21.8544632	28.3566271	252.501	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
209	16.928517	20.676537	244.949	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
210	21.6568897	30.6406832	241.995	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
211	18.1185382	22.1229247	244.576	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
212	35.0836951	45.7527671	236.153	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
213	24.4374462	33.6262609	247.278	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
214	38.5023065	47.9916987	250.953	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
215	36.3697818	45.7697568	251.186	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
216	9.54596522	13.2257571	250.802	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
217	32.2958738	42.8490135	241.68	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
218	37.5728519	47.0136027	250.677	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
219	25.95692	35.97339	245.489	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
220	31.7735253	42.4003005	238.349	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
221	31.6622246	42.313212	236.648	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
222	20.5021963	29.6314167	250.768	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
223	21.4577018	30.8259482	247.753	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
224	27.9760352	38.2201127	248.619	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
225	32.1296595	43.4046132	242.953	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
226	16.8398032	25.3280049	239.732	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
227	20.9883376	29.9797427	248.629	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
228	29.3087293	39.6959576	250.761	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
229	16.2475487	24.8800456	245.212	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
230	22.9462416	31.7406814	244.813	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
231	17.0959536	25.6522698	242.637	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
232	11.035633	15.4088638	244.866	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
233	23.0942094	32.1122351	241.912	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
234	31.1019758	41.4259014	246.642	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
235	22.2524235	31.0413672	239.053	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
236	20.4051841	29.3446622	243.971	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
237	16.9416246	25.4614987	252.52	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
238	29.5892559	39.7081626	247.678	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
239	33.8492271	45.0932867	249.92	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
240	28.2770728	38.4427448	248.829	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción

La tabla 6.4 muestra los promedios de la distancia promedio, RMSE y tiempo en segundos para cada una de las configuraciones, donde se puede apreciar que la configuración 5 (Selección por Ruleta, Cruza de dos puntos, mutación por Inserción, 300 generaciones) genera mejores valores, aunque la configuración 2 (Selección por Ruleta, Cruza SBX, mutación por Inserción, 150 generaciones) está muy cercana y su tiempo promedio es menor.

Tabla 6.4. Promedios de la experimentación instancia Tampico

Conf.	Promedio de Dist. Promedio	Promedio RMSE	Promedio Tiempo (s).
1	23.81762932	31.93274455	129.9195
2	22.42452818	30.35966723	121.1267333
3	25.22544278	34.17664891	124.0908
4	26.71390377	35.31011065	122.4675333
5	22.19322282	30.25412688	243.2654667
6	25.23277312	33.78128254	245.3786333
7	24.16025074	32.18323902	245.0748333
8	25.44526473	34.54787331	245.7019667

La información obtenida por la experimentación se ha procesado en el Software Minitab® y se han obtenido las gráficas de Efectos principales y las de Interacción para la distancia promedio, para RMSE y para el tiempo de ejecución.

Para la Distancia Promedio, como se puede observar en la figura 6.1, en la gráfica de efectos principales la selección por ruleta obtiene mejores valores respecto al torneo determinista, la cruza de dos puntos obtiene también mejores valores respecto a SBX, y en el número de generaciones 300 obtiene mejores valores, en la gráfica de interacción se puede observar que la selección por ruleta con la cruza de dos puntos obtienen mejores valores, la selección por ruleta da mejores valores que el torneo determinista, y la cruza de dos puntos obtiene mejores valores para 300 generaciones.

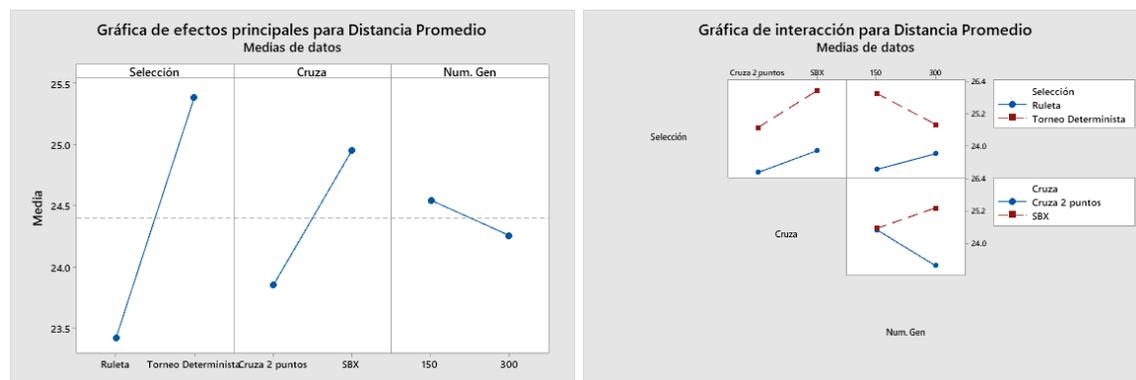


Figura 6.1. Graficas de Efectos Principales e Interacción para distancia promedio Tampico

Para RMSE, se puede observar un comportamiento similar al observado en las gráficas para Distancia Promedio.

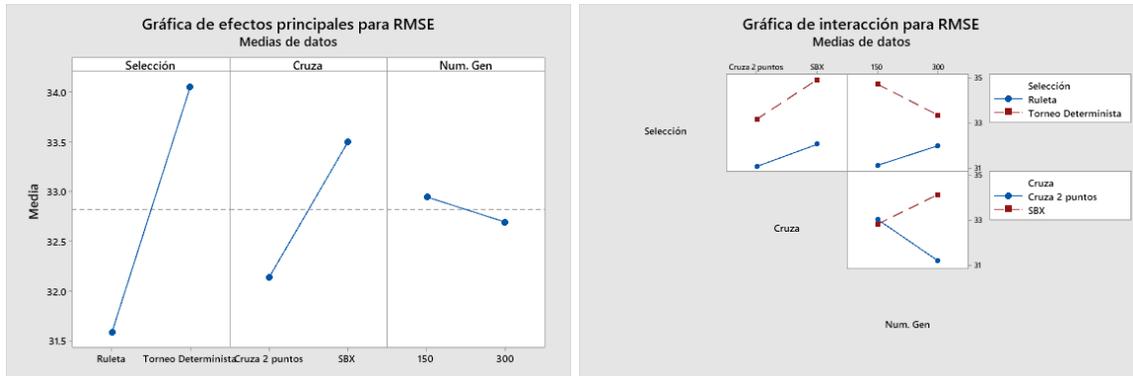


Figura 6.2. Gráficas de Efectos Principales e Interacción para RMSE Tampico

Para Tiempo de ejecución se puede observar que no existe mucha diferencia entre los operadores genéticos, donde se observa diferencia es en el número de generaciones, 150 generaciones representan el menor tiempo y 300 generaciones el mayor tiempo de ejecución.

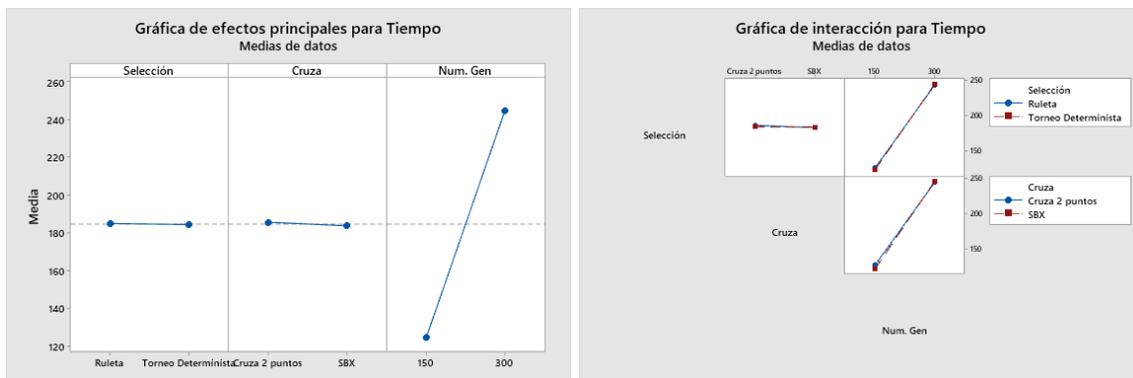


Figura 6.3. Gráficas de Efectos Principales e Interacción para tiempo de ejecución Tampico

Para la instancia de Tampico, con la información observada en la tabla 6.4 y las gráficas de Efectos Principales y las de Interacción se puede establecer una configuración como la siguiente:

- Operador de selección: Ruleta
- Operador de cruza: Cruza de dos puntos
- Numero de generaciones: 300

En la siguiente tabla se muestran los resultados de 30 experimentos para la mejor configuración seleccionada.

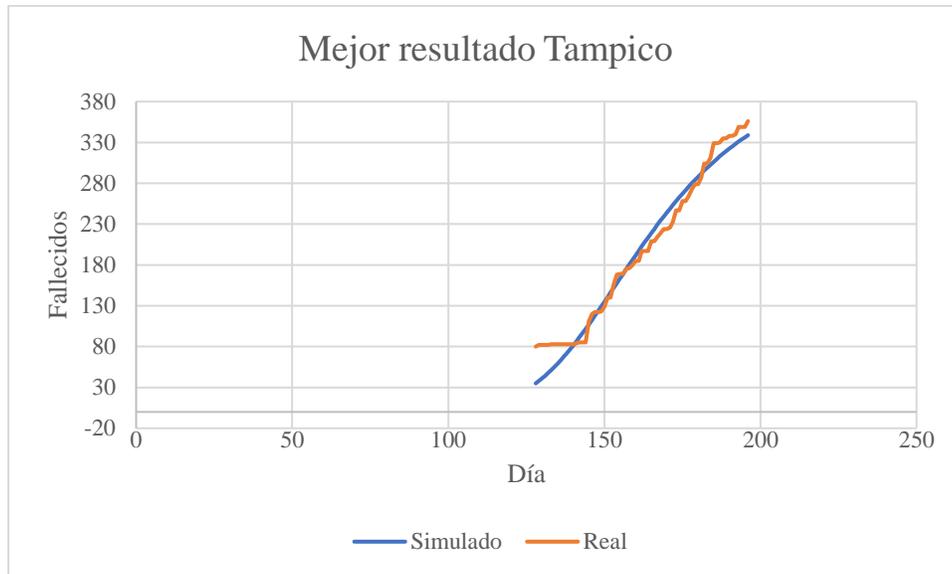
Tabla 6.5. Experimentos con la mejor configuración del algoritmo genético

Exp.	Distancia Promedio	RMSE	Tiempo (s)	Parámetros biológicos generados
1	14.72271366	22.52979112	243.293	{0.48592026811705913, 1.2185775623755604, 0.2932722731676249, 24.021556130273225, 22.902426734004255, 0.22988008100643834, 0.4758903516932648}
2	22.12357868	31.5432555	241.66	{0.3277200318186659, 1.0592291100243667, 0.07983555705574698, 20.14824759139328, 18.415205804199086, 0.2464636515558076, 0.4907296858867699}
3	30.04754042	39.79203603	240.592	{0.4133407752112105, 3.2945261847854583, 0.3996452623118571, 7.749929064929184, 11.605090106169323, 0.029314680483709124, 0.5050666360136578}
4	19.8488516	28.91477209	241.61	{0.4726059913535263, 1.4189779109280138, 0.08765052953109831, 20.93334558721152, 6.271999014816793, 0.758967582410212, 0.488787824684059}
5	25.71395589	35.30932446	245.838	{0.48415648755377927, 2.168129242897371, 0.4131002609578722, 10.419525746179051, 14.435775736025741, 0.8594952254600647, 0.4992493343701762}
6	20.35408218	29.4683986	240.962	{0.3803075836490424, 2.3662241651251463, 0.21670942620875538, 12.069829693101328, 22.470008509422534, 0.07409275197763963, 0.4868211136149354}
7	17.74476811	21.74450278	240.393	{0.07036560572357656, 28.92714413463246, 0.9556895510804353, 8.391398404352335, 3.553450163122636, 0.7634610760102029, 0.7664878989621753}
8	15.4452608	20.02502538	239.873	{3.2804398593027663E-4, 2.130206530780347, 0.0953990401103348, 18.988061384921465, 26.53889538924503, 0.8904364986772291, 0.7698100668416794}
9	13.90613683	18.67601086	242.232	{0.009527354967637337, 20.075942778993866, 0.9337964955828406, 21.366853717496838, 27.038579784567954, 0.2911273520979219, 0.8003961538091202}
10	25.96131329	35.22577316	240.054	{0.30417799243713844, 2.2365931882868955, 0.03432833390484414, 14.512421867666843, 15.980263806830308, 0.05741241635488696, 0.49714772003192537}
11	31.37654842	41.83126725	245.022	{0.4884311529972927, 7.189607439376227, 0.609261404968562, 25.12927786621773, 28.257369519669858, 0.5494190003560842, 0.5055554121933008}
12	35.06622957	45.64412086	251.722	{0.2551455997124748, 1.010229004409755, 0.046055200857411854, 9.249321145141472, 10.023922709662807, 0.3611094331982381, 0.5136249458093092}
13	15.08089496	18.71501304	243.141	{0.1674565079133543, 16.47504947295753, 0.9963184010292878, 29.25547700681915, 19.558756253973517, 0.004900507507845396, 0.8001967500993836}
14	14.4828078	22.60734152	242.787	{0.47440225653698104, 2.6322459272046963, 0.08575293006348281, 28.454110562073712, 22.469814761547216, 0.5701248602332443, 0.47359117493461284}
15	22.07615889	31.00226437	241.78	{0.3137317320144521, 1.590528592732793, 0.015255864053237393, 20.91152842206898, 16.295113253358632, 0.9216297135008661, 0.48975333130497856}
16	21.46169545	30.39798024	240.781	{0.46068654366352574, 1.2281889948149847, 0.24161375043808977, 12.33266495827858, 12.873304826697893, 0.4252332690558854, 0.4919850842820211}
17	21.37292672	29.98609382	240.658	{0.49352676467443984, 3.2668459638129463, 0.16481776254738573, 8.898247402520791, 20.72322812645203, 0.43432606759842823, 0.49061092039407894}
18	22.99115147	32.391756	242.598	{0.44355856221015466, 1.3198587422094257, 0.013039212126278354, 6.899987985566052, 12.04961310213684, 0.12779766370381024, 0.49501848413279503}
19	27.38708705	37.25571342	242.298	{0.47464068943795346, 1.0740820657368175, 0.15676956297893985, 19.778930407280747, 4.965842885082959, 0.45365663537825196, 0.5036325371504393}

20	15.01493306	19.15505779	243.375	{0.02698455870074438, 26.09100482247466, 0.9767111319864629, 29.430598570635592, 29.841624439107775, 0.00467303620198659, 0.8313133262683516}
21	24.96388677	34.14068375	240.765	{0.30758084918673484, 1.0265308776007975, 0.32262996433077223, 19.07122094279745, 17.159754953407155, 0.24677358806072877, 0.49589441029124093}
22	21.28824727	30.27904681	240.613	{0.4375210649129539, 1.7314080157157856, 0.08095241407181858, 14.22511646272845, 13.082898313777024, 0.3324843638164641, 0.49099688179625406}
23	30.50492122	41.03953491	239.455	{0.4991073996353748, 5.056225063720439, 0.49801413093982844, 14.501623254941464, 8.862416784852417, 0.8405765491438885, 0.505394493359596}
24	13.57399901	16.91747293	243.463	{0.18088311378625782, 26.87981906572012, 0.9960739248048136, 29.415979106052283, 29.970120620928206, 0.022519418844785723, 0.8189988246117798}
25	22.86677607	32.67635688	253.344	{0.48559665620250164, 1.325545037081816, 0.7887905976246765, 28.697791237153478, 20.758821429689934, 0.38779465690643533, 0.4929227801180134}
26	30.79927809	40.01355523	251.879	{0.4873658292201227, 5.771738333046994, 0.6173219639567747, 27.8334814129508, 15.998607774811884, 0.6171758272281543, 0.505007252864105}
27	19.25368484	27.43892771	246.039	{0.4944234506471779, 2.561299043951001, 0.18711574875847636, 7.017549559008001, 22.641439496989253, 0.2238785669447281, 0.4865807306523534}
28	16.18031054	20.35633154	244.007	{0.0018262327980325137, 12.995184877577806, 0.8412334269446317, 29.798343612690118, 29.388117952236566, 0.9751214054080857, 0.8388894815928176}
29	18.03905918	26.46377691	243.716	{0.4487834132575867, 1.8568279887377501, 0.14457125934706164, 15.259480810967357, 18.29744854919353, 0.06669945777838852, 0.4836641127415516}
30	36.14788685	46.08262151	244.014	{0.444081031270007, 13.741178683178926, 0.35086448041873614, 17.16393664553799, 15.314070592561963, 0.5598263180552657, 0.5115333368462645}

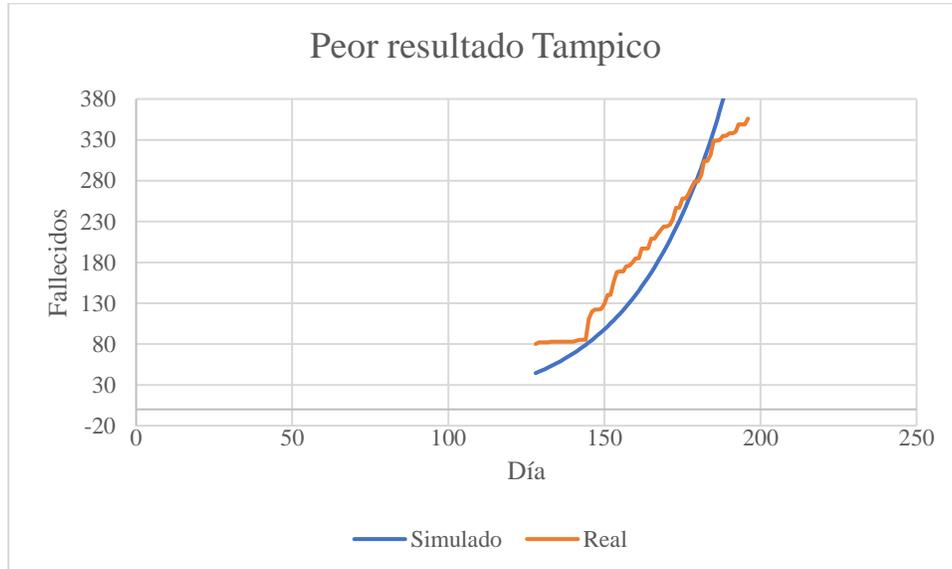
A continuación, se muestran las gráficas de la mejor y peor solución de la experimentación con la mejor configuración, los valores de los parámetros se han cargado al modelo SEIMR/R-S y se ha ejecutado una simulación, los resultados se comparan contra los reportados por secretaria de salud de Tamaulipas en el registro de fallecidos.

El experimento con la menor distancia promedio es el número 14, a continuación, se muestra la gráfica comparativa de la serie simulada contra el registro de Secretaría de Salud de Tamaulipas.



Gráfica 6.4. Mejor resultado instancia Tampico

El experimento con la mayor distancia promedio es el 30, a continuación, se muestra la gráfica comparativa de la serie simulada contra el registro de Secretaría de Salud de Tamaulipas.



Gráfica 6.5. Peor resultado instancia Tampico

6.2.2. Configuración para Instancia Madero

Los resultados de la experimentación para la instancia de Madero se han dividido en dos tablas, cada una contiene las 8 configuraciones y los 30 experimentos por configuración, la tabla 6.6 contiene los experimentos con 150 generaciones y la tabla 6.7 los experimentos con 300 generaciones.

Tabla 6.6. Experimentación Madero para 150 generaciones.

Exp.	Distancia Promedio	RMSE	Tiempo (s)	No. Gen	Selección	Cruza	Muta
1	11.85384098	15.62975637	130.237	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
2	10.00005699	12.07809501	130.995	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
3	9.921519888	11.91433464	126.483	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
4	11.288595	14.50899906	129.175	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
5	16.37562267	21.91242748	130.284	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
6	10.08753535	12.17596895	126.337	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
7	9.996695638	12.12375572	126.508	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
8	10.35137044	12.11856957	126.151	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
9	11.39148585	14.12967462	126.054	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
10	11.22869032	14.13980896	127.061	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
11	9.979720332	11.89852742	126.879	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
12	10.93564874	13.42632295	126.644	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
13	4.982744023	6.72864744	127.724	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
14	11.83445268	15.79714924	127.369	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
15	11.45833218	15.17737086	126.131	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
16	13.63374764	18.4516374	126.577	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
17	16.20614585	22.95651013	127.243	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
18	11.17680082	14.06839457	126.658	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
19	11.46166914	15.21751068	126.807	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
20	9.96630515	11.85338209	126.615	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
21	11.00521895	13.77626895	127.093	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
22	10.04453852	11.89728811	127.167	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
23	10.33550763	12.44125139	126.177	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
24	9.953356769	11.79679858	126.23	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
25	9.921030613	11.85583954	126.13	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
26	9.924015612	11.88327534	126.758	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
27	13.19088365	19.26776764	126.468	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
28	10.02160287	11.98662102	126.251	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
29	12.46823733	17.96924956	130.517	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
30	10.07323388	12.09941151	130.996	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
31	10.87621504	13.29429451	127.494	150	Ruleta	SBX	Inserción
32	10.23625964	12.24069541	122	150	Ruleta	SBX	Inserción
33	10.67119054	13.05432993	119.948	150	Ruleta	SBX	Inserción
34	9.908692646	11.84136377	124.164	150	Ruleta	SBX	Inserción
35	11.04278643	13.9929272	118.081	150	Ruleta	SBX	Inserción
36	10.00377773	11.86817449	120.416	150	Ruleta	SBX	Inserción
37	10.12431555	12.13502713	122.288	150	Ruleta	SBX	Inserción
38	10.74952626	13.14649628	121.872	150	Ruleta	SBX	Inserción
39	10.03312704	11.87239848	120.925	150	Ruleta	SBX	Inserción
40	9.899498243	11.7502612	123.797	150	Ruleta	SBX	Inserción
41	12.53094043	15.81917892	118.089	150	Ruleta	SBX	Inserción
42	10.07919126	12.08361043	118.753	150	Ruleta	SBX	Inserción
43	9.943866171	11.865104	125.183	150	Ruleta	SBX	Inserción
44	10.26667944	12.14296007	125.581	150	Ruleta	SBX	Inserción
45	9.964146173	11.56910291	123.673	150	Ruleta	SBX	Inserción
46	10.12083866	11.90103457	120.417	150	Ruleta	SBX	Inserción
47	11.22398714	14.19025021	115.643	150	Ruleta	SBX	Inserción
48	10.0188288	11.87969647	119.681	150	Ruleta	SBX	Inserción
49	10.29190288	12.18195633	117.617	150	Ruleta	SBX	Inserción
50	5.627899735	7.806317728	122.312	150	Ruleta	SBX	Inserción

51	10.1928615	12.17010747	119.981	150	Ruleta	SBX	Inserción
52	10.25318434	11.90424093	118.814	150	Ruleta	SBX	Inserción
53	3.54994417	5.605822856	122.427	150	Ruleta	SBX	Inserción
54	10.1097388	11.84412073	117.507	150	Ruleta	SBX	Inserción
55	10.20838519	11.9514119	116.192	150	Ruleta	SBX	Inserción
56	10.17750484	12.30065766	117.634	150	Ruleta	SBX	Inserción
57	11.44320495	14.9785709	116.617	150	Ruleta	SBX	Inserción
58	10.05099547	11.89376338	119.585	150	Ruleta	SBX	Inserción
59	12.74270963	17.3515183	119.766	150	Ruleta	SBX	Inserción
60	3.846087215	6.193273307	122.212	150	Ruleta	SBX	Inserción
61	12.66128955	17.1103087	124.118	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
62	11.34002816	15.01849201	127.098	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
63	10.42978426	12.62026609	126.9	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
64	14.61591466	20.23207748	125.02	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
65	10.51681407	12.74058286	124.519	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
66	10.30819179	12.38676255	124.403	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
67	8.493224205	11.26597347	123.898	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
68	10.18454662	12.24044548	124.6	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
69	10.3237187	12.42867078	124.152	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
70	10.21050572	12.27045593	123.599	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
71	14.46204669	20.33815543	123.576	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
72	10.77230295	13.35367746	124.198	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
73	10.0088018	12.069019	124.604	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
74	10.65199678	12.98156252	123.525	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
75	10.0138879	11.91485154	123.584	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
76	12.21589645	16.82904608	123.717	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
77	9.968532287	11.81012207	123.576	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
78	10.77930098	13.28608941	123.694	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
79	10.40078561	12.55934305	124.139	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
80	19.52821118	26.48212364	123.695	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
81	12.16726766	16.47572722	124.54	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
82	11.77921799	15.8306113	124.128	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
83	10.20307791	12.26299279	124.313	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
84	6.117301607	7.886107157	124.103	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
85	10.7673433	13.17223417	123.771	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
86	10.07828933	12.08836286	123.855	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
87	10.32183562	12.40310952	124.215	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
88	11.2629206	14.51065258	123.966	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
89	10.80803123	13.53344736	124	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
90	10.20508052	12.26490587	123.948	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
91	10.27020367	12.28898665	122.074	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
92	10.17418349	12.26240022	120.616	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
93	10.27701052	12.34580551	119.887	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
94	10.44343625	12.57986832	121.824	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
95	10.37898944	12.4816702	120.663	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
96	10.99512225	13.7728483	120.02	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
97	11.26601809	14.23685239	122.975	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
98	10.47529745	12.53890943	120.292	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
99	10.43248263	12.55993241	122.495	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
100	10.03751123	11.95283868	118.951	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
101	10.05193412	11.88731395	122.206	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
102	10.01230991	11.93440051	121.412	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
103	15.1677169	21.32629434	123.964	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
104	11.10390265	13.90674622	123.559	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
105	10.11087181	12.23550746	122.143	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
106	5.482776386	7.817808858	127.602	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
107	10.57304193	12.82738561	123.265	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
108	10.35442254	12.4452905	122.482	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
109	10.62095894	12.89814092	122.356	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
110	10.00376345	11.98034324	126.164	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
111	10.50129798	12.65087118	123.087	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
112	10.22801162	12.31035149	120.308	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
113	10.37452622	12.48654666	122.73	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
114	10.08836432	12.07829139	122.105	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
115	10.01241116	11.93805951	124.759	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
116	12.52239335	16.93249723	120.885	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
117	10.47937177	12.64362871	122.699	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción

118	11.53831826	15.1532542	122.946	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
119	10.06553516	11.92261191	118.856	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
120	13.94958163	19.18888817	121.448	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción

Tabla 6.7. Experimentación Madero para 300 generaciones.

Exp.	Distancia Promedio	RMSE	Tiempo (s)	No. Gen	Selección	Cruza	Muta
121	9.98074525	11.8285735	243.242	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
122	11.5488387	15.2709329	243.875	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
123	10.4336674	12.583477	244.584	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
124	12.3044754	16.3697083	244.404	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
125	11.6612333	14.5996723	243.827	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
126	6.17545069	8.74250069	242.499	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
127	10.4670105	12.64036	244.638	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
128	10.268436	12.3234031	244.255	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
129	10.4759512	12.6620725	244.622	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
130	6.0958971	8.83492747	244.631	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
131	11.006651	13.7419222	244.137	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
132	9.85334088	11.7886332	248.171	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
133	11.0969795	13.9029325	244.104	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
134	10.3181796	12.5558594	244.051	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
135	10.8350319	13.3786801	243.548	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
136	9.92101258	11.7391614	243.189	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
137	12.2379719	16.5230806	244.063	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
138	11.152477	13.9810415	243.547	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
139	9.93324011	11.8063763	245.635	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
140	10.0503056	11.9866079	245.846	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
141	10.3394404	12.3835451	244.6	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
142	9.9923654	11.8613669	244.655	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
143	5.4777219	7.7626898	244.309	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
144	10.0685189	12.1990436	256.999	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
145	11.0203847	13.9493773	246.918	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
146	10.9051753	13.4281544	243.163	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
147	9.86288686	11.9313015	243.573	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
148	9.96048986	11.9156811	243.121	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
149	13.0567926	18.4056931	247.968	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
150	10.4672904	12.595907	248.516	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
151	10.5396322	12.6577427	249.13	300	Ruleta	SBX	Inserción
152	10.1826842	12.1570545	244.816	300	Ruleta	SBX	Inserción
153	10.5209875	12.5166258	255.876	300	Ruleta	SBX	Inserción
154	10.4932212	12.6108065	247.608	300	Ruleta	SBX	Inserción
155	10.0336168	11.8313102	243.969	300	Ruleta	SBX	Inserción
156	10.2117458	12.208807	247.791	300	Ruleta	SBX	Inserción
157	10.2783225	12.3294897	248.557	300	Ruleta	SBX	Inserción
158	11.1157706	13.9594677	256.831	300	Ruleta	SBX	Inserción
159	9.98712739	11.9151687	243.248	300	Ruleta	SBX	Inserción
160	11.5725263	15.1176959	242.629	300	Ruleta	SBX	Inserción
161	10.9634619	13.5854713	243.363	300	Ruleta	SBX	Inserción
162	11.8095861	15.8347502	251.547	300	Ruleta	SBX	Inserción
163	5.70096375	7.86271199	253.828	300	Ruleta	SBX	Inserción
164	10.9820431	13.6081846	251.717	300	Ruleta	SBX	Inserción
165	9.84695858	11.7085595	254.739	300	Ruleta	SBX	Inserción
166	4.29068502	6.58519887	253.694	300	Ruleta	SBX	Inserción
167	9.98470277	11.9295669	255.481	300	Ruleta	SBX	Inserción
168	14.0971087	19.9286923	251.492	300	Ruleta	SBX	Inserción
169	10.4434866	12.5914625	245.905	300	Ruleta	SBX	Inserción
170	11.1647639	14.5144071	246.418	300	Ruleta	SBX	Inserción
171	11.2490933	14.2254975	243.396	300	Ruleta	SBX	Inserción
172	11.202349	14.2860786	242.949	300	Ruleta	SBX	Inserción
173	11.5300853	15.1241912	245.027	300	Ruleta	SBX	Inserción
174	9.876161	11.79919	248.56	300	Ruleta	SBX	Inserción
175	10.7633734	13.1751081	256.144	300	Ruleta	SBX	Inserción
176	13.5180428	18.3153858	256.37	300	Ruleta	SBX	Inserción
177	10.0331751	11.8920735	249.446	300	Ruleta	SBX	Inserción
178	11.3491578	14.5901243	256.013	300	Ruleta	SBX	Inserción

179	10.1663414	12.1129723	242.757	300	Ruleta	SBX	Inserción
180	10.8815973	13.3732747	244.905	300	Ruleta	SBX	Inserción
181	14.5937598	20.6852136	250.387	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
182	10.6353394	13.0013479	244.408	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
183	9.83448701	11.811509	243.2	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
184	10.0727262	12.1834204	250.721	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
185	10.0060422	11.8433553	246.58	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
186	4.82955168	6.7473783	242.653	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
187	10.1692876	12.2601284	245.927	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
188	4.78053504	7.37812448	256.62	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
189	11.6142618	15.4889261	255.492	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
190	9.92720563	11.7991746	243.544	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
191	10.8356045	13.3839022	244.281	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
192	10.122196	12.2043704	249.636	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
193	10.0293084	11.9908419	251.766	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
194	10.2665358	12.3330113	244.363	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
195	9.93266332	12.0220313	245.392	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
196	13.5922866	18.2112137	245.085	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
197	4.29761025	6.77767356	249.01	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
198	10.1688553	12.2521436	253.568	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
199	9.97069038	11.9791835	253.849	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
200	11.2801915	14.4485235	244.074	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
201	11.1017445	13.9631516	242.791	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
202	10.6978703	13.082837	248.226	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
203	13.7397989	18.4660839	252.911	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
204	14.7213035	20.4902687	246.504	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
205	10.3535894	12.469226	250.712	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
206	9.9383403	11.9219479	256.6	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
207	10.3991318	12.5721243	245.971	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
208	5.88856162	8.45970742	242.838	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
209	9.95710737	11.9083934	243.901	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
210	10.8667247	13.4894046	244.389	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
211	10.4691537	12.6253679	255.347	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
212	9.93957188	11.8490182	245.512	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
213	10.7774584	13.1993537	249.911	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
214	15.3522737	20.396927	252.442	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
215	10.7266886	13.0900032	254.408	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
216	11.0089855	13.7610453	246.674	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
217	10.767678	13.1620029	254.402	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
218	11.3299234	14.3930478	244.553	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
219	10.0642114	11.9032397	252.188	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
220	11.371207	14.3555668	248.318	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
221	13.0647567	17.5925079	245.044	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
222	12.273176	16.6177592	254.944	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
223	10.4417168	12.57372	248.63	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
224	10.0823678	12.0074501	248.191	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
225	9.93514579	11.8403893	249.54	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
226	13.6493948	19.6081716	247.203	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
227	10.6745075	13.0922019	248.903	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
228	13.9773047	18.8244119	247.193	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
229	10.6536649	13.0067225	245.814	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
230	10.82331	13.2950943	256.884	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
231	10.210441	12.5406974	249.81	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
232	10.4824582	12.554048	250.69	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
233	10.1824739	11.9727504	249.464	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
234	10.5155642	12.7069069	251.171	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
235	10.7377039	13.1228051	255.207	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
236	10.0246428	11.9771405	245.386	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
237	11.8269788	15.7933265	244.357	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
238	10.0034565	11.9270885	254.927	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
239	10.0386092	11.9159457	243.022	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
240	10.1576633	12.2938748	247.273	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción

La tabla 6.8 muestra los promedios de la distancia promedio, RMSE y tiempo en segundos para cada una de las configuraciones, donde se puede apreciar que la configuración 2 (Selección por Ruleta, Cruza SBX, mutación por Inserción, 150 generaciones) genera mejores valores.

Tabla 6.8. Promedios de la experimentación instancia Madero.

Conf.	Promedio de Dist. Promedio	Promedio RMSE	Promedio Tiempo (s)
1	11.03562018	14.04268716	127.3906333
2	9.872942864	12.09428892	120.6223
3	11.05320487	14.01220588	124.2484667
4	10.5997255	13.11947814	122.1591
5	10.23249443	12.78975608	245.023
6	10.49295904	13.14490233	249.1402
7	10.15411036	12.85415393	247.8466333
8	11.05208294	13.79995284	249.5802667

La información obtenida por la experimentación se ha procesado en el Software Minitab® y se han obtenido las gráficas de Efectos principales y las de Interacción para la distancia promedio, para RMSE y para el tiempo de ejecución.

Para la Distancia Promedio, como se puede observar en la figura 6.6, en la gráfica de efectos principales la selección por ruleta obtiene mejores valores respecto al torneo determinista, la cruza SBX obtiene también mejores valores respecto a la cruza de dos puntos, y en el número de generaciones 300 obtiene mejores valores, en la gráfica de interacción se puede observar que la selección por ruleta con la cruza SBX obtienen mejores valores, la selección por ruleta da mejores valores que el torneo determinista, y aunque la cruza de dos puntos obtiene mejores valores para 300 generaciones, también se observa que obtiene los peores, por otra parte SBX con 150 generaciones está cerca de la cruza de dos puntos.

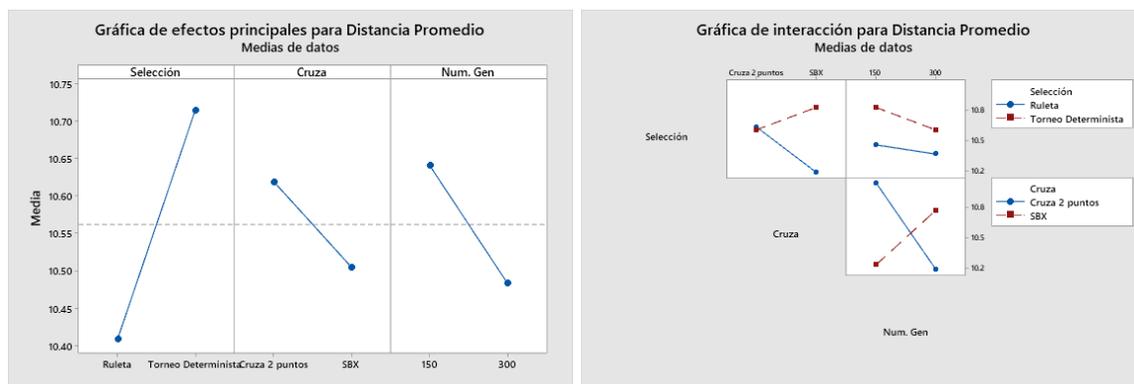


Figura 6.6. Graficas de Efectos Principales e Interacción para distancia promedio Madero

Para RMSE, se puede observar un comportamiento similar al observado en las gráficas para Distancia Promedio.

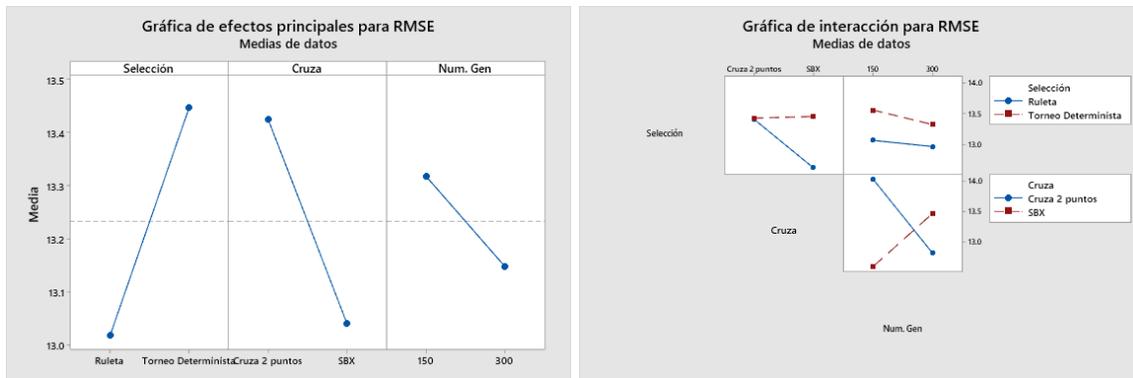


Figura 6.7. Gráficas de Efectos Principales e Interacción para RMSE Madero

Para Tiempo de ejecución se puede observar que no existe mucha diferencia entre los operadores genéticos, donde se observa diferencia es en el número de generaciones, 150 generaciones representan el menor tiempo y 300 generaciones el mayor tiempo de ejecución.

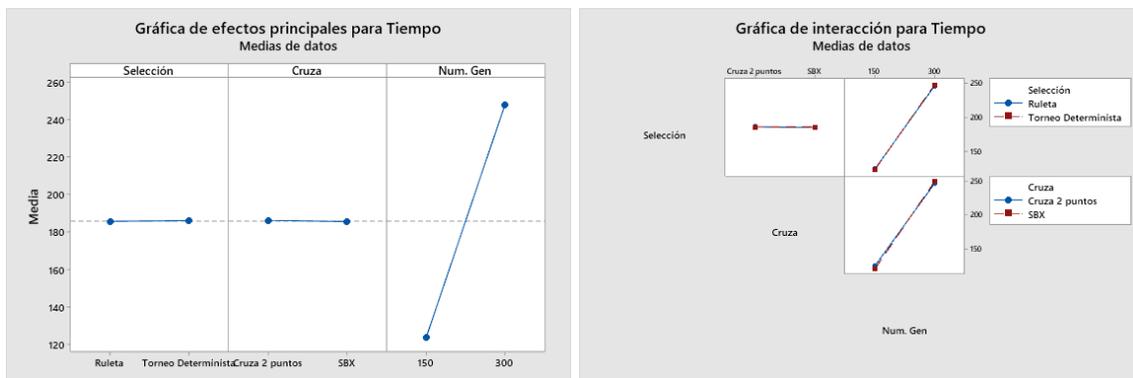


Figura 6.8. Gráficas de Efectos Principales e Interacción para tiempo de ejecución Madero

Para la instancia de Madero, con la información observada en la tabla 6.8 y las gráficas de Efectos Principales y las de Interacción se puede establecer una configuración para el algoritmo genético como la siguiente:

- Operador de selección: Ruleta
- Operador de cruza: SBX
- Numero de generaciones: 150

En la siguiente tabla se muestran los resultados de 30 experimentos para la mejor configuración seleccionada.

Tabla 6.9. Experimentos con la mejor configuración del algoritmo genético

Exp.	Distancia Promedio	RMSE	Tiempo (s)	Parámetros biológicos generados
1	10.87621504	13.29429451	127.494	{0.34918263603483013, 2.1745383484132983, 0.2205970665132576, 12.486916161233141, 6.569608083220119, 0.6314231811389442, 0.46631286410338463}
2	10.23625964	12.24069541	122	{0.3154196135219657, 1.3062340173734786, 0.1299024112757895, 9.054015251797214, 14.15589360991092, 0.029354815185735596, 0.45662438488413426}
3	10.67119054	13.05432993	119.948	{0.24445086342413097, 1.1459597013756495, 0.09519979359269505, 14.555005630460343, 14.561033267755512, 0.8901273339488345, 0.46249786502533585}
4	9.908692646	11.84136377	124.164	{0.48495430816856183, 11.55323569318363, 0.31255088663088715, 28.845511803432572, 17.263927449301885, 0.8215630609249601, 0.4454555672164747}
5	11.04278643	13.9929272	118.081	{0.21713903170454957, 1.8988623185223026, 0.012597582848491145, 8.498208866984037, 15.731152171470827, 0.06193005233270168, 0.46507906422937917}
6	10.00377773	11.86817449	120.416	{0.41269422302442355, 5.270136046409423, 0.1851509371109252, 12.278971158450592, 15.701019136721992, 0.01979240471939753, 0.449441776939897}
7	10.12431555	12.13502713	122.288	{0.35935936221776227, 1.7821294094344748, 0.040318296757096646, 10.757389585438347, 18.765762016617398, 0.6190401663849017, 0.4545046015963012}
8	10.74952626	13.14649628	121.872	{0.31886998232702113, 1.5636489672626595, 0.2721802145549959, 7.089222357461469, 13.328394163713005, 0.2645515667266469, 0.4649678135954372}
9	10.03312704	11.87239848	120.925	{0.3790295790564447, 2.4612493222501817, 0.2507280190836418, 12.356796507557794, 16.05708435853688, 0.232674888053427, 0.4514259174330465}
10	9.899498243	11.7502612	123.797	{0.3675673235280226, 15.563174003013764, 0.07182062933602681, 26.355772097077445, 22.473505891779745, 0.8432150329525454, 0.4410939095773288}
11	12.53094043	15.81917892	118.089	{0.2701326529058677, 1.9473823859156325, 0.2779661466706866, 7.056213293483033, 10.477644088657835, 0.29832054705513295, 0.47483190964833044}
12	10.07919126	12.08361043	118.753	{0.43073153124015023, 12.11695362483742, 0.06007543250464195, 14.197077154782983, 15.016417571320614, 0.15129642016373676, 0.44902285409008913}
13	9.943866171	11.865104	125.183	{0.44374836432188036, 9.106745237105882, 0.23509502528020826, 19.343501762030176, 20.77764184948549, 0.06924013674460731, 0.445858225941338}
14	10.26667944	12.14296007	125.581	{0.2612267437154987, 2.8160708307017845, 0.11976753145502055, 7.8824302705148135, 21.306225488029995, 0.07447361289054975, 0.4545853250368189}
15	9.964146173	11.56910291	123.673	{0.4719209413617035, 23.74130868173715, 0.19587399703962663, 29.48562600308822, 37.76443963589236, 0.5165960594297635, 0.44318566565310624}
16	10.12083866	11.90103457	120.417	{0.3165020614249294, 2.994931654867165, 0.10437538526884141, 18.391029128772786, 13.988167414077862, 0.6183769209991344, 0.45237448350721515}
17	11.22398714	14.19025021	115.643	{0.20846351051613565, 1.626246222445438, 0.08343324853457249, 3.526059495995817, 15.365361802095265, 0.008883324029557353, 0.4666702140120023}
18	10.0188288	11.87969647	119.681	{0.3676641628806551, 3.4922993586742326, 0.36190863396093004, 21.082713620701313, 18.406874489386386, 0.4002647937286115, 0.4501310652893569}
19	10.29190288	12.18195633	117.617	{0.3507828534237857, 1.907698266399927, 0.08811733624701495, 6.822622334079793, 12.628622408521124, 0.09239660205043947, 0.4582511468169764}

20	5.627899735	7.806317728	122.312	{0.07360868869975412, 21.440648835765366, 0.971527587817445, 3.7332032074543493, 28.74981878795794, 0.5724016321934747, 0.7172920812010984}
21	10.1928615	12.17010747	119.981	{0.39511802394784484, 2.3154687332387613, 0.12025890916831801, 15.489610587790176, 8.123309328070366, 0.594730840412572, 0.4564204061218789}
22	10.25318434	11.90424093	118.814	{0.3270378167639165, 1.873301865666246, 0.01005715954411938, 13.43928791842577, 10.497293765417597, 0.8131353963107212, 0.4566668722862446}
23	3.54994417	5.605822856	122.427	{0.005594584049203482, 27.716485885511165, 0.9241602926101814, 44.04039563714001, 39.558116766314036, 1.5576128047904745, 0.7820333351038479}
24	10.1097388	11.84412073	117.507	{0.3759440459274137, 1.751369998137413, 0.06215964321498647, 12.0458300988218, 12.35653277460327, 0.13750287392214497, 0.45418293477391714}
25	10.20838519	11.9514119	116.192	{0.32964106863440734, 1.2268196293735039, 0.05373997191391296, 9.710065010831611, 13.267955267362243, 0.042890827550175495, 0.45624453938625}
26	10.17750484	12.30065766	117.634	{0.4178696190546632, 2.8616502613555657, 0.28006329449298495, 23.46420359455433, 11.25830440963303, 0.16681537442849795, 0.45580625835210065}
27	11.44320495	14.9785709	116.617	{0.4276246498649269, 1.3036966089763944, 0.06793151807772456, 6.894405135687754, 5.515144610168593, 0.14565502779183756, 0.47306345341285544}
28	10.05099547	11.89376338	119.585	{0.4037644823460031, 1.105768113988623, 0.1716236339291244, 15.801941179885139, 10.47560628623029, 0.3750377453473323, 0.4533831070568785}
29	12.74270963	17.3515183	119.766	{0.23043479597337088, 1.051068006553288, 0.10823793711798396, 11.980835196995852, 9.043017737285963, 0.18683608793969744, 0.4766472377805124}
30	3.846087215	6.193273307	122.212	{0.1081863867285141, 58.32309545911171, 0.988054934104804, 60.54049282301657, 20.65600722458609, 0.4790031850330091, 0.7610749557678556}

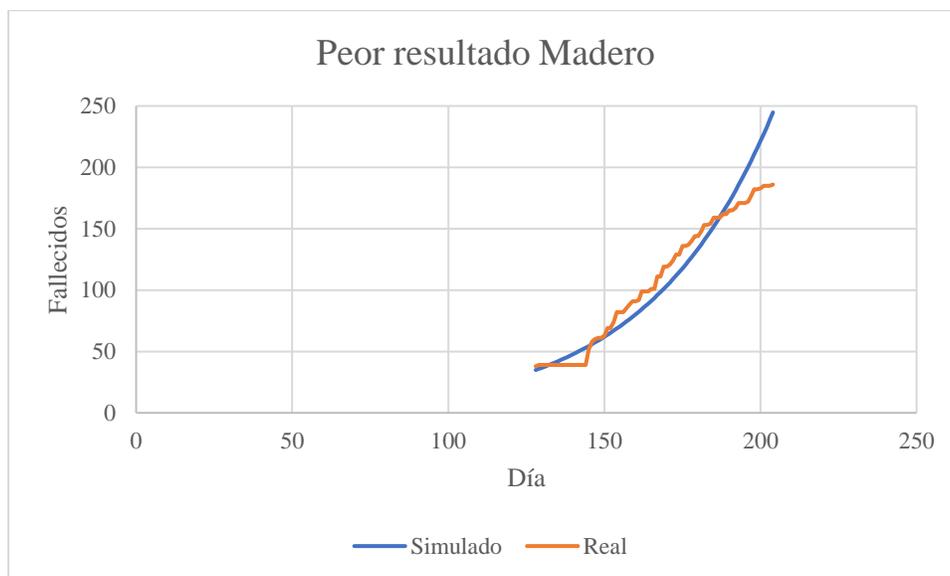
A continuación, se muestran las gráficas de la mejor y peor solución de la experimentación con la mejor configuración, los valores de los parámetros se han cargado al modelo SEIMR/R-S y se ha ejecutado una simulación, los resultados se comparan contra los reportados por secretaria de salud de Tamaulipas en el registro de fallecidos.

El experimento con la menor distancia promedio es el número 23, a continuación, se muestra la gráfica comparativa de la serie simulada contra el registro de Secretaría de Salud de Tamaulipas.



Gráfica 6.6. Mejor resultado instancia Madero

El experimento con la mayor distancia promedio es el número 29, a continuación, se muestra la gráfica comparativa de la serie simulada contra el registro de Secretaría de Salud de Tamaulipas.



Gráfica 6.7. Peor resultado instancia Madero

6.2.3. Configuración para Instancia Altamira

Los resultados de la experimentación para la instancia de Altamira se han dividido en dos tablas, cada una contiene las 8 configuraciones y los 30 experimentos por configuración, la tabla 6.9 contiene los experimentos con 150 generaciones y la tabla 6.10 los experimentos con 300 generaciones.

Tabla 6.9. Experimentación Altamira para 150 generaciones.

Exp.	Distancia Promedio	RMSE	Tiempo (s)	No. Gen	Selección	Cruza	Muta
1	10.22817481	11.70944267	131.403	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
2	10.18113496	11.5215993	131.541	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
3	3.565964708	4.757358726	131.9	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
4	10.44458589	12.50921125	126.118	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
5	12.60126667	15.85141341	123.578	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
6	11.95147433	16.3312965	123.956	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
7	13.26355868	19.05471455	123.996	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
8	10.66600981	13.07818193	123.237	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
9	10.86411931	13.7343959	123.331	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
10	10.3425368	11.99166262	123.761	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
11	11.89251497	16.66635988	123.299	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
12	11.91649184	16.99256169	123.884	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
13	3.931043069	4.83705075	123.697	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
14	10.83410726	13.584919	123.998	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
15	11.28600557	14.85133558	124.688	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
16	10.67890468	13.12407824	123.676	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
17	10.4899764	12.47819703	123.806	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
18	10.3548288	12.18462988	123.86	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
19	10.88704454	13.7738375	123.738	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
20	12.90477367	19.04123725	125.328	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
21	10.51134602	12.61882588	124.243	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
22	4.394040067	6.360443736	123.635	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
23	3.540849778	4.78386488	123.762	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
24	10.32350835	12.20364212	123.99	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
25	4.794705	6.824832504	124.466	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
26	10.5356759	12.80705876	128.898	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
27	10.56656708	12.85443323	126.003	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
28	10.06024279	11.2401865	127.012	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
29	10.61058104	12.78491596	123.584	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
30	12.64952195	18.79204799	126.729	150	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
31	11.42384007	15.17886703	117.999	150	Ruleta	SBX	Inserción
32	11.57751668	15.80911385	117.964	150	Ruleta	SBX	Inserción
33	10.86879647	13.61210771	116.303	150	Ruleta	SBX	Inserción
34	13.09393973	19.71921951	114.827	150	Ruleta	SBX	Inserción
35	10.08005627	11.32339599	120.889	150	Ruleta	SBX	Inserción
36	10.12437561	11.34114197	118.501	150	Ruleta	SBX	Inserción
37	11.15317807	14.7189187	119.011	150	Ruleta	SBX	Inserción
38	12.32541233	17.00451236	117.148	150	Ruleta	SBX	Inserción
39	11.97753194	16.3252916	118.03	150	Ruleta	SBX	Inserción
40	10.1328057	11.41571755	119.965	150	Ruleta	SBX	Inserción
41	10.43272702	12.35827638	116.614	150	Ruleta	SBX	Inserción
42	11.27732926	14.6146589	118.445	150	Ruleta	SBX	Inserción
43	10.27688189	11.78191824	119.145	150	Ruleta	SBX	Inserción
44	11.09806075	14.55733914	118.665	150	Ruleta	SBX	Inserción
45	12.21714468	17.42125709	117.836	150	Ruleta	SBX	Inserción
46	3.690424103	5.695569727	122.733	150	Ruleta	SBX	Inserción
47	11.30857513	15.00741426	118.602	150	Ruleta	SBX	Inserción
48	11.43181954	15.33402058	115.78	150	Ruleta	SBX	Inserción
49	10.32566991	12.00769655	117.649	150	Ruleta	SBX	Inserción
50	10.54963862	12.6859006	117.586	150	Ruleta	SBX	Inserción

51	10.28445971	11.87247865	117.862	150	Ruleta	SBX	Inserción
52	10.35620903	12.15908344	114.889	150	Ruleta	SBX	Inserción
53	11.6899608	16.17592752	116.577	150	Ruleta	SBX	Inserción
54	3.702983216	5.581073931	118.693	150	Ruleta	SBX	Inserción
55	10.1235796	11.2838711	125.385	150	Ruleta	SBX	Inserción
56	10.05438377	11.3981786	124.208	150	Ruleta	SBX	Inserción
57	3.284328853	4.461453596	121.414	150	Ruleta	SBX	Inserción
58	11.28281043	14.94728267	116.946	150	Ruleta	SBX	Inserción
59	11.27218617	15.04887719	115.54	150	Ruleta	SBX	Inserción
60	10.54453985	12.74062885	118.482	150	Ruleta	SBX	Inserción
61	10.53744211	12.74043757	131.27	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
62	10.17009895	11.17930018	126.654	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
63	3.604574308	5.211789342	125.424	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
64	16.42321399	25.19674409	125.874	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
65	10.20225364	11.59547485	124.94	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
66	10.641913	13.13599082	125.919	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
67	12.42939055	18.3986275	125.306	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
68	11.45252585	15.52460898	125.775	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
69	10.47204313	12.55851526	127.09	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
70	15.20725477	22.42588581	126.47	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
71	10.90900623	13.91901336	125.938	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
72	11.57255947	13.02425812	126.329	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
73	16.70630425	23.67396085	127.665	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
74	10.09980659	11.27080011	125.545	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
75	14.57251187	21.97466899	125.873	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
76	13.02995032	19.53570524	126.396	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
77	10.43489086	12.30966837	126.108	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
78	4.197354094	5.63194908	125.88	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
79	15.61007143	24.20581353	125.865	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
80	10.12007704	11.42497338	126.448	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
81	10.95555344	12.35116976	125.151	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
82	10.41841267	12.40731821	126.462	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
83	11.82555697	16.58109148	125.856	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
84	3.213584495	4.522573329	125.919	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
85	3.168212139	4.563674346	125.613	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
86	10.69568482	13.27390685	125.628	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
87	10.20763454	11.81850281	126.41	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
88	17.80547544	25.50975334	126.218	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
89	12.14808265	17.18748793	126.538	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
90	12.09706716	17.03246107	126.589	150	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
91	10.69511433	13.16455872	120.263	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
92	12.31609377	17.28721146	121.621	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
93	12.90104306	19.05022788	123.009	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
94	10.63624166	13.01566069	132.87	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
95	10.27314281	11.85534905	131.545	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
96	12.26709645	17.61831093	122.591	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
97	11.41441136	15.48085979	118.991	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
98	12.94520409	19.22634789	120.141	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
99	10.13185785	11.36811568	125.547	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
100	11.34000923	15.06973119	119.637	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
101	11.13573378	14.68127933	121.204	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
102	11.73811137	16.44486962	118.092	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
103	11.86543851	16.48812321	123.538	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
104	10.70992667	13.27426591	122.587	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
105	11.9440706	16.79709516	122.355	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
106	10.71071919	13.23797401	122.273	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
107	10.76994594	13.42737644	123.337	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
108	10.89076354	13.71162072	121.452	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
109	10.99600486	14.04181783	119.914	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
110	10.51657835	12.68962131	123.232	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
111	10.17152145	11.52338057	121.997	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
112	10.12977098	11.39433387	122.782	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
113	11.1720304	14.73568135	123.243	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
114	10.25252962	11.76866872	120.748	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
115	3.447525858	5.358301724	125.001	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
116	10.20665382	11.60958903	122.138	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
117	10.71405768	13.26675603	130.618	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción

118	10.66420349	13.09802044	125.781	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
119	10.45249068	12.5158331	125.782	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción
120	10.50752648	12.65266971	123.452	150	Torneo Determinista	SBX	Inserción

Tabla 6.10. Experimentación Altamira 300 generaciones.

Exp.	Distancia Promedio	RMSE	Tiempo (s)	No. Gen	Selección	Cruza	Muta
121	10.59711717	12.95808842	247.728	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
122	10.16169703	11.46814724	243.71	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
123	12.21910321	17.21722725	242.727	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
124	3.226916959	4.56736499	243.682	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
125	10.95465626	13.61439881	249.026	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
126	10.06871631	11.25304452	262.33	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
127	3.855072358	5.015176525	243.294	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
128	10.43953107	12.70952936	242.39	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
129	10.31938813	12.16424388	243.1	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
130	10.10692654	11.37044283	241.896	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
131	12.68976384	18.53727899	242.591	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
132	3.187887648	4.745121601	244.174	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
133	10.71949995	13.23827299	247.09	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
134	10.25023623	11.75157808	245.448	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
135	15.36789352	22.95094082	253.6	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
136	10.14632734	11.40582713	244.685	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
137	11.3684701	15.49501231	243.689	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
138	3.497239958	5.248291686	244.509	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
139	10.13875306	11.36816814	244.22	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
140	12.21017791	17.35851901	242.575	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
141	10.23727975	11.73779723	244.971	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
142	10.15903024	11.44373672	242.887	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
143	10.8405435	13.58728502	246.596	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
144	10.30962672	11.9565284	249.141	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
145	10.41945235	12.36984104	256.578	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
146	3.999337915	5.539026359	250.015	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
147	13.94028751	20.68472219	248.559	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
148	10.39800801	12.30751025	249.031	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
149	10.24456935	11.83386787	248.891	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
150	14.37935479	21.49683316	248.359	300	Ruleta	Cruza 2 puntos	Inserción
151	3.173122831	4.469668284	260.837	300	Ruleta	SBX	Inserción
152	10.19512902	11.5553002	258.532	300	Ruleta	SBX	Inserción
153	10.88211785	13.75301397	258.13	300	Ruleta	SBX	Inserción
154	10.49717946	12.49209221	254.888	300	Ruleta	SBX	Inserción
155	11.97040235	16.9698685	247.684	300	Ruleta	SBX	Inserción
156	10.79354925	13.45326789	248.491	300	Ruleta	SBX	Inserción
157	11.81094519	16.60510201	255.299	300	Ruleta	SBX	Inserción
158	13.38240639	19.21383093	240.324	300	Ruleta	SBX	Inserción
159	11.0212314	14.37613427	259.703	300	Ruleta	SBX	Inserción
160	13.65979343	20.61337593	260.559	300	Ruleta	SBX	Inserción
161	14.25993471	20.89105618	240.263	300	Ruleta	SBX	Inserción
162	10.81815338	13.41901613	255.054	300	Ruleta	SBX	Inserción
163	10.37603242	12.2845186	246.778	300	Ruleta	SBX	Inserción
164	11.96335818	16.7840976	250.743	300	Ruleta	SBX	Inserción
165	10.74205323	13.3378428	239.902	300	Ruleta	SBX	Inserción
166	11.76123113	16.47066301	240.535	300	Ruleta	SBX	Inserción
167	11.30515889	14.91410918	248.6	300	Ruleta	SBX	Inserción
168	10.72418312	13.25119685	254.127	300	Ruleta	SBX	Inserción
169	10.80968393	13.53214156	258.64	300	Ruleta	SBX	Inserción
170	10.02088348	11.1415343	241.391	300	Ruleta	SBX	Inserción
171	10.33725261	12.13284823	256.705	300	Ruleta	SBX	Inserción
172	3.139236326	4.56083552	240.645	300	Ruleta	SBX	Inserción
173	12.34569658	18.15025676	253.863	300	Ruleta	SBX	Inserción
174	10.20785537	11.74972352	245.275	300	Ruleta	SBX	Inserción
175	10.7207008	13.1903898	254.156	300	Ruleta	SBX	Inserción
176	10.14401325	11.45605443	251.515	300	Ruleta	SBX	Inserción
177	10.2016986	11.66082136	243.052	300	Ruleta	SBX	Inserción
178	3.552605423	5.601606721	241.88	300	Ruleta	SBX	Inserción

179	11.63455824	16.01540564	257.364	300	Ruleta	SBX	Inserción
180	10.44841944	12.27149051	248.86	300	Ruleta	SBX	Inserción
181	18.42156553	25.66087868	253.545	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
182	10.25290044	11.82582552	258.92	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
183	11.78500836	16.51628503	259.041	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
184	10.95863017	13.99154438	261.416	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
185	10.94441425	14.03268742	242.837	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
186	10.83418378	13.65571813	239.555	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
187	15.6379338	23.25746436	249.062	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
188	11.38591802	15.20467661	261.445	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
189	4.317798244	5.414234905	248.145	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
190	10.16660248	11.54315887	239.136	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
191	10.48915187	12.62165313	259.716	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
192	3.279033505	4.892070682	247.025	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
193	11.22354848	14.85663506	245.906	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
194	3.616891978	5.417292313	262.082	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
195	12.51902959	18.63462161	243.555	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
196	10.25768778	11.8229735	243.094	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
197	10.665901	13.15628353	254.37	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
198	3.189810057	4.956012018	255.336	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
199	11.38992535	15.28618438	257.714	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
200	11.84215475	16.62566552	249.474	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
201	10.68434149	13.21584713	258.072	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
202	3.543167092	5.292991125	252.672	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
203	10.77253967	13.43529527	253.037	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
204	10.44120292	12.52923737	251.289	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
205	10.80310021	13.49298716	244.347	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
206	10.77668431	13.43616915	257.115	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
207	10.62482918	12.9890167	251.969	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
208	10.99510511	14.41214162	245.273	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
209	10.36816991	12.22097986	250.459	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
210	12.06023539	17.00817325	259.251	300	Torneo Determinista	Cruza 2 puntos	Inserción
211	10.78027451	13.42810989	242.186	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
212	11.69719706	16.30008108	245.12	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
213	11.11247089	14.49079634	257.828	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
214	13.1448369	19.46973407	255.858	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
215	13.3553796	20.38366117	253.84	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
216	10.84001833	13.54820924	239.508	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
217	10.60261546	12.91985985	259.074	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
218	10.8151461	13.4909693	257.018	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
219	11.37319462	15.11834843	246.778	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
220	10.20351328	11.5951027	248.742	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
221	11.97721964	16.85348446	253.64	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
222	10.4697032	12.52204602	257.937	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
223	11.61042783	15.93254358	258.554	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
224	11.86340214	16.62281871	254.443	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
225	10.93277766	13.81382204	241.139	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
226	11.05453111	14.26683364	256.987	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
227	10.62335308	13.0294592	259.066	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
228	12.21298367	17.27877599	251.55	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
229	10.62379209	12.97679992	257.527	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
230	11.63869634	16.23558029	261.229	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
231	14.19536039	21.31447268	241.037	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
232	11.20750959	14.81484459	238.125	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
233	10.25564232	11.73732662	258.887	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
234	10.81938792	13.50462724	249.398	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
235	10.2277118	11.68686182	258.06	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
236	3.155221023	4.769046096	244.418	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
237	10.79198161	13.44931773	240.062	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
238	15.07071958	22.23634554	251.754	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
239	14.17750999	21.25086503	258.272	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción
240	11.07761816	14.38033511	247.201	300	Torneo Determinista	SBX	Inserción

La tabla 6.11 muestra los promedios de la distancia promedio, RMSE y tiempo en segundos para cada una de las configuraciones, donde se puede apreciar que la configuración 5 (Selección por Ruleta, Cruza de dos puntos, mutación por inserción, 300 generaciones) genera mejores valores, aunque la configuración 1 (Selección por Ruleta, Cruza de dos puntos, mutación por inserción, 15 generaciones) está muy cercana y su tiempo promedio es menor.

Tabla 6.11. Experimentación Altamira 300 generaciones.

Conf.	Promedio de Dist. Promedio	Promedio RMSE	Promedio Tiempo (s)
1	9.909051825	12.64479117	125.1705667
2	10.26537217	13.11937311	118.4562667
3	11.03095023	14.67287082	126.2384333
4	10.79719393	13.86178838	123.1913667
5	9.881762156	12.57979409	246.5830667
6	10.42995287	13.54390876	250.4598333
7	10.14158216	13.24682348	251.8286
8	11.2636732	14.98070261	251.5079333

La información obtenida por la experimentación se ha procesado en el Software Minitab® y se han obtenido las gráficas de Efectos principales y las de Interacción para la distancia promedio, para RMSE y para el tiempo de ejecución.

Para la Distancia Promedio, como se puede observar en la figura 6.9, en la gráfica de efectos principales la selección por ruleta obtiene mejores valores respecto al torneo determinista, la cruza de dos puntos obtiene también mejores valores respecto a SBX, y en el número de generaciones 300 obtiene mejores valores, en la gráfica de interacción se puede observar que la selección por ruleta con la cruza de dos puntos obtienen mejores valores, la selección por ruleta da mejores valores que el torneo determinista, y la cruza de dos puntos obtiene mejores valores para 300 generaciones.

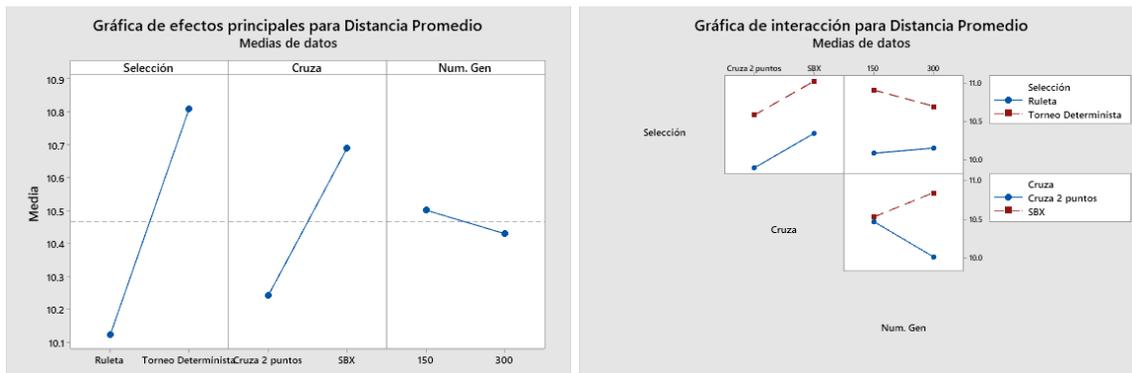


Figura 6.9. Graficas de Efectos Principales e Interacción para distancia promedio Altamira

Para RMSE, se puede observar un comportamiento similar al observado en las gráficas para Distancia Promedio.

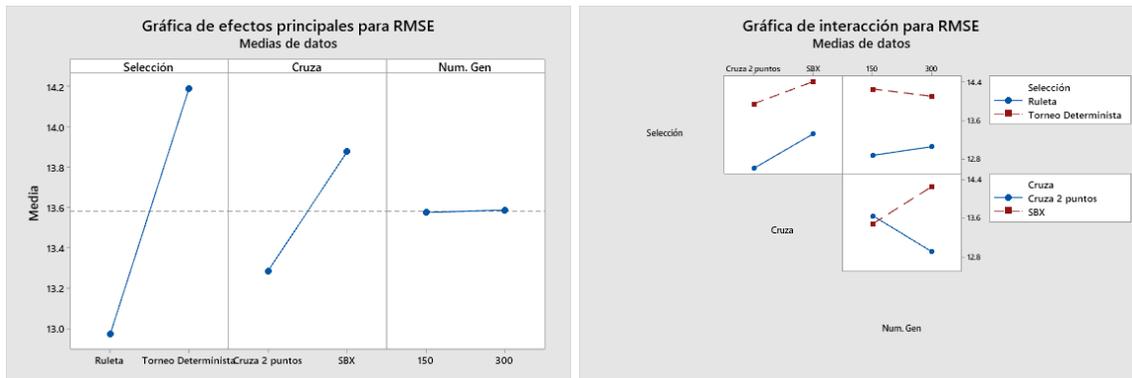


Figura 6.10. Graficas de Efectos Principales e Interacción para RMSE Altamira

Para Tiempo de ejecución se puede observar que no existe mucha diferencia entre los operadores genéticos, donde se observa diferencia es en el número de generaciones, 150 generaciones representan el menor tiempo y 300 generaciones el mayor tiempo de ejecución.

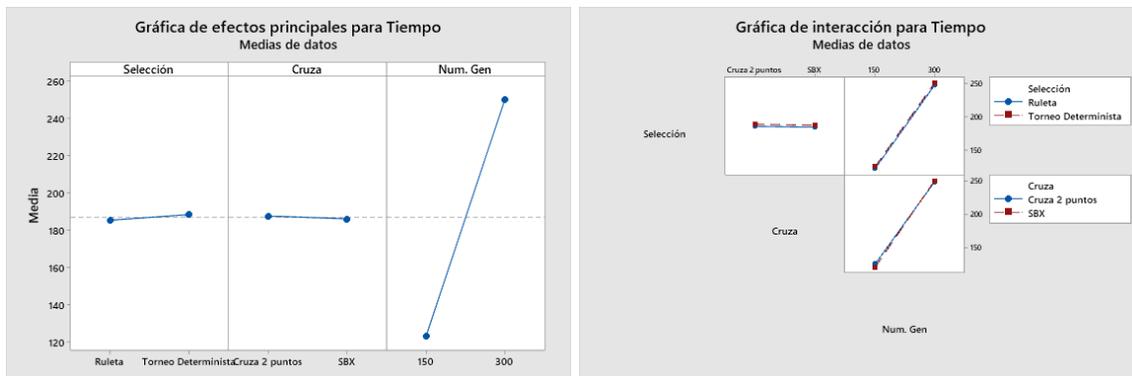


Figura 6.11. Graficas de Efectos Principales e Interacción para tiempo de ejecución Altamira

Para la instancia de Altamira, con la información observada en la tabla 6.11 y las gráficas de Efectos Principales y las de Interacción se puede establecer una configuración para el algoritmo genético como la siguiente:

- Operador de selección: Ruleta
- Operador de cruza: Cruza de dos puntos

- Numero de generaciones: 300

En la siguiente tabla se muestran los resultados de 30 experimentos para la mejor configuración seleccionada.

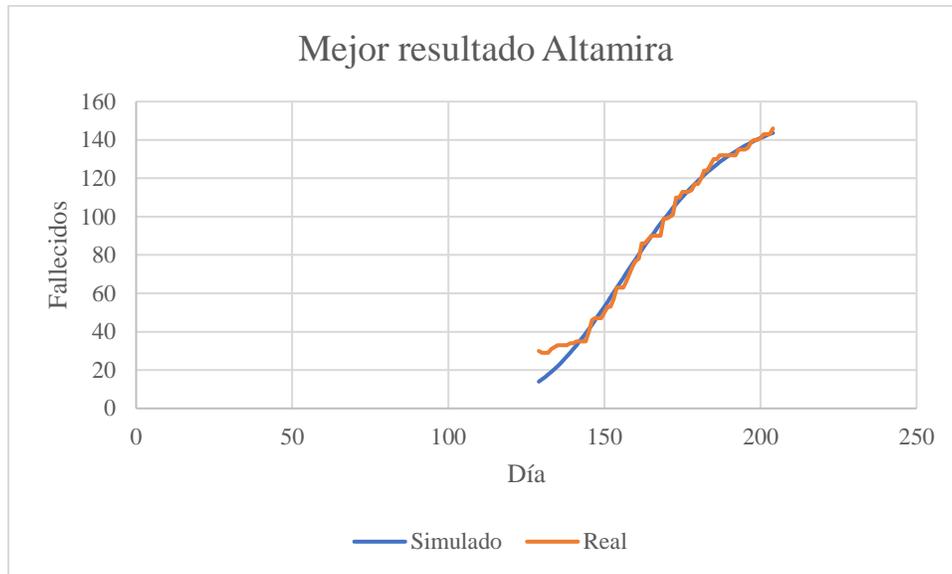
Tabla 6.12. Experimentos con la mejor configuración del algoritmo genético

Exp.	Distancia Promedio	RMSE	Tiempo (s)	Parámetros biológicos generados
1	10.59711717	12.95808842	247.728	{0.4034524386670042, 1.0635766466226975, 0.5388482602197034, 7.908401503228695, 18.20936048808382, 0.08641938902082777, 0.46327928921679}
2	10.16169703	11.46814724	243.71	{0.47274111152252896, 1.8453124269309753, 0.2743745567607097, 9.594117163322611, 23.81514292192616, 0.2226027894954596, 0.45327439711552797}
3	12.21910321	17.21722725	242.727	{0.2706082385853232, 1.4892517396088971, 0.32067855252875704, 14.36539254790428, 25.695412633697448, 0.9583433846802067, 0.4765702249282524}
4	3.226916959	4.56736499	243.682	{0.22280265476573285, 7.5044610186439975, 0.9993782379515516, 27.23256065330222, 18.004157575728986, 0.571425845082112, 0.7939682081443686}
5	10.95465626	13.61439881	249.026	{0.4981632029810353, 2.23463503013764, 0.6498748180699339, 26.264892203229774, 8.161106586962589, 0.7000752451183385, 0.46723506403252857}
6	10.06871631	11.25304452	262.33	{0.47234616903273163, 8.746217419732611, 0.12447827973659051, 26.758197377266324, 27.309998284271515, 0.12760845303185153, 0.4454359127939956}
7	3.855072358	5.015176525	243.294	{0.0016534958447752001, 22.902626228603538, 0.07079557769104354, 14.475830091296082, 1.7720474804197976, 0.28512296577531354, 0.7721610048552068}
8	10.43953107	12.70952936	242.39	{0.49602447123763804, 2.1887927091359534, 0.6975127505472638, 26.996630513372736, 23.19371396072709, 0.8815632315827485, 0.4587651375177039}
9	10.31938813	12.16424388	243.1	{0.4975708944163429, 5.618528981897329, 0.34111520477803337, 23.03312220281528, 21.718182510430964, 0.12546371932979386, 0.45622533485319205}
10	10.10692654	11.37044283	241.896	{0.4762732430622149, 7.360256790057559, 0.06310843240743745, 25.926241073416545, 20.884033366471908, 0.06608954813230274, 0.4482974678792008}
11	12.68976384	18.53727899	242.591	{0.3627924504965393, 1.0070843044160833, 0.18495719589672435, 14.4980871445603, 7.341853233475458, 0.20976528722428797, 0.4819399048488645}
12	3.187887648	4.745121601	244.174	{0.24926340875033778, 21.604704501466795, 0.9981090607099974, 15.500267977960272, 20.848181210951818, 0.3533854693677278, 0.7843026578558283}
13	10.71949995	13.23827299	247.09	{0.4583076592282116, 3.7755207344831954, 0.39571577829013155, 28.610169608381486, 16.175134506469682, 0.011426705875084684, 0.46430275896607853}
14	10.25023623	11.75157808	245.448	{0.4491480097821307, 1.3042786953537813, 0.15900178995905914, 17.374876947533807, 15.55501506147066, 0.148756597917362, 0.4563933147450226}
15	15.36789352	22.95094082	253.6	{0.48496085847645143, 2.6863503184197084, 0.8221442916287504, 16.36415336650726, 14.397657531479668, 0.13691998005965814, 0.490138880842597}
16	10.14632734	11.40582713	244.685	{0.498118198310112, 1.3320351995145427, 0.23425906728038787, 16.752388768512454, 14.318938445527698, 0.7485695358840729, 0.4533889805189949}
17	11.3684701	15.49501231	243.689	{0.48232590948025383, 2.4992506037235684, 0.5384413225999625, 12.0134014391016, 12.689770431218898, 0.6674306771638101, 0.4725240075101722}
18	3.497239958	5.248291686	244.509	{0.1831219207894714, 13.24880671653031, 0.9975899452787077, 20.764612762819464, 4.753111786982441, 0.783581082423299, 0.7674067770894692}
19	10.13875306	11.36816814	244.22	{0.4584024931488661, 1.0042457713065702, 0.08228453345842753, 17.797236403908936, 15.963419328489259, 0.7096828750368163, 0.4523852522603129}

20	12.21017791	17.35851901	242.575	{0.4724744181400786, 2.035357401688089, 0.07465815071854363, 14.198737373765539, 4.120716706562673, 0.5294825566655205, 0.47994233697213273}
21	10.23727975	11.73779723	244.971	{0.35001395327027196, 1.1582169125986392, 0.18619173721291812, 17.1390620903222, 24.280086190798, 0.14997866913301827, 0.45374518801882424}
22	10.15903024	11.44373672	242.887	{0.4552796897995927, 1.0495691425157894, 0.03512685233117708, 15.970178366955011, 24.006119277885325, 0.908377090978285, 0.4535879837884013}
23	10.8405435	13.58728502	246.596	{0.45183469712566005, 1.9444593311924008, 0.0172859446378227, 12.969779682092486, 7.7966497269209505, 0.553598914837344, 0.46817610340773974}
24	10.30962672	11.9565284	249.141	{0.4950132827999947, 2.849720756414703, 0.3908431059169165, 17.78033361518893, 16.531029777905545, 0.8846381332398565, 0.4573156135591662}
25	10.41945235	12.36984104	256.578	{0.36584060061854956, 1.5691557887896708, 0.03135591605090144, 21.244454531413837, 16.762388192058427, 0.1876980403727835, 0.4590473804198131}
26	3.999337915	5.539026359	250.015	{0.0683396806051517, 25.479924931658, 0.9494952703969044, 1.3776903432951326, 27.423266032296045, 0.4695781385890843, 0.7446957592573433}
27	13.94028751	20.68472219	248.559	{0.49184904529609746, 5.172308505601442, 0.4283178579948501, 11.770873124590986, 8.489331938506483, 0.021427586950732255, 0.485093588084641}
28	10.39800801	12.30751025	249.031	{0.48611597165816606, 1.6327416183725734, 0.06809144412485126, 10.937413457809562, 24.764598570927483, 0.80495858551956, 0.46087328631472174}
29	10.24456935	11.83386787	248.891	{0.4988056823496234, 3.632529147987506, 0.40349655197656437, 12.268728990590182, 22.55087782348698, 0.08451319088945256, 0.4550649657132657}
30	14.37935479	21.49683316	248.359	{0.4369443866328667, 2.182465736911164, 0.5919786533679601, 5.629219625803598, 10.156170387336033, 0.3398222418930738, 0.48797518869278467}

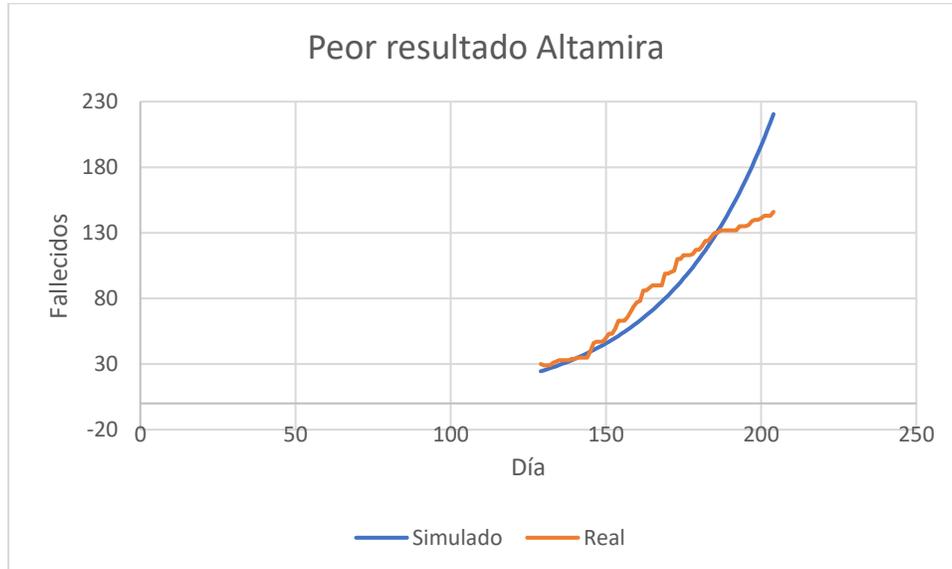
A continuación, se muestran las gráficas de la mejor y peor solución de la experimentación con la mejor configuración, los valores de los parámetros se han cargado al modelo SEIMR/R-S y se ha ejecutado una simulación, los resultados se comparan contra los reportados por secretaria de salud de Tamaulipas en el registro de fallecidos.

El experimento con la menor distancia promedio es el número 12, a continuación, se muestra la gráfica comparativa de la serie simulada contra el registro de Secretaría de Salud de Tamaulipas.



Gráfica 6.8. Mejor resultado instancia Altamira

El experimento con la mayor distancia promedio es el número 15, a continuación, se muestra la gráfica comparativa de la serie simulada contra el registro de Secretaría de Salud de Tamaulipas.



Gráfica 6.9. Peor resultado instancia Altamira

6.3. Experimentación con instancias generadas con información del registro histórico de Secretaría de Salud de Nacional.

En este apartado se presentan los experimentos realizados para la instancia de cada ciudad (región), si bien el simulador está configurado con treinta y seis segmentos, las instancias están limitadas a la información global de toda la región, es decir no se cuenta con el conteo de fallecidos detallado por región/segmento, por lo que el modelo integra toda la información de los segmentos en una sola región o ciudad. Cabe mencionar que se ha utilizado la mejor configuración del algoritmo genético recomendada en la sección anterior.

Para la instancia de Tampico se han realizado treinta experimentos, los resultados se presentan en la tabla 6.12, se puede observar que la menor distancia promedio se obtuvo en el experimento número 11.

Tabla 6.12. Resultados experimentación con instancia Tampico

Exp.	Dist. Promedio	MSE	RMSE	Tiempo (s)
1	42.00624803	2370.555719	48.68835301	196.447
2	48.57782298	3380.781799	58.14449071	193.126
3	44.32202878	2681.485554	51.78306242	195.076
4	62.13885562	5787.997901	76.07889261	192.111
5	86.61416222	11112.89402	105.4177121	182.92
6	41.77354912	2352.468206	48.5022495	186.203
7	44.75244481	2909.834622	53.94288296	183.118
8	57.33746866	5090.555652	71.34812998	183.027
9	46.79189314	3647.985782	60.39855778	185.312
10	75.96481382	8735.567962	93.46426034	188.543
11	41.69339239	2712.384987	52.08056247	184.871
12	84.57860134	10454.58506	102.2476653	183.111
13	64.32399586	6121.016393	78.23692474	183.723
14	59.08461754	4948.552565	70.34594917	183.279
15	68.85490891	7020.210225	83.7866948	204.524
16	86.66140007	11085.14843	105.2860315	204.03
17	55.95625967	5122.962361	71.57487241	204.484
18	53.36223257	4736.737537	68.82396049	217.445
19	42.20311515	2395.085075	48.9396064	226.305
20	49.78760981	3445.356176	58.69715646	262.694
21	71.7128008	7451.014791	86.31926083	284.913
22	47.9962502	3264.42765	57.13517	269.73
23	59.24261751	5496.298518	74.13702528	247.874
24	42.25918245	2414.465176	49.13720766	218.351
25	51.88966504	4427.161476	66.53691815	215.198
26	56.16272668	5294.395817	72.76259903	210.929
27	47.0075592	4303.207396	65.59883685	210.108
28	45.37920132	2914.063315	53.98206476	199.906
29	58.17829674	6264.167615	79.14649465	201.477

30	49.12846491	3603.960181	60.03299244	204.911
----	-------------	-------------	-------------	---------

Para la instancia de Madero se han realizado de igual manera treinta experimentos, los resultados se presentan en la tabla 6.13, se puede observar que la menor distancia promedio se obtuvo en el experimento número 2.

Tabla 6.13. Resultados experimentación con instancia Madero

Exp.	Dist. Promedio	MSE	RMSE	Tiempo (s)
1	45.56229924	4604.00908	67.8528488	194.473
2	17.94641544	466.920555	21.6083446	194.239
3	22.37188181	763.706905	27.6352475	191.904
4	23.51361333	969.97452	31.1444139	193.335
5	21.46321789	670.797089	25.8997508	194.622
6	29.26733855	1508.7796	38.8430123	183.482
7	54.32731176	4700.64955	68.5612832	183.843
8	55.30186347	5226.81806	72.2967362	183.628
9	26.78585243	1284.17746	35.8354218	184.243
10	32.65935573	1767.39077	42.0403469	183.769
11	18.42216356	496.672082	22.286141	182.849
12	26.31395944	1290.49045	35.923397	182.315
13	20.09495411	623.129187	24.9625557	210.914
14	23.7809453	1164.92302	34.1309686	225.659
15	55.43926544	5265.79368	72.5657886	247.949
16	35.84425864	2221.30959	47.1307712	217.315
17	24.14026101	848.897226	29.1358409	250.632
18	26.17950465	1174.04512	34.2643418	260.4
19	53.27269334	4594.07483	67.7796048	241
20	21.90590426	996.967753	31.5747962	235.717
21	19.75581031	582.354871	24.13203	211.201
22	23.0283704	725.018795	26.926173	206.351
23	28.9968008	1287.58593	35.8829476	200.701
24	42.77594631	2768.86957	52.6200491	204.58
25	18.32812976	430.914235	20.7584738	201.614
26	23.30482386	752.367711	27.4293221	203.3
27	28.10395739	1079.23028	32.8516404	204.622
28	23.43748532	862.964651	29.37626	203.558
29	24.90974476	974.455306	31.2162667	206.803
30	21.99567826	1004.72346	31.697373	215.574

Finalmente, para la instancia de Altamira se han realizado de igual manera treinta experimentos, los resultados se presentan en la tabla 6.14, se puede observar que la menor distancia promedio se obtuvo en el experimento número 19.

Tabla 6.14. Resultados experimentación con instancia Altamira

Exp.	Dist. Promedio	MSE	RMSE	Tiempo (s)
------	----------------	-----	------	------------

1	15.10753666	366.165757	19.1354581	194.303
2	12.21138663	211.745175	14.5514664	194.229
3	14.2990951	282.348554	16.8032305	195.03
4	58.5163438	5473.57926	73.9836419	214.672
5	23.33179883	818.21701	28.6044928	183.495
6	14.98675933	311.561433	17.6511029	187.379
7	13.41101433	245.097642	15.6555946	187.197
8	20.99345027	646.105134	25.4185982	185.324
9	33.52147462	1738.41817	41.6943421	190.175
10	13.16215153	266.767584	16.3330213	187.902
11	15.64448668	340.495046	18.4525079	188.523
12	31.52497925	2096.96049	45.7925812	188.303
13	14.28167224	364.296569	19.0865547	202.679
14	58.91761947	5729.39633	75.6927759	200.068
15	33.28256475	1733.99568	41.6412738	205.624
16	27.37359695	1098.07312	33.1371863	214.824
17	21.51703275	747.290961	27.3366231	216.132
18	12.3971424	243.735154	15.6120195	211.029
19	11.63581771	261.37584	16.1671222	216.523
20	21.68725471	667.610225	25.8381544	214.228
21	12.33379471	228.696972	15.1227303	211.548
22	49.35554742	3689.42473	60.7406349	212.478
23	28.02583244	1156.79083	34.0116279	211.463
24	24.02587136	874.236779	29.5674953	202.726
25	13.64909577	254.530255	15.9540043	202.856
26	25.49929583	1129.87095	33.613553	206.816
27	23.59690214	1031.9596	32.124128	202.803
28	19.74972566	545.823103	23.3628573	203.978
29	18.73095142	499.057589	22.3395969	204.831
30	25.16046691	909.331368	30.1551217	204.572

Se promediaron los resultados de las tres instancias, los promedios de los resultados se muestran en la tabla 6.15.

Tabla 6.15. Promedios de los resultados de la experimentación para cada instancia

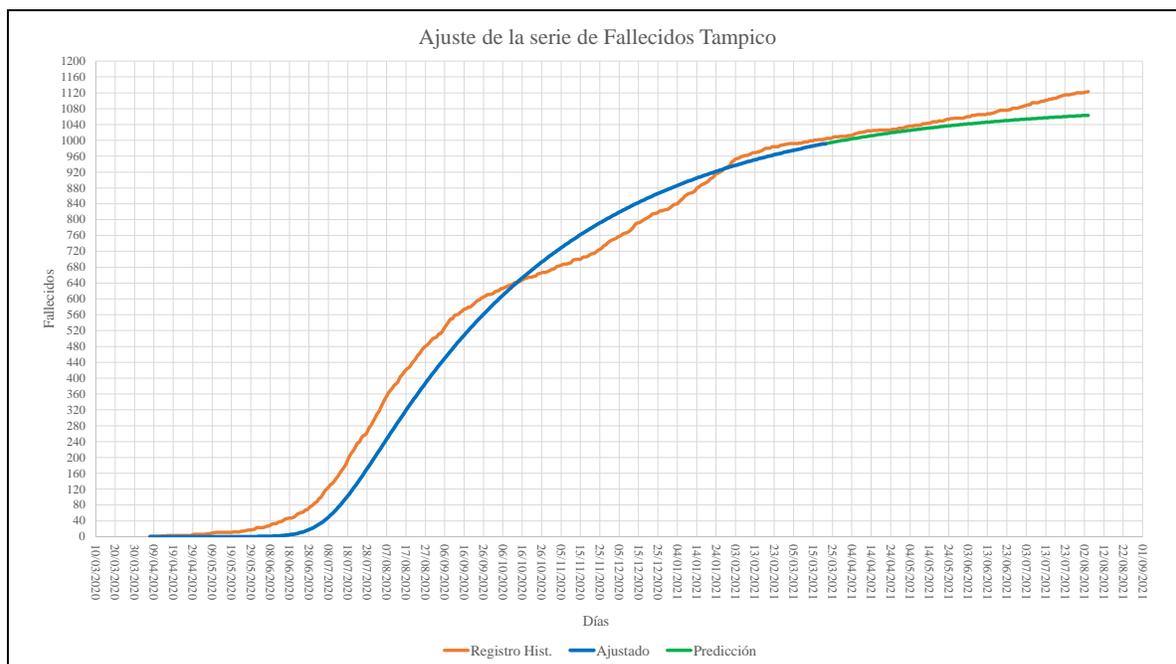
Instancia	Dist. Promedio	MSE	RMSE	Tiempo (s)
Tampico	56.19140618	5051.51093	69.0858862	206.791533
Madero	29.64099355	1703.60038	38.1454049	206.6864
Altamira	23.59768872	1132.09858	29.5193166	201.390333

Se han tomado los mejores resultados de cada instancia, los cuales se presentan en la tabla 6.16, se ha graficado y comparado los resultados de la simulación contra el registro histórico de fallecidos por COVID-19, para hacer el ajuste de parámetros se utilizaron los registros del periodo que comprende desde el 7 de abril de 2020 hasta el 22 de marzo de 2021, y del 23 de marzo de 2021 al 4 de agosto de 2021 para comparar contra la predicción del simulador.

Tabla 6.16. Mejores resultados de la experimentación para cada instancia

Instancia	No. Exp.	Dist. Promedio	RMSE	Tiempo (s)	Parámetros
Tampico	11	41.69339239	52.0805625	184.871	0.3206476592551108, 110.61026005139624, 0.9938443910899556, 105.48198541608788, 102.74760041820997, 0.9949664930663675, 0.9992765396620285
Madero	2	17.94641544	21.6083446	194.239	0.08828160867485259, 83.32110061237915, 0.9862236370568258, 77.46817986132143, 92.59583878537237, 0.05221444971426144, 0.99875630028885
Altamira	19	11.63581771	16.1671222	216.523	0.07875905605563933, 119.99728555309922, 0.9856555956650453, 126.89662204872229, 75.73362455507784, 0.6099603624785338, 0.9958245221752453

La gráfica para Tampico se presenta a continuación, la línea color naranja representa el registro histórico de fallecidos por COVID-19, la línea azul el periodo de ajuste del simulador, y la línea de color verde el periodo de predicción de fallecidos. Para el periodo de predicción se puede observar que comprende del día 23 de marzo hasta el 24 de mayo de 2021 las líneas de predicción y registro histórico están muy cercanas.



Gráfica 6.10. Resultados de simulación para Tampico

Se han tomado los resultados de solo un mes de predicción y se muestran en la tabla 6.16, posteriormente en la tabla 6.17 se presentan una tabla con los promedios y la raíz del error cuadrático medio RMSE.

Tabla 6.16. Resultados de predicción de fallecidos por el modelo a un mes para Tampico

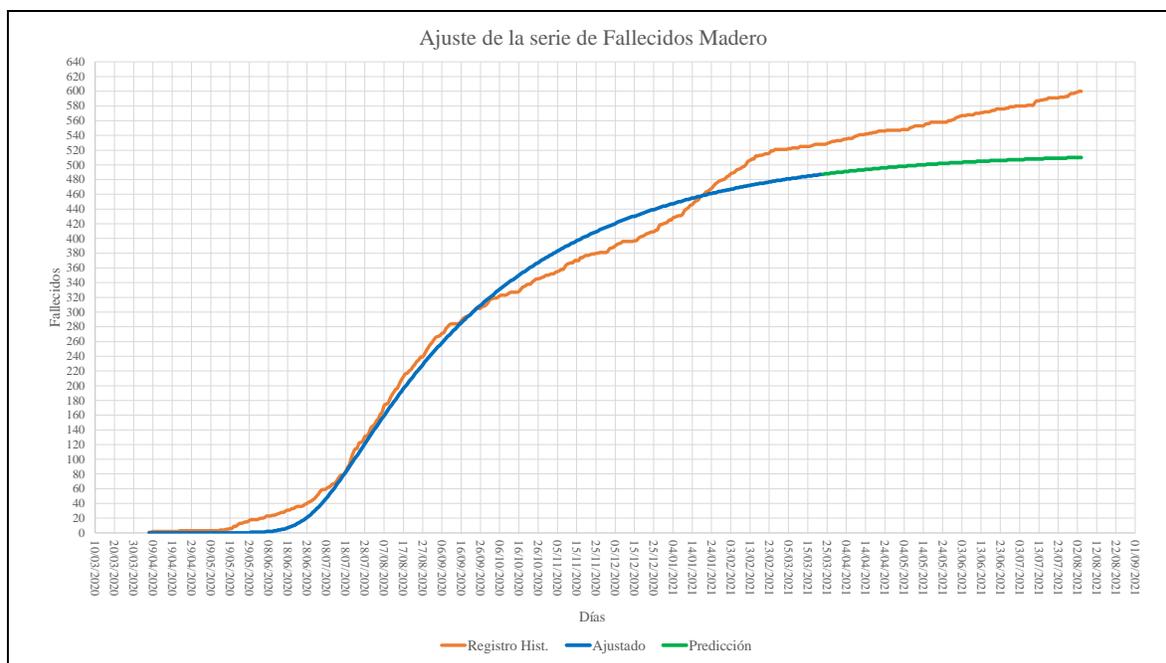
Dia	Predicción	Registro Hist.	Distancia
24/03/2021	994	1005	11
25/03/2021	995	1007	12
26/03/2021	996	1009	13
27/03/2021	997	1009	12
28/03/2021	998	1009	11
29/03/2021	999	1010	11
30/03/2021	1000	1010	10
31/03/2021	1000	1010	10
01/04/2021	1001	1010	9
02/04/2021	1002	1012	10
03/04/2021	1003	1012	9
04/04/2021	1004	1013	9
05/04/2021	1005	1015	10
06/04/2021	1005	1017	12
07/04/2021	1006	1018	12
08/04/2021	1007	1020	13
09/04/2021	1008	1020	12
10/04/2021	1009	1021	12
11/04/2021	1009	1022	13
12/04/2021	1010	1024	14
13/04/2021	1011	1024	13
14/04/2021	1012	1024	12
15/04/2021	1012	1025	13
16/04/2021	1013	1025	12
17/04/2021	1014	1025	11
18/04/2021	1015	1026	11
19/04/2021	1015	1026	11
20/04/2021	1016	1026	10
21/04/2021	1017	1026	9
22/04/2021	1017	1026	9
23/04/2021	1018	1026	8

Tabla 6.17. Promedio de los resultados y RMSE para Tampico

Promedio Predicción	Promedio Registro Hist.	Promedio Dist.	RMSE
1006.70968	1017.80645	11.0967742	11.1990783

De igual forma, la gráfica para Madero se presenta a continuación, la línea color naranja representa el registro histórico de fallecidos por COVID-19, la línea azul el periodo de ajuste

del simulador, y la línea de color verde el periodo de predicción de fallecidos. Para el periodo de predicción se puede observar que las líneas de predicción y registro histórico están muy separadas.



Gráfica 6.11. Resultados de simulación para Madero

Se han tomado los resultados de solo un mes de predicción y se muestran en la tabla 6.18, posteriormente en la tabla 6.19 se presentan una tabla con los promedios y la raíz del error cuadrático medio RMSE.

Tabla 6.18. Resultados de predicción de fallecidos por el modelo a un mes para Madero

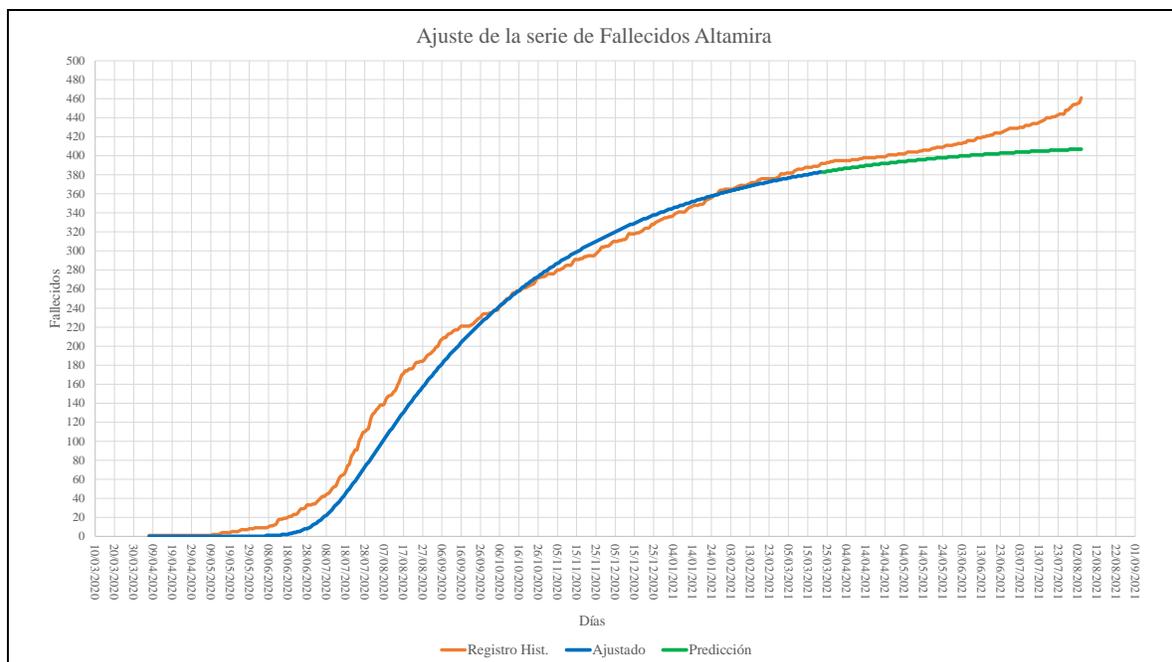
Día	Predicción	Registro Hist.	Distancia
24/03/2021	488	528	40
25/03/2021	488	529	41
26/03/2021	488	530	42
27/03/2021	489	531	42
28/03/2021	489	532	43
29/03/2021	489	532	43
30/03/2021	490	533	43
31/03/2021	490	533	43
01/04/2021	490	533	43
02/04/2021	490	534	44
03/04/2021	491	535	44
04/04/2021	491	535	44
05/04/2021	491	536	45
06/04/2021	492	536	44
07/04/2021	492	536	44
08/04/2021	492	538	46

09/04/2021	492	539	47
10/04/2021	493	540	47
11/04/2021	493	541	48
12/04/2021	493	541	48
13/04/2021	493	541	48
14/04/2021	494	542	48
15/04/2021	494	542	48
16/04/2021	494	543	49
17/04/2021	494	543	49
18/04/2021	495	544	49
19/04/2021	495	544	49
20/04/2021	495	545	50
21/04/2021	495	546	51
22/04/2021	496	546	50
23/04/2021	496	546	50

Tabla 6.19. Promedio de los resultados y RMSE para Madero

Promedio Predicción	Promedio Registro Hist.	Promedio Dist.	RMSE
492	537.870968	45.8709677	45.9726426

Por último, la gráfica para Altamira se presenta a continuación, la línea color naranja representa el registro histórico de fallecidos por COVID-19, la línea azul el periodo de ajuste del simulador, y la línea de color verde el periodo de predicción de fallecidos. Para el periodo de predicción se puede observar que comprende del día 23 de marzo hasta el 24 de mayo de 2021 las líneas de predicción y registro histórico están muy cercanas.



Gráfica 6.12. Resultados de simulación para Altamira

Se han tomado los resultados de solo un mes de predicción y se muestran en la tabla 6.20, posteriormente en la tabla 6.21 se presentan una tabla con los promedios y la raíz del error cuadrático medio RMSE.

Tabla 6.18. Resultados de predicción de fallecidos por el modelo a un mes para Altamira

Dia	Predicción	Registro Hist.	Distancia
24/03/2021	383	392	9
25/03/2021	384	393	9
26/03/2021	384	393	9
27/03/2021	384	394	10
28/03/2021	385	394	9
29/03/2021	385	395	10
30/03/2021	385	395	10
31/03/2021	386	395	9
01/04/2021	386	395	9
02/04/2021	386	395	9
03/04/2021	387	395	8
04/04/2021	387	395	8
05/04/2021	387	395	8
06/04/2021	387	395	8
07/04/2021	388	396	8
08/04/2021	388	396	8
09/04/2021	388	396	8
10/04/2021	388	396	8
11/04/2021	389	397	8
12/04/2021	389	397	8
13/04/2021	389	398	9
14/04/2021	390	398	8
15/04/2021	390	398	8
16/04/2021	390	398	8
17/04/2021	390	398	8
18/04/2021	391	398	7
19/04/2021	391	398	7
20/04/2021	391	399	8
21/04/2021	391	399	8
22/04/2021	392	399	7
23/04/2021	392	399	7

Tabla 6.19. Promedio de los resultados y RMSE para Altamira

Promedio Predicción	Promedio Registro Hist.	Promedio Dist.	RMSE
387.83871	396.16129	8.32258065	8.3627438

Capítulo 7. Conclusiones y trabajos futuros

7.1. Cumplimientos de objetivos

Los resultados de este proyecto de tesis cumplieron con todos los objetivos planteados inicialmente, en esta sección se describen las contribuciones principales, así como los productos científicos y los trabajos futuros que se pueden realizar a partir de este trabajo de investigación.

7.1.1. Objetivo general

Desarrollar un método para configurar automáticamente los parámetros biológicos de un simulador del modelo SEIMR/R-S, de tal manera que la serie de muertos generada se ajuste al registro histórico de muertos realizado desde el inicio de la pandemia.

7.1.2. Objetivos específicos

- Elaborar la propuesta.
- Implementar un simulador del modelo. (Ver capítulo 4)
- Diseñar e implementar un Algoritmo Genético para ajustar automáticamente los parámetros biológicos del modelo SEIMR/R-S que afectan a la serie de muertos. (Ver capítulo 5)
- Evaluación experimental del simulador con ajuste automático de parámetros. (Ver capítulo 6)

7.2. Contribuciones principales

1. Un Algoritmo Genético para ajustar automáticamente los parámetros biológicos del modelo SEIMR/R-S que afectan a la serie de muertos.
2. Apoyo en la comprobación de la teoría del modelo epidemiológico SEIMR/R-S a través de la revisión de las ecuaciones del modelo y con la implementación incremental de las mismas en el simulador.

3. Un simulador que implementa los modelos epidemiológicos SEI3RD y SEIMR/R-S completamente configurable y multiplataforma, que permite la fácil manipulación de parámetros biológicos y muestra los resultados de la simulación en forma gráfica.
4. Módulo de simulador SEIMR/R-S que funciona como parte del Backend de la aplicación web del proyecto “Modelos matemáticos de soporte a la toma de decisiones para la reducción del impacto socio-económico de la epidemia de COVID-19” capaz de comunicarse con otros módulos de la aplicación web.
5. Elaboración y configuración del caso de estudio para Tampico, Madero y Altamira en el simulador SEIMR/R-S y aplicación web del proyecto “Modelos matemáticos de soporte a la toma de decisiones para la reducción del impacto socio-económico de la epidemia de COVID-19”

7.3. Publicaciones

Los resultados parciales de este proyecto de investigación se han publicado en foros científicos, a continuación, se listan las publicaciones:

- “*A multi-objective optimization method to estimate parameters of the COVID SEIMR/R-S model with a case study of Mexico*” en el NEO 2021, Alejandro Castellanos-Alvarez, Laura Cruz, Hector Joaquin Fraire Huacuja, Claudia Gomez, José Alfredo Brambila-Hernández, Nelson Rangel-Valdez and Jesús M. Velásquez-Bermúdez [Castellanos-Alvarez et al, 2021].

También se listan las publicaciones no relacionadas con este trabajo de investigación donde se ha participado:

- “*Optimization of Many Objectives with Intervals Applying the MOEA/D Algorithm*” en revista Polibits 2020, Lorena R. Rosas-Solórzano, Claudia G. Gómez-Santillán, Nelson Rangel-Valdez, Laura Cruz-Reyes, Fausto A. Balderas-Jaramillo and José A. Brambila-Hernández [Rosas-Solórzano et al, 2020].
- “*A Method for Integration of Preferences to a Multi-Objective Evolutionary Algorithm Using Ordinal Multi-Criteria Classification*” en Mathematical and Computational Applications 2021, Alejandro Castellanos-Alvarez, Laura Cruz-Reyes, Eduardo Fernandez, Nelson Rangel-Valdez, Claudia Gómez-Santillán, Hector Fraire and José Alfredo Brambila-Hernández [Castellanos-Alvarez et al, 2021].

7.4 Trabajos Futuros

Se han identificado varios trabajos futuros con los que se puede continuar este trabajo de investigación, los cuales se listan a continuación.

- Aplicar un algoritmo multiobjetivo para ajustar los parámetros de las series de muertos (ED), recuperados (RE), infectados moderados (I1), infectados severos (I2) e infectados críticos (I3) del modelo SEIMR/R-S.
- Diseñar un generador automático de intervalos de variación para los parámetros del modelo SEIMR/R-S.
- Diseñar un método para identificar a los grupos de mayor riesgo, por edad, por estrato económico y por región, y utilizar como parte de la política de control del modelo.

Anexo A: Construcción de la Base de Datos para el Simulador del Modelo SEIMR/R-S

En esta sección se describe parte del proceso de la construcción de la información con la que se llenó la base de datos para el simulador del modelo SEIMR/R-S, cabe señalar que esta información es producto del esfuerzo de todo el equipo de trabajo del proyecto “Modelos matemáticos de soporte a la toma de decisiones para la reducción del impacto socio-económico de la epidemia de COVID-19”.

Zona Metropolitana de Tampico

La zona metropolitana de Tampico está conformada por los municipios de Tampico, Ciudad Madero y Altamira en el estado de Tamaulipas y los municipios de Pueblo Viejo y Panuco en el estado de Veracruz. En este documento solo se trabajará con la información de las ciudades de la zona metropolitana de Tampico que pertenecen al estado de Tamaulipas.

Tampico

Es una ciudad y puerto de México, ubicada al sur de estado de Tamaulipas, en la región Huasteca. Es una de las ciudades con mayor desarrollo económico del estado y una de las más importantes de la región, cuenta con una población estimada de 327,308 habitantes según el censo del INEGI de 2015 [INEGI, 2020].

Madero

Ciudad Madero es una ciudad costera en el golfo de México, localizada en el sureste del estado de Tamaulipas, es el séptimo municipio más poblado en el estado, con una población estimada de 216,664 habitantes, con un área de 46.6 km². Forma parte de la zona metropolitana de Tampico. Dentro del municipio se encuentra la refinería Francisco I.

Madero, la cual posiciona a la ciudad como uno de los centros de refinación de petróleo más importantes en el país.

Altamira

Altamira es un municipio del estado de Tamaulipas, en México.

Este municipio está localizado cerca de las ciudades de Tampico y Ciudad Madero, en el golfo de México, en el sur del estado de Tamaulipas. En el 2015, contaba con una población de 246,549 habitantes. Es el primer puerto a nivel nacional en el manejo de fluidos petroquímicos, y el cuarto en el manejo de carga. La cabecera del municipio es la ciudad de Altamira. Hacia el norte se localiza Aldama.

Población por edad

Se han obtenido de las páginas del INEGI [INEGI, 2020] y del CONEVAL [CONEVAL, 2020] los porcentajes de hombres y mujeres de la Tampico, Madero y Altamira por edad, los rangos de edad están divididos en dieciocho grupos como se mostrará a continuación.

Porcentaje de hombres por ciudad y grupo de edad:

Tabla A.1. Porcentaje de hombres en la zona metropolitana de Tampico

Porcentaje Hombres			
Edad	Altamira	Madero	Tampico
0 a 4 años	4.5	3.3	3.4
5 a 9 años	4.9	4	3.6
10 a 14 años	4.9	4.3	3.9
15 a 19 años	4.6	4	3.9
20 a 24 años	4.2	4.1	4.5
25 a 29 años	3.8	3.5	3.5
30 a 34 años	3.7	3.4	3.3
35 a 39 años	3.8	3.3	3
40 a 44 años	3.4	3.3	3.6
45 a 49 años	3.1	2.9	3.3
50 a 54 años	2.7	3.9	3.2
55 a 59 años	2	2.3	2.3
60 a 64 años	1.5	2.1	2.3
65 a 69 años	0.8	1.6	1.4
70 a 74 años	0.6	1	1.2
75 a 79 años	0.4	0.8	0.8
80 a 84 años	0.3	0.4	0.4
85 años y más	0.2	0.4	0.3

Porcentaje de mujeres por ciudad y grupo de edad:

Tabla A.2. Porcentaje de mujeres en la zona metropolitana de Tampico

Porcentaje Mujeres			
Edad	Altamira	Madero	Tampico
0 a 4 años	4.6	3.3	3
5 a 9 años	5	3.6	3.3
10 a 14 años	4.8	4.1	3.5
15 a 19 años	4.2	3.9	4.3
20 a 24 años	4.3	4.4	3.8
25 a 29 años	3.8	3.9	3.6
30 a 34 años	4.3	3.4	3.7
35 a 39 años	4.2	3.9	3.7
40 a 44 años	3.9	4.1	4.1
45 a 49 años	3.2	3.7	3.7
50 a 54 años	2.8	3.3	3.6
55 a 59 años	1.9	3.2	3.1
60 a 64 años	1.3	2.2	2.6
65 a 69 años	0.9	1.9	2.1
70 a 74 años	0.6	1.3	1.3
75 a 79 años	0.4	0.9	1
80 a 84 años	0.2	0.7	0.9
85 años y más	0.2	0.6	0.6

Porcentajes totales por ciudad y grupo de edad

Los porcentajes totales por ciudad y edad se obtienen sumando los porcentajes de mujeres y hombres en la misma ciudad y grupo de edad como se muestra en la ecuación (A.1).

$$PorcentajesTotales_{ciudad,edad} = PorcentajeHombres_{ciudad,edad} + PorcentajeMujeres_{ciudad,edad} \quad (A.1)$$

La tabla con la suma de los porcentajes de muestra a continuación:

Tabla A.3. Suma de porcentajes de hombres y mujeres en la zona metropolitana de Tampico

Porcentajes Totales			
Edad	Altamira	Madero	Tampico
0 a 4 años	9.1	6.6	6.4
5 a 9 años	9.9	7.6	6.9
10 a 14 años	9.7	8.4	7.4
15 a 19 años	8.8	7.9	8.2

20 a 24 años	8.5	8.3	8.3
25 a 29 años	7.6	7.2	7.1
30 a 34 años	8	6.6	7
35 a 39 años	8	7.2	6.9
40 a 44 años	7.3	7.4	7.7
45 a 49 años	6.3	6.4	7
50 a 54 años	5.5	7.2	6.8
55 a 59 años	3.9	5.5	5.4
60 a 64 años	2.8	4.1	4.9
65 a 69 años	1.7	3.5	3.5
70 a 74 años	1.2	2.3	2.5
75 a 79 años	0.8	1.7	1.8
80 a 84 años	0.5	1.1	1.3
85 años y más	0.4	1	0.9

Estratos socio-económicos

Para este caso se han considerado únicamente dos estratos socio-económicos: pobres y no pobres, los cuales llamaremos Estrato 1 (E1) y Estrato 2 (E2) respectivamente. Los porcentajes de población por ciudad pertenecientes a cada estrato se muestran en la tabla A.4.

Tabla A.4. Porcentaje de población por estrato y ciudad

Porcentaje de población por estrato			
Estrato	Altamira	Madero	Tampico
Pobre (E1)	52.5	37.5	38.3
No Pobre (E2)	47.5	62.5	61.7

En la tabla A.5 muestra el número de habitantes de cada estrato por ciudad.

Tabla A.5. Número de personas por estrato y ciudad

Población por estrato			
Estrato	Altamira	Madero	Tampico
Pobre (E1)	129,438	81,249	125,359
No Pobre (E2)	117,111	135,415	201,949
Total	246,549	216,664	327,308

Población por edad

Para obtener el número de habitantes por ciudad para cada grupo de edad, se multiplican los porcentajes totales por ciudad y grupo de edad (tabla A.3) por el número de habitantes total de cada ciudad (tabla A.5), la ecuación (A.2) muestra de una forma más clara como se realiza el cálculo.

$$poblacion_{edad,ciudad} = \left(\frac{porcentajesTotales_{edad,ciudad}}{100} \right) \times poblacionCiudad \quad (A.2)$$

A continuación, se muestra el número de habitantes por ciudad y grupo de edad calculado a partir de los porcentajes de población de la tabla A.3.

Tabla A.6. Número de habitantes por ciudad y edad

Población por edad			
Edad	Altamira	Madero	Tampico
0 a 4 años	22436	14299	20948
5 a 9 años	24408	16467	22584
10 a 14 años	23916	18200	24221
15 a 19 años	21697	17117	26839
20 a 24 años	20956	17983	27167
25 a 29 años	18737	15600	23238
30 a 34 años	19724	14299	22911
35 a 39 años	19724	15600	22584
40 a 44 años	17998	16033	25203
45 a 49 años	15533	13867	22911
50 a 54 años	13560	15600	22257
55 a 59 años	9615	11917	17674
60 a 64 años	6904	8881	16039
65 a 69 años	4191	7584	11457
70 a 74 años	2958	4984	8183
75 a 79 años	1973	3683	5891
80 a 84 años	1233	2384	4255
85 años y más	986	2166	2946

Población por estrato y grupo de edad

El cálculo de la población por estrato y grupo de edad se realiza multiplicando los porcentajes totales de población (tabla A.3) por ciudad y grupo de edad dividido entre cien por el porcentaje de estrato (tabla A.4) por ciudad dividido entre cien, y el resultado de esto multiplicado por la población de la ciudad. Esto se puede ver más claramente en la ecuación (A.3).

$$poblacion_{estrato,edad,ciudad} = \left(\frac{porcentajesTotales_{edad,ciudad}}{100} \right) \times \left(\frac{porcentajeEstrato_{estrato,ciudad}}{100} \right) \times poblacionCiudad \quad (A.3)$$

En la tabla A.7 se muestra como resultado de las operaciones anteriores el número de habitantes por ciudad y grupo de edad para el Estrato 1 (Población pobre).

Tabla A.7. Número de habitantes por ciudad y grupo de edad Estrato 1

Población Estrato 1			
Edad	Altamira	Madero	Tampico
0 a 4 años	11779	5362	8023
5 a 9 años	12814	6175	8650
10 a 14 años	12556	6825	9277
15 a 19 años	11391	6419	10279
20 a 24 años	11002	6744	10405
25 a 29 años	9837	5850	8900
30 a 34 años	10355	5362	8775
35 a 39 años	10355	5850	8650
40 a 44 años	9449	6012	9653
45 a 49 años	8155	5200	8775
50 a 54 años	7119	5850	8524
55 a 59 años	5048	4469	6769
60 a 64 años	3625	3330	6143
65 a 69 años	2200	2844	4388
70 a 74 años	1553	1869	3134
75 a 79 años	1036	1381	2256
80 a 84 años	647	894	1630
85 años y más	518	812	1128

En la tabla A.8 se muestra el número de habitantes por ciudad y grupo de edad para el Estrato 2 (Población no pobre).

Tabla A.8. Número de habitantes por ciudad y grupo de edad Estrato 2

Población Estrato 2			
Edad	Altamira	Madero	Tampico
0 a 4 años	10657	8937	12925
5 a 9 años	11594	10292	13934
10 a 14 años	11360	11375	14944
15 a 19 años	10306	10698	16560
20 a 24 años	9954	11239	16762
25 a 29 años	8900	9750	14338
30 a 34 años	9369	8937	14136
35 a 39 años	9369	9750	13934
40 a 44 años	8549	10021	15550
45 a 49 años	7378	8667	14136
50 a 54 años	6441	9750	13733
55 a 59 años	4567	7448	10905
60 a 64 años	3279	5551	9896

65 a 69 años	1991	4740	7069
70 a 74 años	1405	3115	5049
75 a 79 años	937	2302	3635
80 a 84 años	586	1490	2625
85 años y más	468	1354	1818

Índice de mortalidad

Debido a la falta de información, se ha tomado el índice de mortalidad para México del año 2014 del trabajo de Guadalupe Soto Estrada [Soto-Estrada, G. et al, 2016], en él se muestra la siguiente tasa de mortalidad por cada 1000 habitantes, por lo que se ha dividido el valor de la tasa por grupo de edad entre mil, se muestra a continuación la información en la tabla A.9.

Tabla A.9. Tasa de mortalidad del año 2014 por cada 1000 habitantes

Tasa por cada 1000 habitantes		
Edad	Tasa	Tasa/1000
<1	16.6	0.0166
1 a 4	0.6	0.0006
5 a 9	0.3	0.0003
10 a 14	0.3	0.0003
15 a 19	0.7	0.0007
20 a 24	1	0.001
25 a 29	1.3	0.0013
30 a 34	1.6	0.0016
35 a 39	2.1	0.0021
40 a 44	2.8	0.0028
45 a 49	4.1	0.0041
50 a 54	6	0.006
55 a 60	8.9	0.0089
60 a 64	13.4	0.0134
65 a 69	19.4	0.0194
70 a 74	28.4	0.0284
75 a 80	43.5	0.0435
80 a 84	63.4	0.0634
85 y mas	135	0.135

En el boletín estadístico sobre el exceso de mortalidad por todas las causas durante la emergencia por COVID-19 [Secretaría de Salud, 2021] se menciona que el grupo de edad más afectado es del 45 a 64 años, con un exceso de mortalidad del 62.6%, le sigue el grupo de 65 años y más con un 33% y finalmente mencionan que el grupo de 20 a 44 años tiene un

18.4% de exceso de mortalidad. En el boletín también mencionan que en el grupo de personas menores de 20 años no se ha registrado un exceso de mortalidad. Con esta información se ha construido la tabla A.10.

Tabla A.10. Exceso de mortalidad por grupo de edad

Exceso de mortalidad	
Edad	Porcentaje
0 a 19	0
20 a 44	18.4
45 a 64	62.6
65 y mas	33

Para obtener el índice de mortalidad se le ha añadido a la tasa de mortalidad de la tabla 9 el porcentaje correspondiente de exceso de mortalidad por grupo de edad, el resultado se muestra en la tabla A.11.

Tabla A.11. Índice de mortalidad

Tasa por cada 1000 habitantes			
Edad	Tasa	Tasa/1000	Índice Mortalidad
<1	16.6	0.0166	0.0166
1 a 4	0.6	0.0006	0.0006
5 a 9	0.3	0.0003	0.0003
10 a 14	0.3	0.0003	0.0003
15 a 19	0.7	0.0007	0.0007
20 a 24	1	0.001	0.001184
25 a 29	1.3	0.0013	0.0015392
30 a 34	1.6	0.0016	0.0018944
35 a 39	2.1	0.0021	0.0024864
40 a 44	2.8	0.0028	0.0033152
45 a 49	4.1	0.0041	0.0066666
50 a 54	6	0.006	0.009756
55 a 60	8.9	0.0089	0.0144714
60 a 64	13.4	0.0134	0.0217884
65 a 69	19.4	0.0194	0.025802
70 a 74	28.4	0.0284	0.037772
75 a 80	43.5	0.0435	0.057855
80 a 84	63.4	0.0634	0.084322
85 y mas	135	0.135	0.17955

Índice de morbilidad

Para calcular el índice de morbilidad general se ha utilizado el anuario de morbilidad de 1989 a 2019 Nacional de México [Gobierno de México, 2021], se tomó la población general por grupo de edad y se obtuvo la fracción de población dividiendo el número de personas por grupo de edad entre el número de habitantes de la república mexicana, el cual es de 127.6 millones de personas.

Tabla A.12. Índice de morbilidad

Índice de Morbilidad		
Edad	Personas	Fracción
<1	2152703	0.01687071
1 a 4	8739233	0.06848929
5 a 9	11063085	0.08670129
10 a 14	11143813	0.08733396
15 a 19	11060233	0.08667894
20 a 24	10860364	0.08511257
25 a 44	37490670	0.29381403
45 a 49	7734457	0.06061487
50 a 59	12397632	0.09716013
60 a 64	4523043	0.03544705
65+	9412548	0.07376605

Condiciones Iniciales

Las condiciones iniciales, son los casos presentados en el primer día de la pandemia en Tampico, Madero y Altamira, se toma como día inicial para las tres ciudades el 24 de marzo, ya que es el día en el que se registró el primer caso del último municipio.

Tampico, día 16 de marzo de 2020 se confirma como positivo [Secretaría de Salud Tamaulipas, 2020] a una persona del sexo masculino de 55 años, residente del puerto de Tampico y originario de Malasia.

Cd. Madero, el día 21 de marzo de 2020 se confirma como positivo [Gobierno de Tamaulipas, 2020] a una persona del sexo femenino de 33 años residente de Cd. Madero y procedente de un viaje de Francia, Bélgica y Holanda. El día 23 se confirma a una persona del sexo masculino de 29 años [Expreso, 2020].

Altamira, se tiene una persona confirmada como positiva el día 24 de marzo [IEST ANÁHUAC, 2020], pero no se tienen datos de sexo y edad.

Movilidad entre ciudades

El Dr. Nelson Rangel Valdez ha generado las siguientes tablas de movilidad (tablas A.13 a la A.15).

Tabla A.13. Movilidad desde Tampico

Tampico a Madero, Altamira		
Rango de edad	Porcentaje de población que se mueve	Tiempo que pasa en la región
0 a 4 años	0	0
5 a 9 años	0	0
10 a 14 años	0	0
15 a 19 años	1180	0.310466667
20 a 24 años	1193	0.310466667
25 a 29 años	1034	0.310466667
30 a 34 años	1003	0.310466667
35 a 39 años	1028	0.310466667
40 a 44 años	1010	0.310466667
45 a 49 años	1102	0.310466667
50 a 54 años	1066	0.310466667
55 a 59 años	918	0.310466667
60 a 64 años	0	0
65 a 69 años	0	0
70 a 74 años	0	0
75 a 79 años	0	0
80 a 84 años	0	0
85 años y más	0	0

Tabla A.14. Movilidad desde Madero

Madero a Tampico, Altamira		
Rango de edad	Porcentaje de población que se mueve	Tiempo que pasa en la región
0 a 4 años	0	0
5 a 9 años	0	0
10 a 14 años	0	0
15 a 19 años	817	0.310466667
20 a 24 años	817	0.310466667
25 a 29 años	703	0.310466667
30 a 34 años	716	0.310466667
35 a 39 años	733	0.310466667
40 a 44 años	720	0.310466667
45 a 49 años	741	0.310466667
50 a 54 años	729	0.310466667
55 a 59 años	635	0.310466667
60 a 64 años	580	0.310466667
65 a 69 años	0	0
70 a 74 años	0	0

75 a 79 años	0	0
80 a 84 años	0	0
85 años y más	0	0

Tabla A.15. Movilidad desde Altamira

Altamira a Madero, Tampico		
Rango de edad	Porcentaje de población que se mueve	Tiempo que pasa en la región
0 a 4 años	0	0
5 a 9 años	0	0
10 a 14 años	0	0
15 a 19 años	1217	0.310466667
20 a 24 años	1126	0.310466667
25 a 29 años	1080	0.310466667
30 a 34 años	1108	0.310466667
35 a 39 años	1090	0.310466667
40 a 44 años	1024	0.310466667
45 a 49 años	903	0.310466667
50 a 54 años	773	0.310466667
55 a 59 años	624	0.310466667
60 a 64 años	474	0.310466667
65 a 69 años	0	0
70 a 74 años	0	0
75 a 79 años	0	0
80 a 84 años	0	0
85 años y más	0	0

A partir de las tablas mencionadas se han obtenido las tablas de movilidad con las que se cargará la base de datos del simulador.

De cada tabla (A.13 - A.15) se ha sacado la fracción de población dividiendo la columna Porcentaje de población que se mueve, entre el número de habitantes de la ciudad de origen.

$$fraccionPoblacionQueSeMueve_{edad,ciudad} = \frac{porcentajePoblacionQueSeMueve_{edad,ciudad}}{numeroHabitantes_{ciudad}} \quad (A.4)$$

Para calcular los valores de movilidad de una ciudad de origen a una ciudad destino, por grupo de edad y estrato (segmento), la fracción de población obtenida por grupo de edad para cada ciudad de origen se multiplica por los porcentajes totales de población (tabla A.3) de la ciudad destino y por el porcentaje de población por estrato (tabla A.4) para la ciudad destino.

$$movilidad_{edad,cDestino} \quad (A.5)$$

$$= fPQSM_{edad,cOrigen} \times PTP_{edad,cDestino} \times \frac{PPE_{cDestino}}{100}$$

En las tablas siguientes se muestran los valores de movilidad obtenidos, la fracción de tiempo es la misma para todas las tablas, se toma en base a una jornada de 8 horas menos el 7% del tiempo que en promedio las personas se quedan en casa.

Tabla A.16. Movilidad desde Tampico a Altamira y a Cd. Madero

Desde Tampico					
	E1		E2		
Edad	a Altamira	a Madero	a Altamira	a Madero	Frac. Tiempo
0 a 4 años	0	0	0	0	0
5 a 9 años	0	0	0	0	0
10 a 14 años	0	0	0	0	0
15 a 19 años	0.02211163	0.01613443	0.02000576	0.02689072	0.310466667
20 a 24 años	0.02159312	0.01713811	0.01953663	0.02856352	0.310466667
25 a 29 años	0.01673363	0.01288539	0.01513995	0.02147565	0.310466667
30 a 34 años	0.01708626	0.01145749	0.015459	0.01909581	0.310466667
35 a 39 años	0.01751214	0.01281062	0.01584431	0.02135103	0.310466667
40 a 44 años	0.01570002	0.01293593	0.01420478	0.02155988	0.310466667
45 a 49 años	0.01478353	0.01220692	0.01337558	0.02034487	0.310466667
50 a 54 años	0.01248464	0.01328416	0.01129562	0.02214027	0.310466667
55 a 59 años	0.00762366	0.00873876	0.00689759	0.0145646	0.310466667
60 a 64 años	0	0	0	0	0
65 a 69 años	0	0	0	0	0
70 a 74 años	0	0	0	0	0
75 a 79 años	0	0	0	0	0
80 a 84 años	0	0	0	0	0
85 años y más	0	0	0	0	0

Madero

Tabla A.17. Movilidad desde Madero a Altamira y a Tampico

Desde Madero					
	E1		E2		
Edad	a Altamira	a Tampico	a Altamira	a Tampico	Frac. Tiempo
0 a 4 años	0	0	0	0	0
5 a 9 años	0	0	0	0	0
10 a 14 años	0	0	0	0	0
15 a 19 años	0.01530949	0.00783931	0.013851445	0.01262887	0.310466667
20 a 24 años	0.01478758	0.00793492	0.013379237	0.01278288	0.310466667

25 a 29 años	0.01137693	0.00584058	0.01029341	0.00940897	0.31046667
30 a 34 años	0.01219717	0.0058648	0.011035535	0.00944799	0.31046667
35 a 39 años	0.01248677	0.00591828	0.011297551	0.00953414	0.31046667
40 a 44 años	0.0111921	0.00648732	0.010126182	0.01045085	0.31046667
45 a 49 años	0.00994065	0.00606958	0.008993922	0.00977788	0.31046667
50 a 54 años	0.00853781	0.00580068	0.007724682	0.00934469	0.31046667
55 a 59 años	0.00527344	0.00401245	0.004771212	0.00646392	0.31046667
60 a 64 años	0.00345814	0.00332557	0.00312879	0.00535738	0.31046667
65 a 69 años	0	0	0	0	0
70 a 74 años	0	0	0	0	0
75 a 79 años	0	0	0	0	0
80 a 84 años	0	0	0	0	0
85 años y más	0	0	0	0	0

Altamira

Tabla A.16. Movilidad desde Altamira a Cd. Madero y a Tampico

Desde Altamira					
Edad	E1		E2		Frac. Tiempo
	a Madero	a Tampico	a Madero	a Tampico	
0 a 4 años	0	0	0	0	0
5 a 9 años	0	0	0	0	0
10 a 14 años	0	0	0	0	0
15 a 19 años	0.01664034	0.01167741	0.027733899	0.01881191	0.31046667
20 a 24 años	0.01617562	0.010936	0.02695937	0.01761753	0.31046667
25 a 29 años	0.01345863	0.00897272	0.022431045	0.01445475	0.31046667
30 a 34 años	0.01265693	0.0090757	0.021094875	0.01462064	0.31046667
35 a 39 años	0.01358324	0.00880071	0.02263874	0.01417765	0.31046667
40 a 44 años	0.01311524	0.00922641	0.021858731	0.01486344	0.31046667
45 a 49 años	0.01000258	0.00739653	0.016670974	0.01191556	0.31046667
50 a 54 años	0.00963289	0.00615079	0.016054813	0.00990871	0.31046667
55 a 59 años	0.00594007	0.00394294	0.009900122	0.00635195	0.31046667
60 a 64 años	0.00336362	0.00271779	0.005606031	0.00437827	0.31046667
65 a 69 años	0	0	0	0	0
70 a 74 años	0	0	0	0	0
75 a 79 años	0	0	0	0	0
80 a 84 años	0	0	0	0	0
85 años y más	0	0	0	0	0

Llenado de Tablas CSV

Las tablas que el simulador lee se han llenado en formato CSV y son las siguientes:

1. ESC_AGE.csv
2. MAE_AGE.csv
3. MAE_SDS.csv
4. MAE_STE.csv
5. MAE_UBT.csv
6. POB_ST_RG_SS.csv
7. UBT_SDS.csv
8. UBT_STE.csv
9. UBT_UBT_SDS.csv

Anexo B: Informe de Originalidad de Turnitin

27/1/22 13:18

Turnitin Informe de Originalidad

Informe de Originalidad Turnitin

Tesis Alfredo Brambila_Revision.docx por Estudiante Usuario

Desde Subir documento para chequear con Turnitin (Moodle PP) (Curso para el uso de Turnitin (Moodle PP))

Índice de similitud	Similitud según fuente
5%	Internet Sources: 4% Publicaciones: 1% Trabajos del estudiante: 1%

Procesado el 27-ene.-2022 20:14 CET
Identificador: 1749449029

Número de palabras: 22529

fuentes:

- 1 < 1% match (Internet desde 29-nov.-2016)
<http://docplayer.es/10287331-Algoritmos-heuristicos-y-metaheuristicos-para-el-problema-de-localizacion-de-regeneradores.html>
- 2 < 1% match (Internet desde 13-abr.-2018)
<http://docplayer.es/46883753-Leidy-juliana-delgado-herandez.html>
- 3 < 1% match (Internet desde 22-jul.-2021)
<http://delta.cs.cinvestav.mx/~ccoello/compevol/apuntes.pdf>
- 4 < 1% match (Internet desde 16-ago.-2009)
<http://delta.cs.cinvestav.mx/~ccoello/compevol/clase6-2008.pdf>
- 5 < 1% match (Internet desde 29-may.-2020)
http://saludata.saludcapital.gov.co/osb/wp-content/uploads/2020/04/Ficha_Metodologica.pdf
- 6 < 1% match (Internet desde 19-jul.-2020)
<http://nija.ujaen.es/bitstream/10953/513/1/9788484397830.pdf>
- 7 < 1% match (Internet desde 16-abr.-2018)
<http://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/UTP/226/6/0710861.pdf>
- 8 < 1% match (Internet desde 13-jun.-2021)
https://www.tecnm.mx/menu/transparencia/informes_gestion_2020/Informe_de_Labores_correspondiente_al_Tercer_trimestre_del_ejercicio
- 9 < 1% match (Internet desde 25-jul.-2021)
https://www.tecnm.mx/menu/transparencia/informes_gestion_2020/Informe_1a_S_O_CIA_2021.pdf
- 10 < 1% match (Internet desde 19-nov.-2021)
<https://ejournal.org/index.php/esj/article/download/14685/14606>
- 11 < 1% match ()
Palacios Saldaña_Rodrigo. "Optimización multiobjetivo de la red de distribución de energía eléctrica". "Universidad de Burgos". 2017
- 12 < 1% match ()
Michna_Tomás. "Graph labelings". "Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava". 2018
- 13 < 1% match ()
Jané Campos_Raimón, Aramendi Ecenarro_Elisabete, Irusta Zarándona_Unai, Alonso González_Erik. "Libro de actas. XXXV Congreso Anual de la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica". Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatearen Argitalpen Zerbitzua. 2018
- 14 < 1% match ()
Benítez Martín_Iván. "Desarrollo de una aplicación Android de recomendación de películas con análisis de datos en la nube". 2018
- 15 < 1% match ()
Castellón López_Javier. "Estudio del comportamiento del suelo en el rango de las pequeñas deformaciones y desarrollo del modelo constitutivo EPHYSS". Universitat Politècnica de Catalunya. 2020

- 16 < 1% match (Internet desde 12-nov.-2020)
https://www.researchgate.net/publication/307634220_Validacion_de_metodologias_de_cromatografia_liquida_de_alta_resolucion_en_alimer
-
- 17 < 1% match (Internet desde 27-oct.-2021)
https://www.researchgate.net/publication/223851726_Analysis_of_the_role_of_sidewall_vents_on_buoyancy-driven_natural_ventilation_in_parral-type_greenhouses_with_and_without_insect_screens_using_computational_fluid_dynamics
-
- 18 < 1% match (Internet desde 08-abr.-2021)
<https://www.mdpi.com/2297-8747/26/2/27>
-
- 19 < 1% match (Internet desde 17-nov.-2020)
https://moam.info/table-of-contents_597c04091723ddad8e0799c6.html
-
- 20 < 1% match (Internet desde 11-nov.-2020)
https://moam.info/table-of-contents_598241c21723dded563a4ec4.html
-
- 21 < 1% match (Internet desde 23-jul.-2021)
https://www.polibits.gelbukh.com/2020_62/Polibits_62_2020.pdf
-
- 22 < 1% match (Internet desde 06-dic.-2021)
<https://doczz.fr/doc/3744394/nmp22%C2%AE-test>
-
- 23 < 1% match (Internet desde 06-ene.-2022)
<http://repositorio.unisinucartagena.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/115/1/PROPUESTA%20DE%20REDISE%c3%91O%20DE%20LA>
-
- 24 < 1% match (Internet desde 27-jul.-2021)
http://pachuca.tecnm.mx/pdf/repositorio_tesis/96200381.pdf
-
- 25 < 1% match (trabajos de los estudiantes desde 17-sept.-2020)
 Submitted to Unviersidad de Granada on 2020-09-17
-
- 26 < 1% match (Internet desde 31-mar.-2021)
<https://doaj.org/article/2f428021f0a04043aa9f654927e1aeaa>
-
- 27 < 1% match (trabajos de los estudiantes desde 23-sept.-2020)
 Submitted to Universidad Internacional de la Rioja on 2020-09-23
-
- 28 < 1% match (Internet desde 21-sept.-2021)
<https://www.alamy.es/wuhan-china-4-de-septiembre-de-2020-camarones-a-la-venta-en-un-mercado-de-alimentos-en-wuhan-provincia-de-hubei-republica-popular-de-china-un-nuevo-coronavirus-conocido-como-sars-cov-2-que-ha-causado-un-brote-de-la-enfermedad-covid-19-fue-identificado-por-primera-vez-en-wuhan-a-finales-de-2019-la-organizacion-mundial-de-la-salud-oms-declaro-que-el-brote-de-covid-19-era-una-pandemia-mundial-el-11-de-marzo-de-2020-segun-la-oms-desde-el-brote-de-covid-19-aproximadamente-26-millones-de-personas-en-todo-el-mundo-han-sido-infectadas-con-el-nuevo-coronavirus-y-alrededor-de-846000-personas-murieron-de-covid-19-ivan-kargapolsev-tass-image370846609.html>
-
- 29 < 1% match (Internet desde 13-ene.-2022)
<https://slideplayer.es/slide/2935228/>
-
- 30 < 1% match (Internet desde 16-abr.-2018)
<http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/5373/MAMcrtojh.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
-
- 31 < 1% match ()
 De Giusti, Armando Eduardo, Pesado, Patricia Mabel. "XXIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación - CACIC 2017 - Libro de actas". Facultad de Informática (UNLP), 2017
-
- 32 < 1% match (trabajos de los estudiantes desde 24-sept.-2013)
 Submitted to Universidad Tecnologica de Honduras on 2013-09-24

27/1/22 13:18

Turnitin Informe de Originalidad

33	< 1% match (Internet desde 28-may.-2015) http://eio.usc.es/pub/mte/descargas/ProyectosFinMaster/Proyecto_782.pdf
34	< 1% match (trabajos de los estudiantes desde 05-dic.-2017) Submitted to Universidad de Lima on 2017-12-05
35	< 1% match (Internet desde 31-mar.-2017) http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/24645/tesis%20daniel%20garces%202013.pdf?isAllowed=y&sequence=1
36	< 1% match (Internet desde 23-abr.-2021) http://www.lib.kobe-u.ac.jp/repository/90007232.pdf
37	< 1% match (Internet desde 11-dic.-2020) https://afroideologi.wordpress.com/
38	< 1% match (Internet desde 21-abr.-2021) http://opac.pucv.cl/pucv_txt/Text-5500/UCD5754_01.pdf
39	< 1% match (publicaciones) Changguo Li, Yongzhen Pei, Meixia Zhu, Yue Deng, "Parameter Estimation on a Stochastic SIR Model with Media Coverage". Discrete Dynamics in Nature and Society, 2018
40	< 1% match (trabajos de los estudiantes desde 09-dic.-2021) Submitted to Universitat Politècnica de València on 2021-12-09
41	< 1% match (Internet desde 06-ene.-2022) https://patents.google.com/patent/ES2714096T3/en
42	< 1% match (Internet desde 23-sept.-2021) http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/22786/1/14103886.pdf
43	< 1% match (publicaciones) Patricia Batisla Grau, "Desarrollo de nanoestructuras de ZnO mediante anodizado electroquímico en diferentes condiciones para su aplicación en el área energética". Universitat Politècnica de València, 2021
44	< 1% match () http://cgservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/748.htm
45	< 1% match () http://www.cimacperu.com/en/works/emartes.php
46	< 1% match (Internet desde 03-nov.-2002) http://www.tamaulipas.gob.mx/gobernador/infomes/primerinforme/estrategiasocial/18.htm
47	< 1% match (Internet desde 12-dic.-2006) http://cemla.org/pdf/red/CR_Hoffmaister_Saborio_Solano_Solera.pdf
48	< 1% match () Pérez, Silvina, "Estudio de la cinética de bacterias halófilas presentes en la maduración de <i>Engraulis anchoita</i> involucradas en la transformación de histidina/histamina", 2018
49	< 1% match (Internet desde 10-dic.-2021) https://repositorio.uc.cl/xmlui/bitstream/handle/11534/52681/Tesis-Reyes-2020.pdf?isAllowed=y&sequence=1
50	< 1% match (Internet desde 29-jul.-2021) http://repositorio.ute.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/5781/57938_1.pdf
51	< 1% match (Internet desde 14-oct.-2010) http://www.slideshare.net/viterick/trabajo-informeinvestigacion

- 52 < 1% match (Internet desde 27-sept.-2021)
<https://1library.co/document/8yddmoly-sistema-educativo-apoyo-aprendizaje-larga-distancia.html>
-
- 53 < 1% match ()
 Daniel Mora Melia. "Diseño de redes de distribución de agua mediante algoritmos evolutivos. Análisis de eficiencia". 'Universitat Politècnica de València'. 2015
-
- 54 < 1% match (Internet desde 19-dic.-2021)
http://ebiltegia.mondragon.edu/xmlui/bitstream/handle/20_500_11984/1754/BarrenecheaCarrascoMaitane_tesis.pdf?isAllowed=y&sequence=1
-
- 55 < 1% match (Internet desde 04-dic.-2020)
<https://epdf.pub/wall-y-melzack-tratado-del-dolor-5a-edicion.html>
-
- 56 < 1% match (Internet desde 15-nov.-2020)
<https://hoyenlacultura.blogspot.com/2008/07/respuesta-al-articulo-de-larumbe.html>
-
- 57 < 1% match (Internet desde 11-dic.-2021)
https://pci.uas.edu.mx/wp-content/uploads/2021/08/TesisDCIGen2014_02_GaxiolaSanchezOmarlvan.pdf
-
- 58 < 1% match (Internet desde 20-dic.-2017)
<https://portatilchile.com/notebooks/1563-acer-predator-15-g9-593-72vt.html>
-
- 59 < 1% match (Internet desde 25-sept.-2011)
<http://www.cs.cinvestav.mx/Estudiantes/TesisGraduados/2004/tesisLuisVSantana.pdf>
-
- 60 < 1% match (Internet desde 14-mar.-2008)
http://www.pateco.es/administracion/ficheros/Textil_2005.pdf
-
- 61 < 1% match (publicaciones)
 Lairun Jin, Ying Zhao, Jun Zhou, Mengjun Tao, Yang Yang, Xingyu Wang, Pinkai Ye, Shajia Shan, Hui Yuan. "Distribución temporal, geográfica y por población de la nueva enfermedad por coronavirus (COVID-19) desde el 20 de enero hasta el 10 de febrero del 2020, en China". Revista Clínica Española. 2020
-
- 62 < 1% match (Internet desde 24-nov.-2020)
<https://www.cnet.com/es/noticias/mejores-pc-videojuegos-gaming/>

texto del trabajo:

Capítulo 1. Introducción Desde que

28 la Organización Mundial de la Salud (OMS) declaró el brote de COVID-19 como **una pandemia mundial el día 11 de marzo de 2020**

, diversos grupos de profesionales de la salud y científicos se han dedicado a tratar de predecir la propagación y el efecto de la pandemia, esto es un trabajo muy complicado y para ello se requieren herramientas que le permitan a los médicos, epidemiólogos y profesionales que trabajan en el control de la pandemia analizar la información de la evolución de la infección de forma rápida y efectiva, para ello se ha construido un simulador a partir de un nuevo modelo epidemiológico llamado SEIMR/R-S y un ajustador automático de parámetros biológicos para el mismo. SEIMR/R-S corresponde a un modelo matemático generalizado de pandemias que mejora los modelos tradicionales de simulación agregada al considerar los impactos interregionales en una macrorregión (conurbada); SEIMR/R-S también considera el impacto de modelar la población dividida en segmentos sociodemográficos

60 en función de la edad y el estrato

económico. [Velásquez-Bermúdez, 2021]. El modelo SEIMR/R-S está construido a partir de ecuaciones diferenciales que dependen de ciertos parámetros biológicos para su correcto funcionamiento, algunos de ellos tienen un significado científico y otros pueden provenir de aproximaciones, desafortunadamente, la mayoría de los valores de los parámetros biológicos se desconocen, es por ello que la estimación de

Anexo C: Instancias Utilizadas

El contenido de las instancias utilizadas se muestra a continuación, para cada instancia el primer elemento de un renglón corresponde al número de día de la epidemia, tomando como día 1 el 24 de marzo de 2020, el siguiente elemento corresponde al número de fallecidos acumulado para ese día, por lo que la línea 128,80 corresponde al acumulado de 80 fallecidos al 19 de junio de 2020.

Instancias generadas a partir de la información de Secretaría de Salud de Tamaulipas

Tampico.csv

128,80
129,82
130,82
131,82
132,82
133,83
134,83
135,83
136,83
137,83
138,83
139,83
140,83
141,84
142,85
143,85
144,85
145,111
146,120
147,122
148,122

149,123
150,129
151,140
152,140
153,156
154,168
155,169
156,169
157,175
158,176
159,180
160,185
161,185
162,197
163,197
164,197
165,209
166,209
167,214
168,219
169,224
170,224
171,226
172,233
173,247
174,247
175,258
176,258
177,264
178,272
179,279

180,279
181,287
182,304
183,304
184,311
185,329
186,329
187,330
188,335
189,335
190,338
191,338
192,340
193,349
194,349
195,349
196,356

Madero.csv

128,38
129,39
130,39
131,39
132,39
133,39
134,39
135,39
136,39
137,39
138,39
139,39

140,39
141,39
142,39
143,39
144,39
145,52
146,58
147,60
148,61
149,61
150,63
151,69
152,69
153,74
154,82
155,82
156,82
157,85
158,88
159,91
160,91
161,92
162,99
163,99
164,99
165,101
166,101
167,111
168,111
169,119
170,119

171,121
172,124
173,129
174,129
175,136
176,136
177,137
178,140
179,144
180,144
181,148
182,153
183,153
184,154
185,159
186,159
187,159
188,162
189,162
190,165
191,165
192,167
193,171
194,171
195,171
196,172
197,177
198,182
199,182
200,183
201,185

202,185

203,185

204,186

Altamira.csv

128,30

129,30

130,29

131,29

132,29

133,31

134,32

135,33

136,33

137,33

138,33

139,34

140,34

141,35

142,35

143,35

144,35

145,40

146,46

147,47

148,47

149,47

150,50

151,53

152,53

153,57

154,63
155,63
156,63
157,66
158,70
159,74
160,77
161,78
162,86
163,86
164,88
165,90
166,90
167,90
168,90
169,99
170,99
171,100
172,101
173,110
174,110
175,113
176,113
177,113
178,114
179,117
180,117
181,120
182,124
183,124
184,127

185,130
186,130
187,132
188,132
189,132
190,132
191,132
192,132
193,135
194,135
195,135
196,136
197,139
198,140
199,140
200,141
201,143
202,143
203,143
204,146

Instancias generadas a partir de la información de Secretaría de Salud Nacional

Tampico.csv

15,1
16,1
17,1
18,1
19,1
20,1
21,1
22,2

23,2
24,2
25,3
26,3
27,3
28,3
29,3
30,3
31,3
32,3
33,3
34,3
35,3
36,3
37,3
38,5
39,6
40,6
41,6
42,6
43,6
44,6
45,7
46,7
47,8
48,9
49,10
50,11
51,11
52,11
53,11

54,11

55,11

56,11

57,11

58,11

59,12

60,12

61,12

62,12

63,14

64,14

65,15

66,16

67,17

68,17

69,18

70,19

71,23

72,23

73,23

74,23

75,24

76,26

77,27

78,29

79,32

80,33

81,33

82,36

83,38

84,39

85,42
86,45
87,46
88,47
89,47
90,49
91,52
92,57
93,59
94,61
95,62
96,67
97,68
98,73
99,77
100,80
101,85
102,88
103,95
104,99
105,106
106,114
107,120
108,124
109,131
110,134
111,140
112,147
113,153
114,161
115,168

116,175
117,182
118,194
119,204
120,212
121,218
122,227
123,236
124,239
125,249
126,255
127,257
128,264
129,275
130,281
131,290
132,299
133,309
134,315
135,326
136,336
137,346
138,354
139,363
140,369
141,375
142,382
143,386
144,392
145,403
146,408

147,415
148,421
149,425
150,429
151,437
152,443
153,449
154,457
155,462
156,469
157,476
158,480
159,484
160,489
161,495
162,500
163,502
164,505
165,512
166,513
167,520
168,528
169,535
170,542
171,549
172,550
173,558
174,560
175,561
176,566
177,569

178,574
179,575
180,579
181,579
182,583
183,587
184,592
185,596
186,598
187,602
188,605
189,607
190,611
191,611
192,612
193,614
194,618
195,620
196,621
197,626
198,626
199,629
200,631
201,634
202,635
203,637
204,641
205,641
206,642
207,645
208,647

209,651
210,652
211,654
212,655
213,655
214,657
215,658
216,663
217,664
218,666
219,667
220,667
221,669
222,671
223,674
224,675
225,678
226,682
227,683
228,685
229,687
230,688
231,688
232,690
233,691
234,697
235,699
236,700
237,700
238,700
239,704

240,706
241,706
242,708
243,712
244,714
245,715
246,718
247,722
248,725
249,728
250,734
251,736
252,741
253,745
254,748
255,750
256,752
257,755
258,758
259,760
260,764
261,766
262,767
263,770
264,774
265,779
266,786
267,791
268,792
269,794
270,797

271,801
272,803
273,806
274,809
275,814
276,815
277,816
278,818
279,822
280,822
281,824
282,825
283,826
284,829
285,833
286,837
287,839
288,840
289,845
290,850
291,854
292,860
293,863
294,866
295,867
296,869
297,872
298,879
299,882
300,886
301,889

302,891
303,894
304,897
305,903
306,905
307,910
308,916
309,917
310,920
311,923
312,928
313,930
314,934
315,936
316,945
317,948
318,953
319,954
320,956
321,959
322,960
323,962
324,962
325,964
326,966
327,969
328,969
329,970
330,971
331,973
332,975

333,979
334,980
335,980
336,981
337,984
338,984
339,984
340,984
341,987
342,988
343,989
344,990
345,991
346,992
347,992
348,992
349,992
350,992
351,993
352,993
353,995
354,996
355,996
356,998
357,999
358,999
359,1001
360,1001
361,1002
362,1002
363,1002

364,1003
365,1005
366,1005
367,1005
368,1007
369,1009
370,1009
371,1009
372,1010
373,1010
374,1010
375,1010
376,1012
377,1012
378,1013
379,1015
380,1017
381,1018
382,1020
383,1020
384,1021
385,1022
386,1024
387,1024
388,1024
389,1025
390,1025
391,1025
392,1026
393,1026
394,1026

395,1026

396,1026

397,1026

398,1026

399,1028

400,1028

401,1028

402,1030

403,1031

404,1031

405,1032

406,1034

407,1035

408,1036

409,1036

410,1037

411,1038

412,1038

413,1038

414,1040

415,1042

416,1042

417,1043

418,1043

419,1045

420,1047

421,1047

422,1047

423,1049

424,1049

425,1049

426,1051

427,1053

428,1053

429,1055

430,1055

431,1056

432,1056

433,1056

434,1056

435,1056

436,1057

437,1059

438,1060

439,1060

440,1063

441,1063

442,1064

443,1065

444,1065

445,1065

446,1065

447,1065

448,1067

449,1067

450,1068

451,1069

452,1071

453,1073

454,1075

455,1076

456,1076

457,1076

458,1076

459,1077

460,1078

461,1081

462,1081

463,1081

464,1082

465,1084

466,1085

467,1087

468,1088

469,1090

470,1090

471,1095

472,1095

473,1095

474,1095

475,1097

476,1099

477,1099

478,1101

479,1102

480,1104

481,1104

482,1106

483,1106

484,1108

485,1110

486,1112

487,1113

488,1115

489,1115

490,1115

491,1116

492,1117

493,1118

494,1120

495,1120

496,1120

497,1120

498,1121

499,1122

500,1123

Madero.csv

15,1

16,1

17,1

18,2

19,2

20,2

21,2

22,2

23,2

24,2

25,2

26,2

27,2

28,2

29,2

30,2

31,2

32,3

33,3

34,3

35,3

36,3

37,3

38,3

39,3

40,3

41,3

42,3

43,3

44,3

45,3

46,3

47,3

48,3

49,3

50,3

51,3

52,3

53,4

54,4

55,4

56,5

57,5

58,6

59,6

60,9

61,9

62,11
63,13
64,13
65,14
66,15
67,15
68,17
69,18
70,18
71,18
72,18
73,19
74,20
75,20
76,21
77,23
78,23
79,23
80,24
81,24
82,25
83,26
84,27
85,28
86,28
87,30
88,31
89,31
90,33
91,33
92,35

93,36
94,36
95,36
96,37
97,39
98,40
99,42
100,43
101,45
102,47
103,50
104,53
105,57
106,59
107,59
108,60
109,62
110,63
111,66
112,67
113,69
114,73
115,77
116,79
117,79
118,83
119,89
120,93
121,102
122,109
123,114

124,115
125,122
126,123
127,125
128,131
129,132
130,135
131,142
132,145
133,147
134,152
135,155
136,161
137,164
138,173
139,175
140,176
141,182
142,187
143,191
144,195
145,197
146,203
147,208
148,212
149,216
150,217
151,220
152,222
153,226
154,229

155,233
156,235
157,239
158,239
159,243
160,248
161,252
162,256
163,259
164,263
165,266
166,267
167,268
168,271
169,272
170,277
171,280
172,283
173,284
174,284
175,284
176,284
177,285
178,288
179,291
180,293
181,294
182,295
183,297
184,300
185,303

186,305
187,305
188,305
189,308
190,308
191,310
192,313
193,317
194,318
195,319
196,319
197,320
198,322
199,323
200,323
201,323
202,324
203,326
204,327
205,327
206,327
207,327
208,328
209,331
210,334
211,335
212,337
213,338
214,338
215,341
216,343

217,345
218,345
219,346
220,347
221,348
222,350
223,350
224,351
225,352
226,352
227,354
228,355
229,356
230,358
231,358
232,362
233,365
234,366
235,367
236,367
237,370
238,370
239,370
240,374
241,374
242,376
243,377
244,377
245,378
246,379
247,379

248,380
249,380
250,381
251,381
252,381
253,381
254,382
255,386
256,387
257,388
258,390
259,392
260,393
261,394
262,396
263,396
264,396
265,396
266,396
267,396
268,397
269,397
270,400
271,402
272,403
273,404
274,406
275,407
276,408
277,409
278,409

279,411
280,412
281,418
282,419
283,420
284,421
285,422
286,425
287,425
288,428
289,429
290,430
291,431
292,431
293,433
294,438
295,440
296,442
297,445
298,446
299,449
300,451
301,452
302,456
303,458
304,459
305,463
306,464
307,466
308,468
309,471

310,474
311,476
312,478
313,479
314,480
315,481
316,484
317,485
318,488
319,489
320,490
321,493
322,494
323,495
324,497
325,498
326,501
327,505
328,506
329,508
330,508
331,512
332,512
333,513
334,513
335,514
336,515
337,515
338,516
339,519
340,519

341,521
342,521
343,521
344,521
345,521
346,521
347,521
348,522
349,522
350,523
351,523
352,523
353,523
354,525
355,525
356,525
357,525
358,525
359,525
360,526
361,527
362,528
363,528
364,528
365,528
366,528
367,528
368,529
369,530
370,531
371,532

372,532

373,533

374,533

375,533

376,534

377,535

378,535

379,536

380,536

381,536

382,538

383,539

384,540

385,541

386,541

387,541

388,542

389,542

390,543

391,543

392,544

393,544

394,545

395,546

396,546

397,546

398,546

399,547

400,547

401,547

402,547

403,547

404,547

405,547

406,547

407,548

408,548

409,548

410,548

411,550

412,551

413,552

414,553

415,553

416,553

417,553

418,553

419,555

420,556

421,556

422,558

423,558

424,558

425,558

426,558

427,558

428,558

429,558

430,558

431,560

432,560

433,561

434,562
435,564
436,565
437,566
438,567
439,567
440,567
441,568
442,568
443,568
444,568
445,570
446,570
447,570
448,571
449,571
450,572
451,572
452,572
453,573
454,574
455,574
456,576
457,576
458,576
459,576
460,576
461,577
462,577
463,579
464,579

465,579
466,580
467,580
468,580
469,580
470,580
471,580
472,581
473,581
474,581
475,581
476,585
477,587
478,587
479,588
480,588
481,589
482,589
483,591
484,591
485,591
486,591
487,591
488,591
489,592
490,592
491,592
492,593
493,593
494,596
495,597

496,597

497,598

498,599

499,600

500,600

Altamira.csv

15,1

16,1

17,1

18,1

19,1

20,1

21,1

22,1

23,1

24,1

25,1

26,1

27,1

28,1

29,1

30,1

31,1

32,1

33,1

34,1

35,1

36,1

37,1

38,1

39,1
40,1
41,1
42,1
43,1
44,1
45,1
46,1
47,1
48,1
49,2
50,2
51,2
52,2
53,3
54,4
55,4
56,4
57,4
58,4
59,5
60,5
61,5
62,5
63,6
64,7
65,7
66,7
67,7
68,8
69,8

70,8
71,9
72,9
73,9
74,9
75,9
76,9
77,9
78,10
79,11
80,11
81,12
82,13
83,17
84,18
85,18
86,19
87,19
88,20
89,21
90,21
91,23
92,23
93,24
94,27
95,29
96,29
97,30
98,33
99,33
100,33

101,34
102,34
103,36
104,38
105,40
106,42
107,42
108,44
109,45
110,47
111,50
112,52
113,53
114,58
115,62
116,64
117,65
118,68
119,74
120,76
121,84
122,87
123,91
124,91
125,100
126,104
127,109
128,110
129,112
130,114
131,123

132,128
133,130
134,133
135,135
136,138
137,138
138,139
139,144
140,147
141,148
142,149
143,152
144,154
145,159
146,163
147,169
148,171
149,174
150,174
151,176
152,176
153,177
154,181
155,183
156,183
157,184
158,184
159,186
160,189
161,191
162,192

163,194
164,196
165,199
166,200
167,205
168,207
169,209
170,209
171,212
172,213
173,214
174,216
175,217
176,217
177,219
178,221
179,221
180,221
181,221
182,221
183,222
184,223
185,225
186,227
187,229
188,230
189,233
190,234
191,234
192,234
193,235

194,235
195,237
196,238
197,238
198,242
199,243
200,246
201,248
202,250
203,250
204,253
205,256
206,256
207,258
208,258
209,259
210,261
211,261
212,262
213,263
214,264
215,265
216,266
217,270
218,272
219,272
220,273
221,273
222,274
223,276
224,276

225,276
226,276
227,278
228,280
229,280
230,281
231,282
232,284
233,285
234,285
235,285
236,288
237,291
238,291
239,291
240,292
241,292
242,294
243,294
244,295
245,295
246,295
247,295
248,297
249,299
250,301
251,304
252,304
253,305
254,305
255,306

256,308
257,310
258,310
259,310
260,311
261,311
262,312
263,312
264,314
265,318
266,318
267,318
268,318
269,319
270,319
271,320
272,321
273,323
274,324
275,324
276,325
277,328
278,328
279,330
280,331
281,332
282,333
283,334
284,335
285,335
286,336

287,336
288,337
289,339
290,340
291,341
292,341
293,341
294,341
295,343
296,345
297,346
298,347
299,348
300,348
301,348
302,349
303,349
304,350
305,353
306,354
307,355
308,356
309,358
310,359
311,360
312,363
313,364
314,364
315,365
316,365
317,365

318,365
319,365
320,366
321,367
322,368
323,369
324,369
325,369
326,369
327,370
328,371
329,372
330,372
331,372
332,374
333,375
334,376
335,376
336,376
337,376
338,376
339,376
340,376
341,376
342,377
343,378
344,381
345,381
346,381
347,382
348,382

349,382
350,382
351,384
352,385
353,386
354,386
355,386
356,387
357,388
358,388
359,388
360,388
361,389
362,389
363,389
364,390
365,392
366,392
367,392
368,393
369,393
370,394
371,394
372,395
373,395
374,395
375,395
376,395
377,395
378,395
379,395

380,395

381,396

382,396

383,396

384,396

385,397

386,397

387,398

388,398

389,398

390,398

391,398

392,398

393,398

394,399

395,399

396,399

397,399

398,399

399,400

400,401

401,401

402,401

403,401

404,401

405,402

406,402

407,402

408,402

409,403

410,404

411,404
412,404
413,404
414,404
415,404
416,405
417,405
418,406
419,406
420,406
421,406
422,407
423,408
424,408
425,409
426,409
427,409
428,409
429,410
430,411
431,411
432,411
433,411
434,412
435,412
436,413
437,413
438,413
439,414
440,414
441,416

442,416

443,416

444,416

445,417

446,419

447,419

448,419

449,420

450,420

451,421

452,421

453,422

454,422

455,424

456,424

457,424

458,424

459,425

460,426

461,427

462,428

463,429

464,429

465,429

466,429

467,429

468,430

469,430

470,430

471,432

472,432

473,432

474,433

475,434

476,434

477,434

478,435

479,436

480,437

481,438

482,440

483,440

484,440

485,441

486,441

487,442

488,443

489,444

490,444

491,444

492,448

493,448

494,450

495,452

496,454

497,454

498,455

499,456

500,461

Bibliografía

- Velasquez-Bermudez J. (2021). SEIMR/R-S. General Epidemic Simulation Model Multi-Infected States - Multi Sociodemographic Segments - Multi-Region Mobility. Theory. European Scientific Journal, ESJ, 17 (31), 195.
- Kermack, W.O. and Mc Kendrick, A. G. (1927) "Contributions to the Mathematical Theory of Epidemics, Part I". Proc. R. Soc. London, Ser. A, 115, 1927, 700-721.
- Mejía Becerra, J. D. et al. (2020). "Modelación Matemática de la Propagación del SARS-CoV-2 en la Ciudad de Bogotá". Documento de Circulación Informal.
- Duarte Muñoz A., Pantrigo Fernández J.J., Gallego Carrillo M. (2010). Metaheurísticas. España: Universidad Rey Juan Carlos.
- Stelios H. Zanakis and James R. Evans. Heuristic "optimization": why, when, and how to use it. Interfaces 11(5): 84-91, 1981.
- Nicholson, T. A. J. (2007). Optimization in industry: Optimization techniques. Aldine.
- Reeves, C. R. (1993). Modern heuristic techniques for combinatorial problems. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA.
- Kelly, J. P. and Osman, I. H. (1996). Meta-Heuristics: Theory and Applications. Kluwer Academic Publishers Norwell, MA, USA.
- Holland, J. H. (1992). Genetic algorithms. Scientific american, 267(1):66-73.
- Santiago Pineda, A.A. (2018). Métodos de Optimización Multiobjetivo (tesis doctoral). TeCNM-Instituto Tecnológico de Tijuana, Baja California, México.
- Santiago Pineda, A.A. (2013). Estrategias de Búsqueda Local para el problema de programación de tareas en sistemas de procesamiento paralelo (tesis de maestría). Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Tamaulipas, México.
- Liefoghe, A., Humeau, J., Mesmoudi, S., Jourdan, L., and Talbi, E.-G. (2011). On dominance-based multiobjective local search: design, implementation and experimental analysis on scheduling and traveling salesman problems.
- De Jong, K. (2007). "Parameter Setting in EAs: a 30 Year Perspective", Studies in Computational Intelligence (SCI) 54: 1–18.

Wetzel, A. (1983). "Evaluation of the effectiveness of genetic algorithms in combinatorial optimization". PhD thesis, University of Pittsburgh, Pittsburgh, Philadelphia, USA.

Brindle, A. (1981). "Genetic Algorithms for Function Optimization". PhD thesis, Department of Computer Science, University of Alberta, Edmonton, Alberta.

De Jong, A. K. (1975). "An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems". PhD thesis, University of Michigan.

Deb, K. and Agrawal, R.B. (1995). "Simulated Binary Crossover for Continuous Search Space". *Complex Systems*, 9:115–148.

Coello Coello, C. A. (2018). "Introducción a la Computación Evolutiva". México. CINVESTAV-IPN Departamento de Computación.

Polya, G. (1971). *How to solve it: A new aspect of mathematical method*. Princeton University Press Princeton, NJ.

Sipser, M. (2006). *Introduction to the Theory of Computation*, 2nd Edition. Course Technology PTR.

Changguo, L., Yongzhen, P., Meixia, Z., & Yue D. (2018). Parameter Estimation on a Stochastic SIR Model with Media Coverage. *Hindawi Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2018, 1-7.

Begoña Cantó, C. C. & Sánchez, E. (2017). Estimation of parameters in a structured SIR model. *SpringerOpen Journal*, 33, 1-13.

Talawar, A. S. & Aundhakar, U. R. (2016). Parameter Estimation of SIR Epidemic Model Using MCMC Methods. *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*, 12, 1299-1306.

Bentout, S., Chekroun, A. & Kuniya, T. (2020). Parameter estimation and prediction for coronavirus disease outbreak 2019 (COVID-19) in Algeria. *AIMS Public Health*, 7, 306-318.

Secretaría de Salud. (2021). Datos Abiertos Bases Históricas. México: [gob.mx/salud](https://www.gob.mx/salud).
<https://www.gob.mx/salud/documentos/datos-abiertos-bases-historicas-direccion-general-de-epidemiologia>

INEGI. (2020). Banco de Indicadores. México: INEGI. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?t=020000100010&ag=28009>

CONEVAL. (2020). Pobreza Municipal 2015 Tamaulipas. México: CONEVAL Entidades Federativas. Recuperado de https://www.coneval.org.mx/coordinacion/entidades/Tamaulipas/Paginas/pobreza_municipal2015.aspx

Soto-Estrada, G., Moreno-Altamirano, L., & Pahua D.. (2016). Panorama epidemiológico de México, principales causas de morbilidad y mortalidad. *scielo*, 59, 8-22.

Secretaría de Salud. (2021). Boletín Estadístico. México: coronavirus.gob.mx. Recuperado de https://coronavirus.gob.mx/wp-content/uploads/2020/10/BoletinIV_ExcesoMortalidad_SE39MX21102020.pdf

Gobierno de México. (2021). MORBILIDAD POR GRUPO DE EDAD. México: Anuario de Morbilidad. Recuperado de https://epidemiologia.salud.gob.mx/anuario/html/morbilidad_grupo.html

Secretaría de Salud Tamaulipas. (2020). CONFIRMA SST PRIMER CASO DE COVID-19 EN TAMAULIPAS. México: tamaulipas.gob.mx. Recuperado de <https://www.tamaulipas.gob.mx/salud/2020/03/confirma-sst-primer-caso-de-covid-19-en-tamaulipas/>

Gobierno de Tamaulipas. (2020). CONFIRMA SST TERCER CASO POSITIVO A COVID-19 EN EL ESTADO. México: coronavirus.tamaulipas.gob. Recuperado de <https://coronavirus.tamaulipas.gob.mx/2020/03/confirma-sst-tercer-caso-positivo-a-covid-19-en-el-estado/>

Expreso. (2020). Madero registra el segundo caso de coronavirus. México: expreso.press. Recuperado de <https://expreso.press/2020/03/23/madero-registra-el-segundo-caso-de-coronavirus/>

IEST ANÁHUAC. (2020). SITUACIÓN GEOGRÁFICA DE TAMAULIPAS ANTE EL COVID-19. México: anahuac.mx. Recuperado de <https://www.anahuac.mx/iest/coronavirus/tamaulipas-covid.html>