

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN-TACNA

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia

MODELACION HIDROLOGICA PRECIPITACION-ESCORRENTIA,

USANDO EL MODELO DE THOMAS Y ALGORITMOS

GENETICOS EN LA SUBCUENCA DEL RIO

QUILVIRE - TACNA

TESIS

Presentada por

Bach. Michel Marcial Saucedo Oxacopa

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO GEOLOGO-GEOTECNICO

Tacna-Perú

2014

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN-TACNA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA
GEOLÓGICA – GEOTECNIA

**“MODELACIÓN HIDROLÓGICA PRECIPITACIÓN - ESCORRENTÍA, USANDO EL
MODELO DE THOMAS Y ALGORITMOS GENÉTICOS EN LA SUBCUENCA
DEL RÍO QUILVIRE - TACNA”**

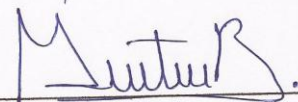
Tesis sustentada y aprobada el 06 de Diciembre del 2013, integrada por el siguiente jurado:

PRESIDENTE



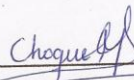
Ph. D. EDWIN PINO VARGAS

MIEMBRO – SECRETARIO



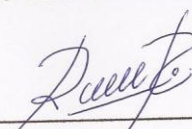
ING. MÁXIMO GUTIERREZ BERNAOLA

MIEMBRO



ING. GLORIA CHOQUE MACHACA

ASESORA DE TESIS



ING. CARMEN R. ROMÁN ARCE

DEDICATORIA

A mis padres, Doris y Modesto, porque creyeron en mi y porque me sacaron adelante, dándome ejemplos dignos de superación y entrega, porque en gran parte gracias a ustedes, hoy puedo ver alcanzada una de mis metas, ya que siempre estuvieron impulsándome en los momentos más difíciles de mi carrera, y porque el orgullo que sienten por mí.

A mis hermanos, tíos, primos, abuelos y amigos, gracias por haber fomentado en mí el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida.

A mi compañera y esposa Cinthia, por haberme acompañado siempre en esta etapa, brindándome siempre la fuerza y apoyo incondicional.

Finalmente a mi hija Samantha por ser el motivo principal de mis éxitos y mis logros así como el amor mas puro que he llegado a sentir en mi vida.

A todos, espero no defraudarlos y contar siempre con su valioso apoyo, sincero e incondicional.

CONTENIDO

DEDICATORIA	i
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUCCION	1

CAPITULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1. Planteamiento del Problema	5
1.2. Objetivos	5
1.2.1. Problema General	5
1.2.2. Problema Específicos	5
1.3. Hipótesis Planteada	6
1.4. Justificación	6
1.5. Ubicación de la zona de estudio	7

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. Aspectos Generales	9
2.2. Revisión de investigaciones realizadas	11

CAPITULO III

MATERIALES Y METODOLOGÍA

3.1. Recopilación de información y fuente de datos	25
3.2. Aspectos Geológicos y Geomorfológicos.....	27
3.2.1. Altiplano.....	28
3.2.2. Cadenas y Conos Volcánicos.....	29
3.3. Análisis Climático e hidrología	30
3.4. HIDROGRAFÍA E HIDROLOGÍA	34
3.5. ALGORITMOS GENETICOS	37
3.5.1. Definición.....	37
3.5.2. Características de los Algoritmos Genéticos	39
3.5.3. Problemas a ser solucionados por los AGs.....	42
3.5.4. Críticas a la teoría estándar	43
3.6. MODELO HIDROLOGICO DE THOMAS	51

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. La sub cuenca en estudio	61
4.2. Información Disponible.....	62
4.3. Desarrollo del Modelo	65
4.4. Proceso de Calibración	67

4.5. Ejecución del Programa	74
4.6. Parámetros obtenidos y Simulación	76
4.7. Análisis Estadístico Comparativo	81
CONCLUSIONES	83
RECOMENDACIONES	86
BIBLIOGRAFIA	87

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1 Sistema Titicaca, Desaguadero, Poopo y Salar de Coipasa (TDPS).....	6
Figura 2 Categorías de Sistemas Inteligentes, según Hopgood	14
Figura 3 Desarrollo de los algoritmos evolutivos	15
Figura 4 Diagrama de Holdrige.....	26
Figura 5 Diagrama de flujo de un algoritmo genético simple	30
Figura 6 Representación de una cuenca mediante un modelo lluvia-escorrentía.....	40
Figura 7 Componentes de un modelo hidrológico	41
Figura 8 Variables en la calibración del modelo de Thomas	42
Figura 9 Variables en el problema de la calibración del modelo de Thomas.....	45
Figura 10 Caudales Máximos, Medio y Mínimos Mensuales Estación Vilacota.....	49
Figura 11 Descargas medias mensuales Estación Vilacota	50
Figura 12 Diagrama de flujo para la función objetivo.....	51
Figura 13 Conformación del tipo de cromosoma a usarse.....	54
Figura 14 Diagrama de flujo del programa principal	56
Figura 15 Pantalla inicial del programa computacional.....	57

Figura 16 Proceso de Simulación	58
Figura 17 Resultados Finales Generación 1000.....	59
Figura 18 Estadísticas de la Generación 1000	60
Figura 19 Análisis comparativo caudales simulados y registrados generación 1	61
Figura 20 Análisis comparativo caudales simulados y registrados generación 1000.....	63
Figura 21 Correlación entre Caudales Simulados y Registrados.....	64

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1 Estaciones hidrometeorológicas ámbito de la cuenca	26
Cuadro 2 Características Hidrográficas Maure-Uchusuma.....	27
Cuadro 3 Características de la Estación Vilacota Rio Quilvire.....	28
Cuadro 4 Aplicaciones de AGs en el diseño de estructuras	35
Cuadro 5 Aplicaciones de AGs en la planeación y ejecución de la construcción.....	35
Cuadro 6 Aplicaciones de AGs en la geotecnia y la sismología	36
Cuadro 7 Aplicaciones de AGs en ingeniería de transporte y pavimentos	36
Cuadro 8 Evaluación Geomorfológica de la Cuenca	61
Cuadro 9 Precipitaciones, evaporación y caudales históricos	63

Cuadro 10 Rangos de búsqueda y precisión para cada uno de los parámetros.....	68
Cuadro 12 Parámetros y Simulación Usando Generación 1.....	78
Cuadro 13 Parámetros y Simulación Usando Generación 1000.....	80

CONTENIDO DE ANEXOS

Anexo 1	Series Históricas Hidrológicas Estación Vilacota.
Anexo 2	Salidas del Programa Algoritmos Genéticos para Calibración del Modelo Precipitación - Escorrentía.
Anexo 3	Mapas ARCGIS de la Subcuenca Quilvire.

RESUMEN

El presente trabajo, desarrolla metodología y procedimientos, para el uso de los Algoritmos Genéticos, los cuales en diferentes ciencias e ingenierías, son una herramienta computacional que nos lleva a la resolución de problemas más complejos a los permitidos por metodologías tradicionales. Asimismo debemos tener presente que en nuestro país los profesionales y los investigadores no están suficientemente familiarizados con esta técnica. La presente tesis tiene por objeto un caso estudio real que consiste en calibrar un modelo hidrológico lluvia-escorrentía aplicado a la cuenca Quilvire, ubicada en las nacientes del Rio Maure, en la zona alto andina de la región Tacna. Esta cuenca se calibró satisfactoriamente usando un programa computacional para algoritmos genéticos desarrollado en lenguaje de programación científica MATLAB.

Palabras clave: algoritmos genéticos, hidroinformática, sistemas inteligentes, inteligencia artificial, soft computing, inteligencia computacional, algoritmos evolutivos, calibración, modelos hidrológicos, modelos lluvia-escorrentía, MATLAB.

ABSTRACT

This paper develops methodology and procedures for the use of genetic algorithms, which in different science and engineering, is a computational tool that leads to solving more complex than those permitted by traditional methodologies problems. We must also remember that in our country professionals and researchers are not sufficiently familiar with this technique. This thesis concerns a real case study is to calibrate a hydrological rainfall-runoff model applied to Quilvire basin in the headwaters of the Rio Maure, in the high Andes region of Tacna. This basin was successfully calibrated using a computer program developed for genetic algorithms in scientific programming language MATLAB.

Keywords: genetic algorithms, hydroinformatics, intelligent systems, artificial intelligence, soft computing, computational intelligence, evolutionary algorithms, calibration, hydrological models, rainfall-runoff models, MATLAB.

INTRODUCCION

El agua es la sustancia más abundante en la Tierra, el planeta está constituido de un 70,8% por agua. Siendo así es el principal constituyente de todos los seres vivos y es una fuerza importante que constantemente está cambiando la superficie terrestre. También es un factor clave en la climatización de nuestro planeta para la existencia humana y a la vez tiene influencia en el progreso de la civilización. La hidrología cubre todas las fases del agua en la tierra, es una materia de gran importancia para el ser humano y su ambiente.

Los recursos hídricos presentan características que los hacen especiales y que dificultan su estudio, uso y aprovechamiento, y en los cuales la Hidrología juega un papel fundamental para su estudio y análisis. Entre éstos se pueden destacar:

- Son elementos vitales y escasos, por lo cual son claves que pueden facilitar o restringir el desarrollo de una sociedad.
- Están sujetos a probabilidad de ocurrencia, su valor no es constante y su predicción es muy complicada e imprecisa. Su valor varía en el espacio y en el tiempo.

- Se presentan en diferentes formas, se encuentran en diversos estados y lugares y mantienen su unidad a través del ciclo hidrológico.
- Su valor está ligado a su ubicación, se encuentran en diversos lugares y estados, en diferentes condiciones ambientales y geográficas que pueden variar su comportamiento.
- Su utilización es múltiple, el agua es necesaria para diferentes usuarios en el desarrollo de las actividades diarias. Se deben analizar los usos de carácter prioritario a la hora de explotar este recurso.

El uso de este recurso debe ser planificado, racional y debe ser económicamente viable, analizando los beneficios que se obtienen contra los costos que acarrearán un proyecto hidráulico. Una correcta planificación del uso de los recursos hídricos incluye un aspecto fundamental, el desarrollo integrado de las cuencas, el cual consiste en el manejo ordenado de los recursos hídricos de cuencas, en aprovechamientos de propósitos múltiples, para promover el bienestar humano.

En este caso la unidad de planteamiento es la realidad de la escasa familiaridad de la ingeniería en nuestro país con los algoritmos genéticos,

cómo estimular entonces su implementación? ¿Cómo mostrar ante los ingenieros las grandes ventajas que sí se están aprovechando en otros países?. Los algoritmos genéticos permitirán calibrar el modelo hidrológico precipitación – escorrentía de Thomas.

Correa, Díaz (2005). Con el fin de realizar el mejor aprovechamiento de los acuíferos a nivel mundial, se han desarrollado modelos de simulación continua algunos con mucho éxito y otros no tanto. El modelo que se considera más realista para realizar dicha simulación es el modelo de Thomas debido a que aún el suelo no presente su máxima capacidad de almacenamiento en términos de húmedas, permite excedentes hídricos.

Mejuto, Mayorga, Fernández, Los modelos son una herramienta fundamental para el hidrólogo, en especial a la hora de proponer o realizar una adecuada gestión de los recursos hídricos.

Castillo (2007), El modelo de Thomas fue desarrollado como su nombre lo indica por Thomas en 1981, el cual se conoce también como modelo abcd. Este modelo hídrico de carácter agregado establece mediante la determinación de cuatro parámetros del caudal afluente en una cuenca.

Entonces el objetivo principal del presente trabajo es emplear los algoritmos genéticos para calibrar el modelo hidrológico precipitación –

escorrentía de Thomas, para ello se establece la metodología basada en técnicas de inteligencia artificial, analizando las series de precipitación, evapotranspiración y descargas en el ámbito de la zona de estudio. Finalmente se elaboró un programa computacional en lenguaje de programación científica MATLAB para la aplicación de los Algoritmos Genéticos. Efectuando simulaciones se buscar la calibración del modelo hidrológico precipitación - escorrentía que puede ser favorable o no para la cuenca escogida.

CAPITULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1. Planteamiento del Problema

Es una realidad la escasa familiaridad de la ingeniería en nuestro país con los algoritmos genéticos, cómo estimular entonces su implementación? ¿Cómo mostrar ante los ingenieros las grandes ventajas que sí se están aprovechando en otros países?

1.2. Objetivos

1.2.1. Problema General

- Emplear los algoritmos genéticos para calibrar el modelo hidrológico precipitación – escorrentía de Thomas.

1.2.2. Problema Específicos

- Establecer la metodología basada en técnicas de inteligencia artificial, específicamente Algoritmos Genéticos.
- Analizar las series de precipitación, evapotranspiración y descargas en el ámbito de la zona de estudio.

- Elaborar un programa computacional en lenguaje de programación científica MATLAB para la aplicación de los Algoritmos Genéticos.
- Efectuar simulaciones y buscar la calibración del modelo hidrológico precipitación - escorrentía que puede ser favorable o no para la cuenca escogida.

1.3. Hipótesis Planteada

Los algoritmos genéticos permitirán calibrar el modelo hidrológico precipitación – escorrentía de Thomas.

1.4. Justificación

Es evidente que la utilización de las técnicas basadas en mecanismos de inteligencia artificial según el estado actual del conocimiento humano, específicamente en el campo de las ingenierías, aún más en el campo de la ingeniería de los recursos hídricos es de gran importancia en el planeamiento y la gestión de los mismos.

Para investigar temas como el planteado de calibración de modelos, esta es una buena alternativa, puesto que normalmente la fase de calibración de modelos en hidrología se hace muy compleja y tediosa,

por tanto queda plenamente justificada la aplicación de esta metodología.

1.5. Ubicación de la zona de estudio

La cuenca Maure se encuentra ubicada entre las coordenadas geográficas $69^{\circ}28'05''$ y $70^{\circ}06'00''$ de Longitud Oeste y $17^{\circ}00'16''$ y $17^{\circ}39'21''$ de Latitud Sur. Ver mapa 01 (anexo de mapas).

Políticamente la cuenca, está localizada en la zona altiplánica del departamento de Tacna, extendiéndose en parte sobre el departamento de Puno. Dicha cuenca es a su vez de curso internacional desemboca en un lugar denominado Calacoto, punto de confluencia con el río Desaguadero, que es la descarga natural del Lago Titicaca en el Departamento de La Paz, República de Bolivia. En la Figura 1, se muestra el sistema TDPS al cual pertenece la subcuenca en estudio y viene a ser la subcuenca ubicada en las nacientes de dicho sistema. La subcuenca Quilvire, se encuentra ubicada en la parte alta de la cuenca Maure, tal como se muestra en el mapa 01 (anexo de mapas).

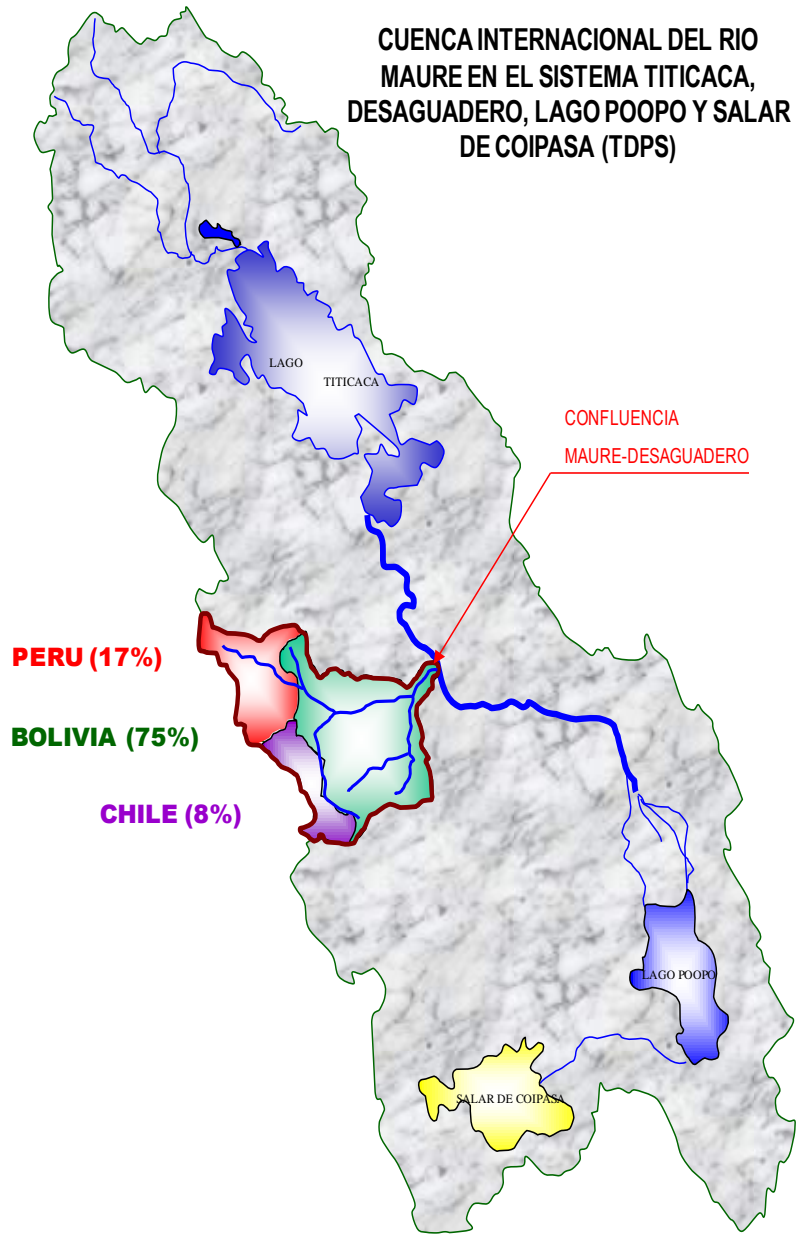


Figura 1 Sistema Titicaca, Desaguadero, Poopo y Salar de Coipasa (TDPS)

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. Aspectos Generales

Desde la publicación a finales de la década de 1970 del libro *The Fluvial System* (Schumm, 1977), las corrientes fluviales han sido entendidas y estudiadas como sistemas abiertos, dinámicos y complejos. Esta inclusión de la Teoría de Sistemas en el análisis geomorfológico de los ríos, arroyos y demás elementos de la red hidrográfica, llevó aparejada la profundización en otra serie de conceptos teóricos sobre los modelos de equilibrio geomórfico, ya iniciados por Gilbert y Powell, y que aún hoy en día son objeto de discusión.

Los antecedentes de esta visión sistemáticas del dominio fluvial pueden remontarse a los trabajos de geomorfólogos e hidrólogos de principios mediados del siglo XX, cuando relevantes figuras como Horton y Strahler pusieron las bases de la morfometría de cuencas hidrográficas. A ellos sucedieron importantes trabajos en geomorfología fluvial cuantitativa y teórica, entre los que destacan

Fluvial Processes in Geomorphology (Leopold, Wolman y Miller, 1964) y geomorphology and General System Theory (Chorley, 1962), pilares fundamentales de las primeras propuestas sistemáticas explícitas de Chorley & Kennedy (1971) y Chorley (1972).

La consideración del sistema fluvial como un conjunto de elementos interrelacionados y de los diferentes niveles de análisis con que puede abordarse su estudio (Chorley, op, cit), llevan aparejadas una serie de consecuencias inmediatas:

Las investigaciones que aborden, temas fluviales deben hacerlo desde una perspectiva integrada, esto es, considerando sus elementos en el análisis y realizando síntesis con las relaciones entre ellos.

Es preciso hacer hincapié no sólo en los aspectos configuracionales (sistema morfológico), sino también en la dinámica del agente y sus acciones energéticas (sistema en cascada): esto es, la hidrología e hidráulica fluviales.

Al verificarse estrechas relaciones geometría-agente-acción, la investigación debe abordarse desde la perspectiva de sistemas morfogenéticos proceso-respuesta.

Por otra parte, la mayoría de los actuales sistemas fluviales no se encuentran en situación “natural”, sino que vienen interfiriendo con las actividades humanas desde tiempos ancestrales, lo que hace más complejo el sistema de interrelaciones y su interpretación.

Los ríos han sido un elemento importante en la colonización biológica y humana de los territorios, pero de forma especial allí donde el clima les hace aparecer como una fuente de recursos naturales en un ambiente semiárido. En ocasiones, esta colonización ha llegado hasta extremos peligrosos para el propio río o sus colonizadores, al interferir con su dinámica y la de los ecosistemas que sustenta; por ellos cada día son más necesarios trabajos de planificación integral (cuencas fluviales) y de gestión en las proximidades de los cauces (riberas).

2.2. Revisión de investigaciones realizadas

Ávila (2011), los modelos de redes neuronales artificiales (técnicas que forman parte de las técnicas de inteligencia artificial), mostraron comparativamente buen desempeño en materia de predicción frente a un modelo autorregresivo periódico de primer orden ARMA (1) y el modelo de Monte Carlo, con la diferencia que en los modelos de redes neuronales artificiales estamos involucrando más variables de

significado físico en el proceso modelado que corresponde a la evapotranspiración de referencia.

Siña et. al. (2010), las redes neuronales artificiales desde el punto de vista de predicción de caudales mensuales, muestra un comportamiento excelente en términos de las estadísticas de los errores de predicción; mas aun cuando de manera comparó con un modelo autorregresivo periódico de primer orden — PAR (1), mostrando un grado superior de eficiencia en las predicciones realizadas, ya que presentan porcentajes de ajuste superiores al 80%, en comparación al 62% que presenta el modelo de serie de tiempo estocástica. Dichos resultados son altamente promisorios y sugieren que el enfoque propuesto tiene mejores rendimientos que los modelos de series temporales estocásticas en términos de error de predicción, eficiencia y estimación de picos.

Ballini (2000), menciona que la teoría de redes neuronales artificiales tuvo inicio en 1943 con el trabajo de McCulloch y Pitts en el que se desarrolló el primer modelo matemático para una neurona biológica. El modelo fue propuesto como una unidad de procesamiento binaria

describiendo un cálculo lógico que procura simular la forma, el comportamiento y las funciones de una neurona biológica.

De Jong. (1999) a inicios de los sesentas, las computadoras se volvían cada vez más asequibles y menos costosas. Muchos investigadores en Estados Unidos, se sintieron atraídos por el potencial de estas máquinas.

Karr and Freeman (1999) una de estas personas fue el ingeniero y a la vez sicólogo, John H. Holland. Él, además de su interés por las computadoras, se concentró en otra materia: el estudio de los mecanismos observados en la naturaleza concernientes a la adaptación de las especies. Quiso entonces Holland aplicar dichos mecanismos en la creación de sistemas artificiales (sistemas simulados por computadora). Estas investigaciones llevaron al surgimiento de una metodología denominada los algoritmos genéticos. Dichos algoritmos se pueden considerar entonces, como la adaptación de teorías evolutivas a procedimientos artificiales para la resolución de problemas. Es por esta razón que en los algoritmos genéticos (o AGs) se encuentran vocablos tales como cromosomas, poblaciones o mutaciones.

Goldberg (1989) años después con su tesis doctoral, *Adaptation in Natural and Artificial Systems* (1975) y con la labor de sus estudiantes en la Universidad de Michigan, Holland dio origen a la teoría formal y al empleo de los algoritmos genéticos.

Goldberg (1989) campos como la economía, la investigación de operaciones, la medicina, la inteligencia artificial y las ingenierías, se vieron beneficiados por esta nueva metodología.

A pesar de todas las aplicaciones reales que se le están dando en el mundo, en el Perú su uso es aún incipiente. Existe además una ausencia de material de referencia básico sobre el tema, sobretodo enfocado a la ingeniería de recursos hídricos, geotecnia y otras ingenierías. Es por esta razón, que se vio conveniente realizar el presente trabajo. Se busca así, incentivar posteriores investigaciones de ingeniería en nuestro país. Para ello, este trabajo dará no sólo un marco teórico adecuado, sino un software ilustrativo para el estudio de un caso en una cuenca de la región Tacna relacionado con la hidroinformática, materia especializada en la ingeniería de recursos hídricos.

Algunos ingenieros todavía no habrán oído hablar de algoritmos genéticos (AGs). Otros sí, pero casi siempre, junto a este tema

también se oye hablar de redes neuronales, lógica difusa, sistemas expertos, etc. Bajo todos estos términos se esconde una ciencia, la inteligencia artificial (IA). Para aquellos escépticos que piensan que la inteligencia artificial no tiene relevancia alguna en la ingeniería civil, la presente sección permitirá al menos, sospechar lo contrario.

Los algoritmos genéticos, de cuyas bondades se hablará en otras secciones, son de hecho una de las tantas herramientas computacionales (llámense sistemas inteligentes) que le ha legado la inteligencia artificial a científicos e ingenieros de otras áreas. Aunque no fueron precisamente investigadores en IA los que inventaron la teoría de los AGs (ni mucho menos los que ejercen la ingeniería civil), vale la pena detenerse por un momento para comprender varios aspectos de esta ciencia: ¿Qué quiere decir que un algoritmo genético sea un sistema inteligente? ¿Dónde se ubican los AGs dentro de este conjunto de herramientas computacionales? La inteligencia artificial es así, un buen punto de partida para comprender quiénes son los algoritmos genéticos.

McCarthy et al. (1955) el término “inteligencia artificial” fue propuesto inicialmente por el matemático John McCarthy en 1955 y fue adoptado luego en el verano de 1956 tras una convención que él

organizó en el Dartmouth College de los Estados Unidos según RUSSELL and NORVIG. (1995). Aunque desde la segunda guerra mundial, ya se habían comenzado a plantear las primeras ideas y los primeros trabajos, fue hasta dicha convención que se reconoció formalmente el nacimiento de esta nueva ciencia y se acordó bautizarla con el nombre de inteligencia artificial.

Russell and Norvig. (1995) aunque decir cuándo se originó la Inteligencia Artificial (IA) es tal vez fácil, definirla no lo es. No existe todavía un consenso entre los expertos al respecto. Sin embargo, todos ellos al definirla recaen de alguna u otra forma en uno de los siguientes cuatro conceptos.

Copeland (1996) estos cuatro conceptos o filosofías, dieron origen a dos corrientes diferentes: la IA humana y la IA ajena. En general, las dos corrientes se proponen crear sistemas que actúen o piensen racionalmente. Sin embargo la primera exige además, que estas propiedades se logren tal como lo hace el ser humano.

Russell and Norvig. (1995) con estas metas, la inteligencia artificial a través de sus investigaciones comenzó a alimentarse de diferentes

filosofías (materialismo, empirismo, positivismo lógico, etc) y de diferentes ciencias (matemáticas, lógica, psicología, informática, lingüística, etc). Este proceso la enriqueció convirtiéndola entonces en una ciencia multidisciplinaria. Prueba de ello, es el hecho de algunos de los primeros investigadores en IA procedían de diferentes contextos: Warren McCulloch , era neurofisiólogo, Bruce Buchanan y Joshua Lederberg eran filósofo y genetista respectivamente .

Hopgood (2001) hoy en día siete décadas después, la inteligencia artificial ha hecho avances, creando sistemas novedosos, interesantes, complejos en algunos casos, pero que todavía no llegan a esa meta exigente de generar una actuación o un pensamiento verdaderamente racional. No obstante, los sistemas que se han logrado hasta el momento, han llegado a un grado tal de sofisticación que ahora, científicos e ingenieros de otras áreas se han visto interesados en sacarles provecho para sus respectivas disciplinas. Hopgood (2001) estos sistemas son en general herramientas computacionales o software, que algunas personas se atreven a denominar sistemas inteligentes (ver Figura 2). Russell and Norvig. (1995) en realidad, este despertar de las otras ciencias

por la IA no es reciente. El empleo de los sistemas inteligentes en la industria por ejemplo, ya se ha venido dando en los países desarrollados desde 1980. Los sistemas expertos, las redes neuronales, los agentes y los algoritmos evolutivos son ejemplos de sistemas inteligentes, los cuales están dotados de competencias que les permiten enfrentar situaciones que involucren algún tipo de racionalidad, lógica o matemática. Hopgood los divide en dos grandes grupos: el hardcomputing o sistemas basados en el conocimiento y el softcomputing. Según él, el primer grupo incluye a aquellos programas computacionales que basan su éxito en la posesión y aprovechamiento de determinados conocimientos, que pueden ser en algún momento dados a conocer al ser humano. Por otro lado en el softcomputing, los buenos resultados que ha arrojado este software y el entendimiento que se tiene de él, permite concluir que también maneja conocimientos pero que no pueden ser interpretados por el humano. Esta imposibilidad para poder hacer tangible dicho conocimiento hace que estos programas adquieran el nombre de soft (suave). En cambio el hardcomputing indica que su conocimiento sí se puede materializar en un código interpretable, en algo hard (duro).

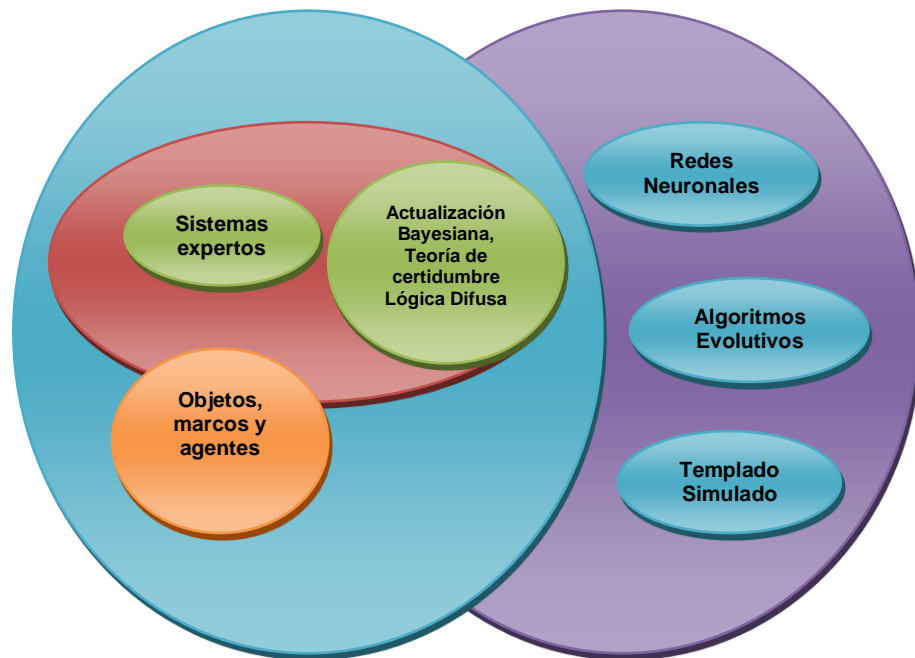
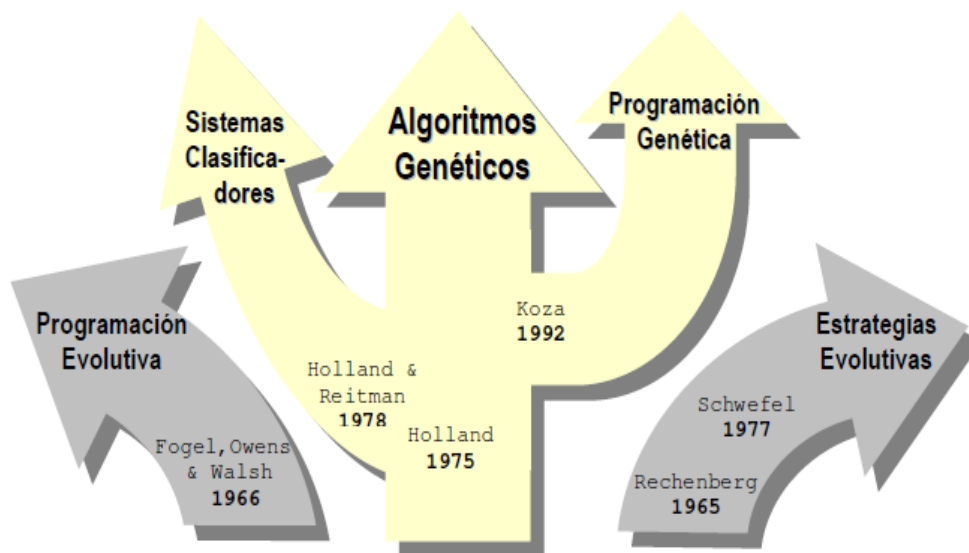


Figura 2 Categorías de Sistemas Inteligentes, según Hopgood (2000)

Otras de las herramientas con gran éxito son los algoritmos evolutivos. La Figura 3 muestra cómo fueron apareciendo a través de la historia. Como se puede ver allí, la denominación de algoritmos evolutivos hace referencia a cinco clases de sistemas: estrategias evolutivas, programación evolutiva, algoritmos genéticos, programación genética y sistemas clasificadores



- 1966 FOGEL, L.J., A.J. OWENS & M.J. WALSH. *Artificial Intelligence Through Simulated Evolution*. John Wiley & Sons. Nueva York, EE.UU.
- 1965 RECHENBERG, I. *Cybernetic Solution Path of an Experimental Problem*. Trad. B.F. Toms. Traducción No. 1122 de la Royal Aircraft Establishment. Inglaterra.
- 1975 HOLLAND, J.H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Universidad de Michigan. Ann Harbor, EE.UU.
- 1977 SCHWEFEL, H.P. *Evolutionsstrategie und Numerische Optimierung*. Disertación Doctoral. Universidad Técnica de Berlín. Berlín, Alemania.
- 1978 HOLLAND, J.H. & J.S. REITMAN. *Cognitive Systems Based on Adaptive Algorithms*. Pattern Directed Inference Systems. Eds. D.A. Waterman & F. Hayes-Roths. Pág. 313-329. Academic Press. Nueva York, EE.UU.
- 1992 KOZA, J.R. *Genetic Programming*. MIT Press. Cambridge, Massachusetts, EE.UU.

Figura 3 Desarrollo de los algoritmos evolutivos

De Jong and Spears (1993) en un principio, se trataba de tres enfoques totalmente diferentes. Por un lado estaban las estrategias evolutivas, las cuales se crearon para resolver el problema específico del diseño óptimo de alas en aeronaves. Se desarrollaron principalmente en Alemania. DUMITRESCU et al. (2000) por otro

lado se creó la programación evolutiva para desarrollar sistemas con la inteligencia para predecir un estado de algún tipo de ambiente.

De Jong. (1999) la tercera herramienta, los algoritmos genéticos, surgen del interés de su creador John H. Holland por diseñar e implementar sistemas robustos con características de adaptación a ambientes cambiantes y con incertidumbre. Así, los algoritmos genéticos no se desarrollaron a priori para desarrollar alguna clase especial de problemas. Posteriormente, los sistemas clasificadores y la programación genética nacieron como variaciones de los algoritmos genéticos.

De Jong and Spears. (1993) a pesar de sus diferencias, todas estas herramientas describen procesos muy similares. Es más, existe actualmente un gran interés por combinarlos de alguna u otra manera para así crear mejores herramientas. Los algoritmos evolutivos pueden definirse de manera general como sistemas que emplean procesos inspirados en la evolución natural para la resolución de problemas de búsqueda.

Goldberg (1989) estos problemas incluyen:

- Búsqueda de un número o números que maximicen o minimicen una función (optimización numérica).
- Búsqueda del orden adecuado de unos elementos para mejor satisfacer una condición (optimización combinatoria).
- Búsqueda de unas reglas que permitan comprender patrones (aprendizaje de máquina).
- Búsqueda de estrategias a seguir en juegos (y por extensión en situaciones reales).
- Búsqueda de unas líneas de código que generen un programa para resolver un problema (este es principalmente el objetivo de la programación genética).

Los procesos inspirados en la evolución son principalmente los de reproducción y la selección natural. Se ha observado cómo en la naturaleza existen poblaciones de individuos que buscan sobrevivir. Los más aptos que sí lo logran son los que también logran una mayor cantidad de descendencia. De manera análoga, en los algoritmos evolutivos se parte de poblaciones (grupos de posibles soluciones). Aquellos que tengan un mejor desempeño, se les permitirá entonces sobrevivir para que luego se puedan reproducir

sexual o asexualmente, generando así hijos (nuevas soluciones candidatas).

Hopgood (2001) como es de esperar, las aplicaciones reales que se le están dando a los algoritmos evolutivos involucran en muchos casos el empleo algoritmos genéticos. Más ahora cuando se está explorando la combinación de los algoritmos evolutivos entre sí y la combinación con otros sistemas inteligentes. He aquí una breve muestra de todas las aplicaciones que están teniendo los algoritmos evolutivos en el área de la ingeniería:

- Diseño de componentes aerodinámicos (DaimlerChrysler AG) – estrategias evolutivas.
- Optimización de cronogramas de semáforos (Ministerio Holandés de Tráfico) – estrategias evolutivas.
- Optimización de redes viales – estrategias evolutivas.
- Optimización en la programación del mantenimiento y rehabilitaciones de los pavimentos – programación evolutiva.
- Procesamiento de imágenes satelitales – sistemas clasificadores.
- Control de gasoductos – sistemas clasificadores.

- Diseño de redes de comunicaciones – algoritmo evolutivo.

En tal sentido por lo descrito anteriormente podemos afirmar, que los algoritmos genéticos son una de las tantas herramientas de la inteligencia artificial que están teniendo gran aplicación tanto en la ingeniería como en otros campos.

CAPITULO III

MATERIALES Y METODOLOGÍA

3.1. Recopilación de información y fuente de datos

En la región Tacna, específicamente en la zona de estudio hay información hidrometeorológica existente en diferentes entidades públicas y privadas como por ejemplo la Autoridad Local del Agua (ALA) y en el Proyecto Especial Tacna (PET), así mismo en SENAMHI.

En el Cuadro 1, se muestra las estaciones involucradas en el ámbito de la cuenca en estudio. Se observa que se dispone de variables hidrometeorológicas como ser precipitación, descargas medias, máximas y mínimas, evaporación, temperatura media, máxima y mínima.

Asimismo podemos observar que los periodos de registro de dichas estaciones son de diferente longitud, lo que dificulta en cierta medida la labor preliminar por lo que se requiere recurrir a técnicas de homogenización, completación y extensión de dichos registros.

Cuadro 1 Estaciones hidrometeorológicas ámbito de la cuenca

NUMERO	CUENCA	VARIABLE HIDROLOGICA	CODIGO	ESTACION	NORTE	ESTE	ALTITUD	PERIODO DE REGIST	FUENTE
197	MAURE	PRECIPITACION TOTAL	19151101	CHUAPALCA	8172500	433000	4250	1964-2006	SENAMHI - PET
198	MAURE	PRECIPITACION TOTAL	19151102	CHALLAPALCA	8095700	418800	4250	1964-2006	SENAMHI - TACNA
199	MAURE	PRECIPITACION TOTAL	19151103	VILACOTA	8106000	392000	4390	1964-2006	SENAMHI - PET
200	MAURE	PRECIPITACION TOTAL	19151104	KOVIRE	8098500	403800	4350	1990-2006	PET
201	MAURE	DESCARGAS MEDIAS	19151112	CHALLAPALCA	8095700	418800	4230	1964-1973	SENAMHI - TACNA
202	MAURE	DESCARGAS MEDIAS	19151116	LA FRONTERA	8075830	450000	4000	1964-2006	SENAMHI - PET
203	MAURE	DESCARGAS MEDIAS	19151113	VILACOTA	8106000	392000	4400	1964-2012	SENAMHI - PET
204	MAURE	DESCARGAS MEDIAS	19151114	KOVIRE(bofedal)	8098500	403800	4350	1988-2012	PET
205	MAURE	DESCARGAS MEDIAS	19151117	CHILICULCO	8099580	423520	4400	1989-1996	PET
206	MAURE	DESCARGAS MEDIAS	19151118	OJOS COPAPUJO	8092330	435330	4235	1990-1996	PET
207	MAURE	DESCARGAS MEDIAS	19151119	MAMUTA N°01	8088670	431670	4250	1990-1997	PET
208	MAURE	DESCARGAS MEDIAS	1915111A	MAMUTA N°02	8088670	431670	4250	1990-1997	PET
209	MAURE	DESCARGAS MEDIAS	19151111	CHUAPALCA	8088000	433000	4158	1963-2008	SENAMHI - PET
210	MAURE	DESCARGAS MEDIAS	1915111B	ENTRADA KOVIRE	8088000	433000	4391	1996-2008	PET
211	MAURE	DESCARGAS MAXIMAS	19151122	CHALLAPALCA	8095700	418800	4230	1963-1973	SENAMHI - TACNA
212	MAURE	DESCARGAS MAXIMAS	19151126	LA FRONTERA	8075830	450000	4000	1991-2006	SENAMHI - PET
213	MAURE	DESCARGAS MAXIMAS	19151123	VILACOTA	8106000	392000	4400	1964-2003	SENAMHI - PET
214	MAURE	DESCARGAS MAXIMAS	19151124	KOVIRE BOFEDAL	8098500	403800	4350	1988-2006	PET
215	MAURE	DESCARGAS MAXIMAS	19151127	CHILICULCO	8099580	423520	4400	1989-1996	PET
216	MAURE	DESCARGAS MAXIMAS	19151128	OJOS COPAPUJO	8092330	435330	4235	1990-1996	PET
217	MAURE	DESCARGAS MAXIMAS	19151129	MAMUTA N°01	8088670	431670	4250	1990-1997	PET
218	MAURE	DESCARGAS MAXIMAS	1915112A	MAMUTA N°02	8088670	431670	4250	1990-1997	PET
219	MAURE	DESCARGAS MAXIMAS	19151121	CHUAPALCA	8088000	433000	4158	1963-2006	SENAMHI - PET
220	MAURE	DESCARGAS MINIMAS	19151132	CHALLAPALCA	8095700	418800	4230	1964-1973	SENAMHI - TACNA
221	MAURE	DESCARGAS MINIMAS	19151136	LA FRONTERA	8075830	450000	4000	1991-2006	SENAMHI - PET
222	MAURE	DESCARGAS MINIMAS	19151133	VILACOTA	8106000	392000	4400	1964-2003	SENAMHI - PET
223	MAURE	DESCARGAS MINIMAS	19151134	KOVIRE BOFEDAL	8098500	403800	4350	1988-2002	PET
224	MAURE	DESCARGAS MINIMAS	19151137	CHILICULCO	8099580	423520	4400	1989-1996	PET
225	MAURE	DESCARGAS MINIMAS	19151138	OJOS COPAPUJO	8092330	435330	4235	1990-1996	PET
226	MAURE	DESCARGAS MINIMAS	19151139	MAMUTA N°01	8088670	431670	4250	1990-1997	PET
227	MAURE	DESCARGAS MINIMAS	1915113A	MAMUTA N°02	8088670	431670	4250	1990-1997	PET
228	MAURE	DESCARGAS MINIMAS	19151131	CHUAPALCA	8088000	433000	4166	1963-2006	SENAMHI - PET
229	MAURE	EVAPORACION TOTAL	19151144	KOVIRE BOFEDAL	8098500	403800	4350	1990-2006	PET
230	MAURE	EVAPORACION TOTAL	19151141	CHUAPALCA	8172500	433000	4250	1994-2006	SENAMHI - PET
231	MAURE	EVAPORACION TOTAL	19151143	VILACOTA	8106000	392000	4390	1994-2004	SENAMHI - PET
232	MAURE	TEMPERATURA MAXIMA	19151163	VILACOTA	8106000	392000	4400	1997-2006	SENAMHI
233	MAURE	TEMPERATURA MAXIMA	19151161	CHUAPALCA	8172500	433000	4250	1997-2006	SENAMHI
234	MAURE	TEMPERATURA MINIMA	19151173	VILACOTA	8106000	392000	4400	1997-2006	SENAMHI
235	MAURE	TEMPERATURA MINIMA	19151171	CHUAPALCA	8172500	433000	4250	1997-2006	SENAMHI
236	MAURE	TEMPERATURA MEDIA	19151153	VILACOTA	8106000	392000	4400	1997-2006	SENAMHI
237	MAURE	TEMPERATURA MEDIA	19151151	CHUAPALCA	8172500	433000	4250	1997-2006	SENAMHI

En todo estudio hidrológico, y este propio es necesario efectuar el análisis climático y de precipitación, por tanto se recurrió a los registros mensuales de las estaciones. Los parámetros existentes son precipitaciones mensuales, evaporación mensual, temperatura mínima, media y máxima mensual.

3.2. Aspectos Geológicos y Geomorfológicos

Geológicamente, la zona alta y empinada de la Cuenca Maure-Uchusuma está conformada por material rocoso, al parecer lavas volcánicas. La zona baja está cubierta de restos de morrenas, conformadas por arenas, polvo de roca y bloques de gran variedad de tamaño desde guijarros hasta grandes peñascos.

En colinas de poca elevación se nota la presencia de aglomerados en montos clásticos y superficiales. Bajo esta cobertura superficial yace una roca clástica, al parecer tufos volcánicos procedentes de cenizas de volcanes depositados por densidad porosa y de débil cimentación, esta roca presenta un buzamiento casi horizontal extendiéndose por gran parte de la cuenca.

Debido a la porosidad del tufo volcánico, la cuenca muestra un fuerte índice de infiltración y gran retentividad de las aguas de precipitación, constituyendo así un reservorio natural, lo que explica el caudal casi constante que presenta el río Maure pese al largo período seco (Abril – Noviembre).

Las unidades geomorfológicas más importantes de la cuenca del río Maure son:

3.2.1. Altiplano

Se encuentra delimitado por las cadenas Occidentales y Orientales de la Cordillera de los Andes, diferenciándose dos geoformas topográficas:

Planicies: Estas planicies y pampas son llanuras aluviales, producidas por rellenos parciales de cuencas relativamente cerradas. En las nacientes de los ríos y quebradas que dan origen a estas pampas se aprecia la acción de erosión fluvial con un proceso de encauzamiento. Los ríos y riachuelos que discurren por éstas, forman bofedales que le dan un matiz especial al paisaje de los valles que surcan estas planicies.

Lomadas: Son una sucesión de colinas bajas y ligeramente convexas. Están constituidas por morrenas o materiales

fluvioglaciares que conforman pequeñas colinas y en algunos casos tienen en la cima bloques de composición diferente asociados al volcánico Barroso, se desarrollan sobre depósitos lacustres de compactación moderada y de posición horizontal con suave inclinación.

3.2.2. Cadenas y Conos Volcánicos

Comprenden la Cordillera del Barroso en las nacientes de las cuencas y las cadenas y conos volcánicos que circundan las lomadas y pampas. Estas geoformas están íntegramente relacionadas con el volcanismo que dio origen a los conos del Grupo Barroso. Tienen elevaciones hasta de 5400 msnm.

También se aprecia en esta unidad a las rocas volcánicas de poca inclinación que circundan a los conos formando colinas cortadas por gran número de quebradas.

En los grandes volcanes el drenaje es radial, adquiriendo forma dendrítica cuando continúan por las pampas. Dentro del aspecto geomorfológico, las cuencas altas del Maure y Uchusuma están conformadas por altiplanicies con relieve

plano ondulado, con pendientes de 4 a 15%, a nivel de la cuenca Caplina.

En la parte alta presenta ambientes montañosos, caracterizados por laderas empinadas y valles encañonados; a nivel medio y bajo se presentan ambientes de colinas y planicies costeras fluvio-aluviales.

3.3. Análisis Climático e hidrología

Según Álvarez (2009), a pesar de su relieve geográfico, los factores climáticos en la zona Altiplánica varían muy poco de un sitio a otro, a excepción del flanco occidental de los Andes.

Generalmente el clima en el altiplano es seco y frío, se encuentra caracterizado por una fuerte insolación y cambios bruscos de temperatura entre el día y la noche, este fenómeno es más acentuado durante el invierno austral; en este mismo período son muy frecuentes las heladas y escarchadas, los vientos son persistentes principalmente por las tardes y corrientemente adquieren las características de ventarrones; asimismo, en determinados sitios se producen ventiscas.

Se considera en esta zona dos tipos de clima que corresponden a tres sistemas de influencia diferentes:

3.3.2. Clima del Altiplano

Caracteriza a la zona alta las precipitaciones que se concentran en un solo período húmedo (Abril - Noviembre).

Durante las épocas de lluvias se presentan continuas tempestades, caracterizadas por fuertes granizadas y nevadas a las que casi siempre preceden o acompañan intensos fenómenos eléctricos con sus consiguientes truenos de mucho ruido. Las nevadas también suelen presentarse ocasionalmente en cualquier época del año.

Todas las estaciones meteorológicas se encuentran ubicadas en altitudes mayores a 4250 m.s.n.m. Las características principales de estos elementos son:

Temperatura Presenta temperaturas máximas que varían de 20 °C a 14 °C. Las temperaturas mínimas varían de 0 °C a -10 °C.

Precipitación La precipitación total anual promedio varía de 220 mm a 420 mm.

Evaporación El promedio de la evaporación mensual total varía desde 203,1 mm (Octubre) a 90,8 mm (Junio), con un promedio mensual anual de 131,0 mm. En el flanco occidental andino el ambiente es menos seco y más

abrigado, las precipitaciones son mayormente líquidas e intensas durante el verano austral, aunque no es raro que se produzcan lluvias esporádicas en cualquier época del año.

3.3.3. Clasificación Climática

Para efectuar la clasificación climática de la zona de estudio se utilizó el “Diagrama bioclimático para la clasificación de zonas de vida en el mundo” propuesto por L. R. Holdridge. Dicho diagrama de clasificación climática utiliza para clasificar el clima valores de precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial.

De los registros existentes se obtuvo los siguientes valores medios:

Precipitación Media Anual : 357,83

mm/año

Evapotranspiración Potencial Promedio :157,0

mm/año

Temperatura Media Anual : 3,50 °C

De acuerdo a estos valores y utilizando el diagrama de Holdridge mostrado en la figura No. 04, el clima de la cuenca

Maure puede clasificarse de la siguiente manera:

Provincia de Humedad	: Húmeda.
Región Altitudinal	: Boreal.
Piso Altitudinal	: Subalpino ó Subandino.
Clasificación Holdridge	: Páramo Húmedo

Es característica de este tipo de clima la presencia de laderas inclinadas, conformantes en este caso de la cuenca hidrográfica del río Maure. Suelos medianamente profundos, van desde litosoles, gleysoles y orgánicos. La vegetación está constituida de Ichu, pajonales, quinual, gynoxys y cactus yareta.

Se muestra el diagrama de Holdrige, con la clasificación climática respectiva.

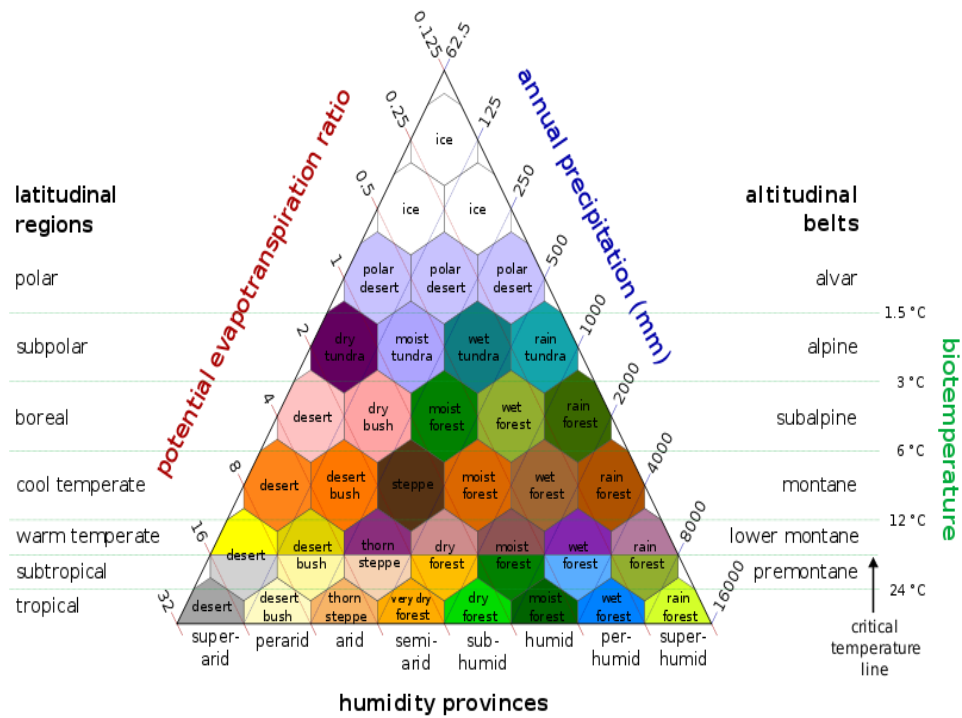


Figura 4 Diagrama de Holdrige (1967)

3.4. HIDROGRAFÍA E HIDROLOGÍA

Las nacientes del río Maure-Uchusuma corresponden a la vertiente del Titicaca, se ubican próximos a la divisoria de las aguas, desplazándose los ríos Maure y Uchusuma Alto con predominio en dirección Nor Oeste - Sur Este.

Las cuencas de los ríos muestran una forma alargada y de ancho aproximadamente uniforme, con un estrechamiento en su desembocadura, como es el caso del río Maure en la estación

Chuapalca, y a excepción del río Uchusuma Alto cuyo ancho disminuye progresivamente de su nacimiento a su desembocadura.

El régimen de los ríos es irregular, observándose crecidas durante el verano austral, el resto del año las descargas presentan variaciones moderadas, siendo alimentadas únicamente por el deshielo de los nevados y la descarga de los acuíferos subterráneos. En el Cuadro 2 se muestran las características hidrográficas de la cuenca Maure Uchusuma.

Cuadro 2 Características Hidrográficas Maure-Uchusuma

RÍO	PROGRESIVA (km.)	ALTITUD (m s.n.m.)	AREA (km ²)	LUGAR
Maure	0	4,085	1,617	h.f. con Bolivia
	52	4,200	556	h.e.a. Challapalca
	89	4,400	57	h.e.a. Vilacota
	96	4,450	0	naciente
Uchusuma	0	4,100	506	h.f. con Chile
	42	5,400	0	naciente
Caño	0	4,100	189	h.f. con Bolivia
	24	4,250	0	naciente

Fuente: Proyecto Especial – Tacna

Hidrológicamente se cuenta con las estaciones de registro de descargas: Puente Uchusuma sobre el río Uchusuma; Vilacota, sobre el río Quilvire; Challapalca, Chuapalca y Frontera sobre el río Maure. La cuenca del río Quilvire, afluente de la laguna Vilacota está ubicada a

altitudes del orden de los 4 700 m.s.n.m., sus principales aportes son afloramientos de aguas subterráneas que descargan en la laguna Vilacota en forma sub-superficial y superficial. La laguna Vilacota ubicada a altitudes superiores a los 4 350 m.s.n.m., durante todo el período seco y gran parte del período húmedo se comporta como una cuenca cerrada.

La zona específica de interés, corresponde a la estación Vilacota, sobre el río Quilvire. Esta estación tiene las características que se muestran en el Cuadro 3. La data de esta estación corresponde al periodo 1964 al 2012, lo que hace que dicha información sea de buena longitud de registro y permita la calibración del modelo precipitación escurrimiento con garantía.

Cuadro 3 Características de la Estacion Vilacota Rio Quilvire

CODIGO DE ESTACION	19151113				
NOMBRE DE ESTACION	VILACOTA			LONGITUD	70° 04'
CATEG. DE ESTACION	LIMNIMETRICA	DPTO.	TACNA	LATITUD	17° 02'
CUENCA	MAURE	PROV.	TARATA	ALTITUD	4 400 m.s.n.m
RIO	QUILVIRE	DIST.	SUSAPAYA	FUENTE	PET - SENAMHI

Fuente: Proyecto Especial – Tacna

3.5. ALGORITMOS GENETICOS

Definirlos no es fácil ya que actualmente se emplean diferentes estilos de algoritmos genéticos. No obstante, entre todos estos resalta el empleado por Holland en 1975 para explicar sus fundamentos teóricos, el cual es conocido como algoritmo genético simple (simple genetic algorithm). A continuación se dará una definición que intenta ser comprensiva de todas estas formas. Luego se explicará en detalle el algoritmo genético simple, lo cual servirá de base para poder mencionar las características de los AGs en general, el tipo de problemas a los que se pueden enfrentar y las diferentes formas que pueden adquirir.

3.5.1. Definición

Los algoritmos genéticos son una secuencia de pasos que:

- A partir de un conjunto de posibles soluciones a un determinado problema.
- Los codifica en cadenas de caracteres (llámense cromosomas).
- Los manipula iterativamente mediante funciones que simulan los procesos de selección natural, reproducción y mutación encontrados en la naturaleza.
- Genera así la solución que mejor satisfaga al problema.

La definición no habla de procesos computacionales. Sin embargo, la necesidad de realizar manipulaciones iterativas (o cálculos tediosos) con las cadenas, implica obligatoriamente programar en algún lenguaje computacional. Ahora bien, vale la pena hacerse las siguientes preguntas: (1) ¿qué tipos de problemas se podrán resolver? (2) ¿Cómo se realiza tal codificación con cromosomas? (3) ¿Cómo serán las funciones que simulan la naturaleza? La siguiente sección las responde para el caso del algoritmo genético simple. El algoritmo genético simple. Denominado también algoritmo genético estándar (canonic genetic algorithm), pareciera estar diseñado exclusivamente para problemas de optimización matemática.

La función a maximizar se denomina función objetivo (objective function). La secuencia de pasos se describe en la Figura 5. En ella se aprecian vocablos novedosos traídos de la biología tales como, población (population), individuos (individuals), aptitud (fitness), entrecruzamiento (crossover) y mutación (mutation).

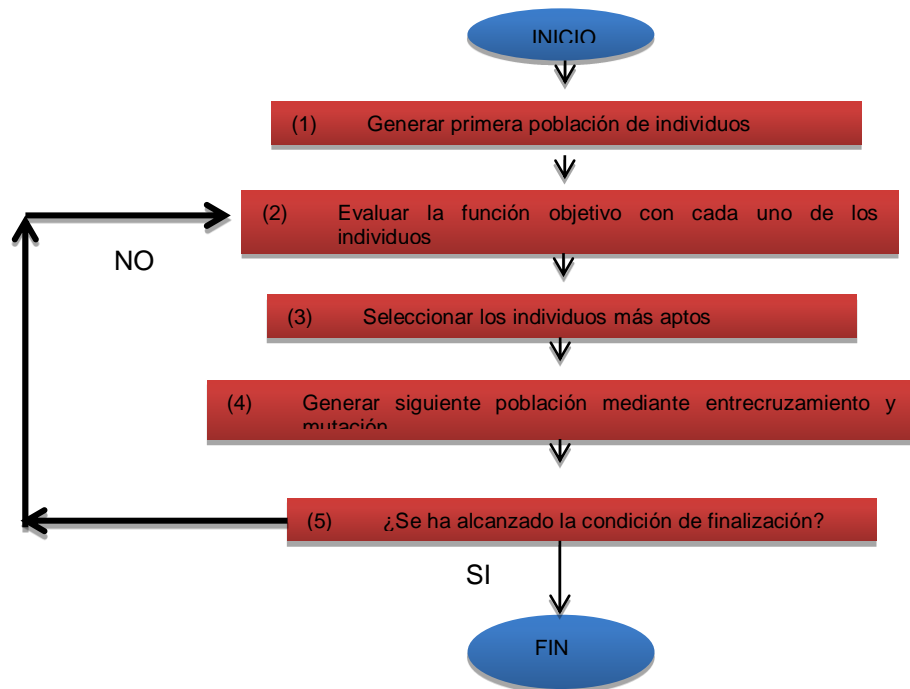


Figura 5 Diagrama de flujo de un algoritmo genético simple (Este esquema está basado en LIONG, CHAN and SHREERAM)

3.5.2. Características de los Algoritmos Genéticos

Habiendo ya definido un algoritmo genético simple, se podrá ahora comprender algunas de las características más relevantes que poseen los AGs en general. Información interesante se obtiene cuando se les compara con otros métodos de optimización matemática. Golberg cita las siguientes cuatro propiedades:

- Los AGs funcionan simplemente gracias a los valores que va arrojando la función objetivo. Aquí no se requiere ningún otro tipo de información (como valores de derivadas o propiedades particulares de la función). Esta característica abre las puertas para que puedan ser aplicados a un sin número de funciones. No importa qué función objetivo se esté empleando, lo único que importa es que arroje valores. Métodos tradicionales de optimización basados en el cálculo requieren que la función objetivo sea derivable y/o continua. El método símplex requiere que la función objetivo sea lineal. Otros métodos enumerativos como la programación dinámica requieren que el espacio de búsqueda (el número de posibles soluciones) no sea muy grande ni mucho menos infinito.

- Los AGs realizan la búsqueda de la solución óptima a partir de una población de puntos (es decir, de una población de soluciones o individuos). No lo hacen a partir de un solo punto. Esta característica es importante pues ayuda a que el AG no se estanque en máximos o mínimos locales. El método convencional basado en el cálculo denominado ascenso de máxima pendiente (hill climbing) corre ese riesgo. Éste comienza por ensayar con un punto. Luego busca a su

alrededor en donde haya un mayor gradiente y así, escoge su siguiente punto de búsqueda. Si la función tiene varios picos locales entonces corren el riesgo de no detectar el pico global.

- Los AGs involucran pasos probabilísticos, no determinísticos. La selección por ruleta, el punto de ruptura para el entrecruzamiento, la probabilidad p_c de entrecruzamiento y probabilidad p_m de mutación, todos estos pasos involucran aleatoriedad. Aunque esto haría sospechar que los AGs no sean más que una simple búsqueda al azar y sin dirección, en realidad no son así. Los AGs basan su búsqueda en la selección de los más aptos.

- Los AGs manipulan las soluciones, pero de una manera indirecta. Por eso se dice que los AGs son “ciegos”, pues independientemente del problema que se les proponga, ellos simplemente se limitan a manipular cadenas de caracteres. Esta característica junto con las tres anteriores, hacen de los algoritmos genéticos una herramienta robusta, es decir, de gran aplicación.

3.5.3. Problemas a ser solucionados por los AGs

Gran parte de la investigación en AGs se ha dedicado a la optimización de funciones. Tal como se vio en la explicación del algoritmo genético simple, esto consiste en la búsqueda de un número o números que maximicen o minimicen una función. En otros casos lo importante no es encontrar los números más óptimos sino el orden apropiado de números (u otro tipo de elementos) que mejor satisfagan una función (optimización combinatoria). Aquí entra por ejemplo el problema de cómo distribuir apropiadamente unos objetos para así minimizar los espacios empleados (bin packing).

Sin importar qué tan creativo sea un problema, si se desea que sea resuelto mediante AGs, éste deberá contener una función objetivo que indique cuantitativamente qué tan óptima es cada una de las soluciones que se van encontrando. Así, dentro de este esquema (búsqueda de soluciones que satisfagan una función objetivo) las aplicaciones se extienden a otros problemas, tales como:

- Optimización multi-objetivo, en donde se debe buscar la solución que mejor satisfaga varias funciones objetivo.

- Problemas en donde lo más importante no es encontrar la solución óptima sino un conjunto de soluciones óptimas. Esto sirve como soporte para toma de decisiones.

- Problemas en donde la función objetivo no es una expresión matemática sino que genera un resultado a partir de complejos procesos computacionales, como por ejemplo, evaluación de algún diseño o identificación óptima de imágenes.

- Problemas en donde la función objetivo no es una expresión matemática convencional, sino que está dada por lo que diga una persona o por los movimientos que adopte una persona.

- Desde un punto más biológico, simular procesos evolutivos de la naturaleza mediante algoritmos genéticos.

3.5.4. Críticas a la teoría estándar

La teoría tradicional ha recibido varias críticas sobre su validez. He aquí un breve resumen de algunas de ellas.

- Wolpert y Macready, consideran que existen errores matemáticos en la forma como Holland halló la solución al

problema del tragamonedas de 2 palancas. También le critican no haber considerado otros tipos de estrategias para resolver dicho problema.

- Grefenstette (1993), demostró mediante contraejemplos, que la hipótesis de los bloques constructores no es una explicación válida de cómo el AG converge hacia la solución óptima.

- Aunque es ventajoso el hecho de que un AG procese en paralelo varios juegos (propiedad conocida como paralelismo intrínseco), la teoría estándar asume que dichos juegos son independientes. En realidad esto no es así, y por lo tanto pierde validez la analogía que se ha hecho entre el problema del tragamonedas de k palancas y el de los esquemas.

- El teorema de los esquemas sólo considera selección proporcional o por ruleta. No explica por qué en la práctica, otros métodos de selección han mostrado mejor desempeño (violando así la conclusión que se tenía de que el AG simple explora y explota los bloques constructores de la manera más óptima posible).

3.5.5. Aplicación de los AGs.

Los AGs llaman la atención por poder enfrentarse a funciones multimodales, con grandes espacios de búsqueda, con ruido, etc. Afortunadamente para los AGs, este tipo de problemas se presentan muy a menudo en muchas ciencias e ingenierías.

La ingeniería es por tanto, candidata a ser beneficiada por esta herramienta. Actualmente ya existe una amplia literatura que da prueba del provecho que se le está dando. Los Tablas 4 al 7 presentan algunos ejemplos:

Cuadro 4 Aplicaciones de AGs en el diseño de estructuras

DISEÑO DE ESTRUCTURAS	
HADI and SCHMIDT. [2000] KOUMOUSIS and ARSENIS. 1998.	Diseño óptimo de miembros en concreto reforzado.
CHEN and RAJAN. [1998]	Los AGs como herramienta automática de diseño estructural.
SOH and YANG. 1998. WOODWARD. 2001.	Diseño óptimo de puentes.
SUDARSHAN. 2000.	Diseño de armaduras.

Cuadro 5 Aplicaciones de AGs en la planeación y ejecución de la construcción

PLANEACIÓN Y EJECUCIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN	
NASSAR. 2001.	Toma de decisiones para la compra y venta de equipos.
FENG, LIU and BURNS. [1997]	Programación de actividades de construcción.
O'BRIEN and FISHER. 1997. MAHACHI. [2001]	Programación de actividades y asignación de espacios en la planeación de proyectos.
H AidAR <i>et al.</i> 1999.	Selección óptima de equipos y maquinaria para las actividades de construcción.
NATSUAKI <i>et al.</i> 1995.	Obtención de la secuencia óptima de actividades en la construcción de puentes.
ROTSHEIN. 2001	Diagnóstico de las causas de grietas en edificios.

Cuadro 6 Aplicaciones de AGs en la geotecnia y la sismología

GEOTECNIA Y SISMOLOGÍA	
JIN and WANG. 2001.	Medición de la rugosidad del terreno y la humedad del suelo.
PACHEPSKY and TIMLIN. 1996.	Estimación de la conductividad hidráulica de un suelo cuando las condiciones de frontera son desconocidas.
NISHIMURA, YONEDA and MORISAWA. 1999.	Diseño óptimo de la localización de muestreos en la evaluación de la contaminación de un suelo.
AURNHAMMER, TÖNNIES and GUERICKE.	Correlación de horizontes a través de fallas.
VAN DITZHUIJZEN. 2001.	Parametrización geológica de un modelo de un reservorio.

Cuadro 7 Aplicaciones de AGs en ingeniería de transporte y pavimentos

INGENIERÍA DE TRANSPORTE Y PAVIMENTOS	
CHAN, FWA and HOQUE. 2000. NUNOO. 2001.	Programación del mantenimiento de pavimentos.
CHEU <i>et al.</i> 1998.	Calibración de modelos de tránsito.
CHAKROBORTY, DEB and SRINIVAS. 1998.	Programación óptima de tránsito.
JONG, JHA and SCHONFELD. 2000.	Diseño preliminar de vías.

Otro campo para la aplicación de los algoritmos genéticos es la hidroinformática. Aunque se ha asumido en el presente trabajo qué quiere decir esta rama de la ingeniería, vale la pena definirlo aquí. La hidroinformática es el aprovechamiento de las últimas herramientas computacionales (sistemas inteligentes, tecnologías de comunicación, digitalización de imágenes, etc) en el planeamiento y administración del medio acuático y de las estructuras de ingeniería requeridas. La hidroinformática posee varias características así: (1) muchas veces involucra la simulación y análisis a través de modelos computacionales de los sistemas reales, sean naturales o artificiales; (2) requiere de la buena integración de la ingeniería ambiental, civil, geológica, de sistemas, electrónica, etc; y (3) analiza información proveniente de áreas externas a la ingeniería como la economía, la ecología y las ciencias sociales.

La literatura registra muchas formas de aplicar los AGs en la hidroinformática. Aunque en ella se aprecia un interés por ampliar cada

vez más el alcance de los algoritmos genéticos, casi siempre se aplican como alguna de las siguientes formas:

- 1) Calibración de modelos. La hidroinformática se apoya mucho en la modelación. Cada modelo tiene que ser “ajustado” (o calibrado) para poder ser confiable y así justificar su empleo. Dicha calibración consiste en la búsqueda de ciertos parámetros (valores propios del modelo) que permitan calcular (y simular) los resultados correctamente a partir de la información suministrada. Dicha búsqueda es muchas veces el problema adecuado para ser abarcado por un algoritmo genético. Algunos ejemplos son:

Calibración de modelos hidrológicos. Liong, Chan and Shreeram. 1995. El Harrouni, Ouazar and Cheng. 1998. Liong, Khu, Chan. 1999. Calibración de redes de tubería mediante la estimación de las rugosidades y detección de fugas: Vitkovsky, Simpson and Lambert. 2000.

- 2) Entrenamiento de redes neuronales. Las redes neuronales son, al igual que los algoritmos genéticos, un tipo de sistema inteligente. Constituyen una alternativa novedosa para modelar sistemas en donde existe bastante incertidumbre sobre su funcionamiento.

Estos novedosos modelos también requieren ser calibrados. Así, los AGs también cumplen acá la función de calibrar. Vale la pena anotar que las redes neuronales están teniendo un rápido crecimiento dentro de la hidroinformática, ampliándole también el campo de aplicación a los algoritmos genéticos. He aquí algunos tipos de modelos de redes neuronales donde se estén empleando AGs: Remediación de aguas subterráneas: YAN and MINSKER (2003). Tratamiento de aguas residuales industriales: CHEN, CHANG and SHIEH (2001).

- 3) Soporte para la toma de decisiones mediante la búsqueda de alternativas. Cuando se está planeando una actividad (desarrollo de una región, disposición de desechos, etc), un modelo permite simular un posible escenario de acuerdo a las decisiones que se tomen (es decir, a los valores que se le asignen a sus variables). Si los resultados de dichos modelos se logran cuantificar, se pueden entonces integrar con un algoritmo genético que permita proponer la alternativa más óptima o un grupo de alternativas óptimas para una posterior toma de decisiones. He aquí algunos ejemplos: Obtención de alternativas para lograr el desarrollo sostenible de una región: CAI, MCKINNEY and LASDON. [2001]. Distribución

óptima de sistemas de contención contra inundaciones: YEH and LABADIE. 1997. Modificaciones de cauces según las necesidades de la zona. GOOSENS, VAN DEN BOOGAARD and DOUBEN. 2000. Remediación de aguas subterráneas considerando tiempos de operación, número de pozos, tasas de bombeo, etc. GÜMRAH et al. 2000. Selección económica y segura de tecnologías para el tratamiento o disposición de contaminantes en cuerpos de agua. (VÁSQUEZ et al. 2000). Optimización de embalses para la obtención de energía, suministro de agua y reducción de costos. SHARIF and WARDLAW. (1998).

- 4) Diseños óptimos. Este problema es similar al anterior pero aplicado a estructuras. Aquí se busca determinar las propiedades que generen el acueducto, el alcantarillado o la presa más económica (y que cumpla con requisitos de presión, energía, etc). He aquí algunos ejemplos: Diseño de redes de tubería mediante la mejor selección de diámetros: LIPPAL, HEANEY and LAGUNA (1999). SOLOMATINE (1999). Distribución óptima de válvulas en una red para reducir riesgos por fugas. REIS, PORTO and CAHUDHRY (1997). Optimización (o rehabilitación) de redes mediante cambios de diámetros y adición, remoción, limpieza o alineación de tubos:

LIPPAI, HEANEY and LAGUNA (1999). SOLOMATINE (1999). CISTY (2000). HALHAL et al. (1997). MURPHY and SIMPSON (1992). Diseño de determinados componentes de presas y selección preliminar de alternativas (sitios, tipos de túneles de presión, lugares de extracción de material, tipos de presas, etc). Esta búsqueda es importante en la parte inicial del proyecto, cuando no se cuenta con información completa. PARMEE (1998).

3.6. MODELO HIDROLOGICO DE THOMAS

Muchos temas de la hidrología están dedicados a la predicción del comportamiento de una cuenca ante los diversos factores. Estos comportamientos se pueden observar en los caudales de sus ríos, en la recarga de sus acuíferos, en la erosión de sus suelos, etc. Y entre estos comportamientos, poder predecir los caudales que salen de sus sistema de drenaje constituye una de los grandes herramientas con que cuenta el hombre para enfrentar problemas tales como abastecimiento de agua, control de inundaciones, dimensionamiento de estructuras hidráulicas, irrigación de cultivos, etc. Esta predicción de caudales se hace, una vez se conoce qué precipitación (y qué evapotranspiración) ha habido sobre la cuenca, a través de modelos lluvia-escorrentía.

La Figura 6 muestra cómo el sistema artificial (llámese modelo lluvia-escorrentía) busca poder simular el sistema natural (llámese cuenca) para así poder predecir el caudal a partir del conocimiento de la precipitación y la evapotranspiración en un determinado período de tiempo.

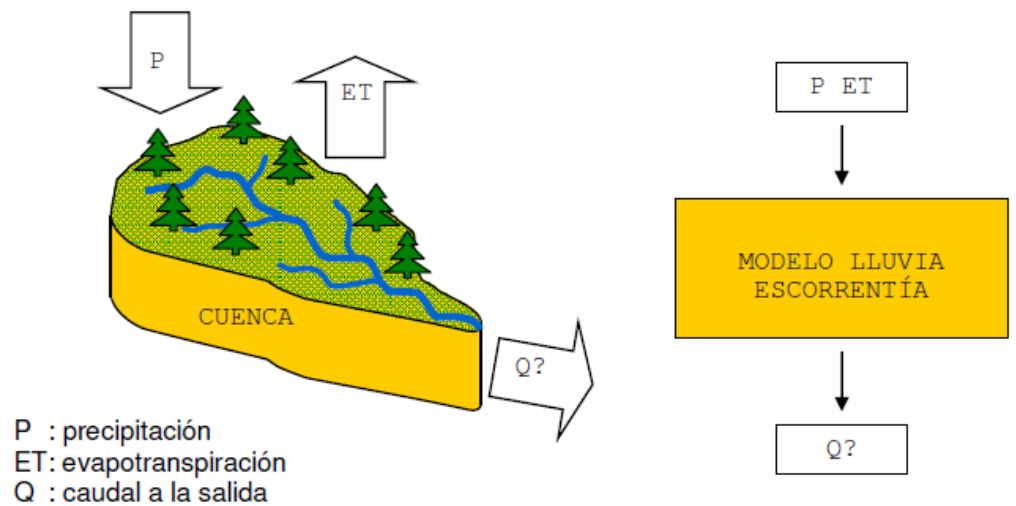


Figura 6 Representación de una cuenca mediante un modelo lluvia-escorrentía

La Figura 7, permite observar lo que existe en el interior un modelo lluvia escorrentía. Éste estaría compuesto por:

- **Parámetros:** Representaciones numéricas de las características de la cuenca tales como: geometría, zonas de impermeabilidad, coeficientes de percolación, etc. Según Sorooshian y Gupta, estos pueden ser físicos (medibles en

campo) o de proceso (no se pueden medir directamente en campo).

- Condiciones Iniciales: Representaciones numéricas de las características de la cuenca. Sin embargo éstas, a diferencia de las representadas por los parámetros, son muy variables en el tiempo, y por lo tanto se requiere conocer únicamente sus valores en el estado previo al ingreso de las entradas (de las precipitaciones).
- Condiciones de Frontera: Representaciones numéricas de la interacción de la cuenca con cuencas vecinas (u otros sistemas vecinos). Muchas veces se asume que la cuenca es totalmente independiente de sus vecinas, así que estos valores no entran en el modelo. Por lo tanto, en lo que resta del presente documento, no se hará más referencia a estos valores.
- Ecuaciones: Expresiones matemáticas que calculan las salidas a partir de las entradas y de los parámetros, condiciones iniciales y condiciones de frontera.

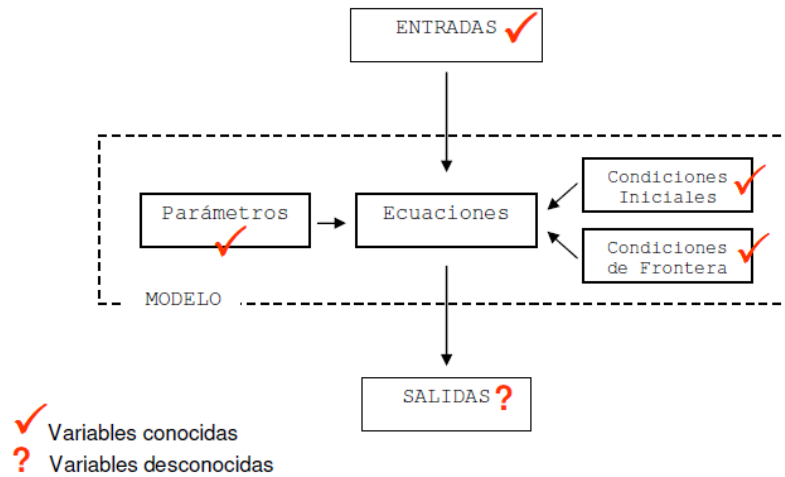


Figura 7 Componentes de un modelo hidrológico

Uno de los modelos lluvia-escorrentía que posee la hidrología es el modelo de Thomas. Este es precisamente el que se empleó para la resolución del caso estudio. En él se definen cuatro parámetros denominados a, b, c, d y dos valores de condición inicial denominados Sw_0 y Sg_0 . Dicho modelo se presenta en la Figura 8.

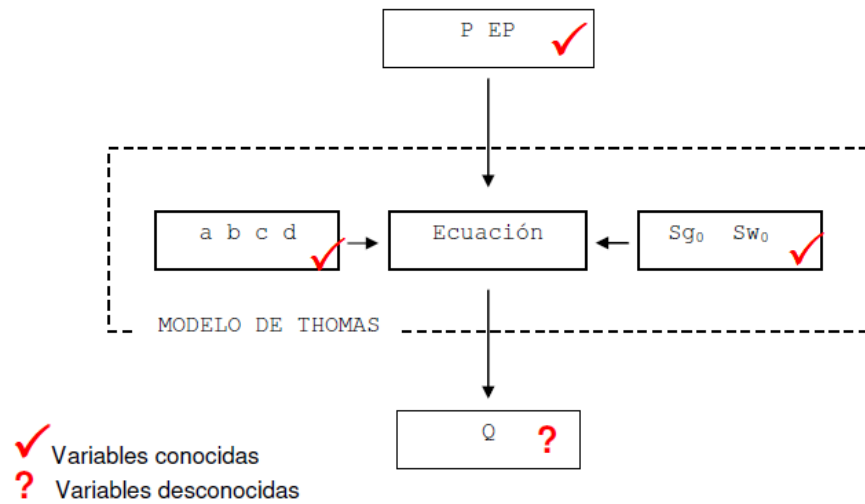


Figura 8 Variables en la calibración del modelo de Thomas

Los parámetros del modelo de Thomas reflejan las siguientes características de la cuenca:

a : Tendencia de que ocurra escorrentía antes de que el suelo se encuentre completamente saturado.

b : Límite superior de la suma de la evapotranspiración y el contenido de humedad del suelo.

c : Fracción de escorrentía proveniente del agua subterránea.

d : Valor recíproco del tiempo de residencia del agua subterránea.

Las condiciones iniciales hacen referencia a:

Sw_0 : Contenido inicial de humedad en el suelo

Sg_0 : Almacenamiento inicial de agua subterránea

La ecuación que permite calcular (para un período específico) el caudal a partir de la precipitación P , la evapotranspiración ET y las variables a , b , c , d , Sw_0 y Sg_0 es:

No obstante, dicho cálculo se suele discriminar en una serie de pequeñas ecuaciones que van arrojando además otros datos aparte de los caudales. Se sigue entonces la siguiente secuencia hasta calcular finalmente el caudal.

- 1) Cálculo del agua disponible
- 2) Cálculo de la variable Y
- 3) Cálculo del contenido de humedad del suelo
- 4) Cálculo de la escorrentía directa
- 5) Cálculo de la recarga de agua subterránea
- 6) Cálculo del almacenamiento de agua subterránea

- 7) Cálculo del caudal subterráneo
- 8) Cálculo del caudal a la salida de la cuenca

Para alcanzar con éxito la habilidad de predecir caudales se requiere enfrentar a dos problemas:

- 1) Seleccionar el tipo de modelo que mejor represente el funcionamiento real de la cuenca que se va a analizar.
- 2) Determinar los parámetros y condiciones iniciales reales de la cuenca.

Los resultados que arroje el modelo sólo podrán ser confiables en la medida en que los dos problemas se logren superar adecuadamente.

En tal sentido si asumimos que se logró escoger con éxito el modelo (sea por el buen conocimiento de personas expertas, sea por el buen desempeño que ha presentado dicho tipo modelo, etc) se debe garantizar poder conocer bien los parámetros y las condiciones iniciales. La determinación de los parámetros de proceso presentan el problema de no poderse medir directamente en campo. Asimismo, aunque los parámetros físicos sí se pueden medir en campo, requieren

de ajustes debido a la posible inexactitud de dichas medidas. El proceso mediante el cual se estiman los parámetros se denomina calibración. Si además no se cuenta con medidas de condiciones iniciales, la calibración podrá incluir también la medición de dichas variables.

Las Figuras 7 y 8 muestran gráficamente cuáles son las variables que se deben conocer para enfrentar el problema de “predecir caudales”. Compárese dichas variables con las indicadas en la Figura 9, cuando se trata de enfrentar el problema “calibrar el modelo”.

Las entradas al sistema (precipitaciones y evapotranspiraciones) y las salidas (caudales) son datos obtenidos de registros históricos. A estos datos se les conoce también como precipitaciones observadas, evapotranspiraciones observadas y caudales observados.

La calibración del modelo (en el caso del de Thomas) se logra cuando se lleguen a establecer los valores de a , b , c , d , S_{w0} y S_{g0} tales que al ingresar la precipitación observada P y la evapotranspiración observada EP , se obtenga un caudal Q_{sim} igual al caudal observado Q_{obs} .

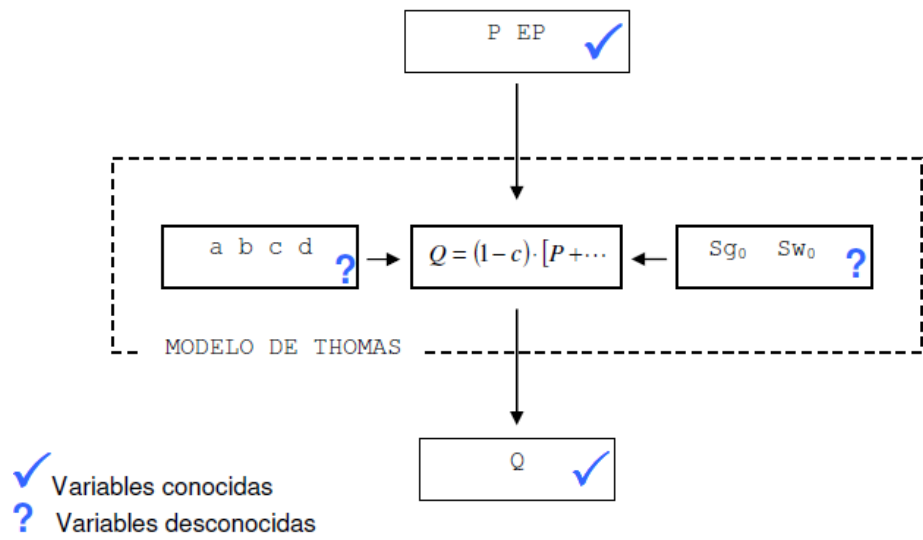


Figura 9 Variables en el problema de la calibración del modelo de Thomas

Para lograr una buena calibración, no se trabaja con un solo valor de P, de EP y de Q en un período de tiempo específico. Se trabaja con varios valores correspondientes a varios períodos de tiempo. Así, en realidad la calibración se logra cuando se logre reducir a cero algunas de las siguientes funciones (llámense funciones objetivo):

- Dónde:
- Qobsi = caudal medido (obtenido de los archivos)
 - Qsimi(Θ) = caudal calculado por el modelo

Θ = conjunto (vector) de los parámetros y condiciones
iniciales empleados por el modelo

n = número de caudales

Finalmente podemos resumir, que el problema de la calibración del modelo de Thomas consiste encontrar los valores de a , b , c , d , Sw_0 y Sg_0 , tales la función objetivo escogida sea igual a cero. Para la presente tesis se escogió como función objetivo denomina norma cuadrática normalizada.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. La sub cuenca en estudio

La subcuenca en estudio, lleva el nombre de Quilvire, se ubica en las nacientes del Rio Maure de curso internacional, y que parte del sistema TDPS, descrito en el Capítulo I. Los parámetros físicos de la cuenca se muestran en el Cuadro 8, donde se muestra la evaluación geomorfológica de la subcuenca Quilvire respecto a la cuenca mayor.

Cuadro 8 Evaluación Geomorfológica de la Cuenca

PARAMETRO GEOMORFOLOGICO		SIMBOLOGIA	UNIDADES	VALOR NUMERICO
SUPERFICIE O AREA DE LA CUENCA		A	Km ²	72.7766 Km ²
PERIMETRO DE LA CUENCA		P	Km	26.8164 Km
FORMA DE LA CUENCA	Coefficiente de Compacidad	Cc	-	1.59
	Relación de Elongación	Re	-	0.59
	Factor de Forma	Ff	-	0.36
RECTANGULO EQUIVALENTE		L	Km	52.80
		l	Km	37.40
ELEVACION MEDIA DE LA CUENCA		Em	m.s.n.m.	4483.42
PENDIENTE DE LA CUENCA		Sc	%	15.99
CARACTERISTICAS DE LA RED DE DRENAJE	Orden de Corrientes	Oc	-	5
	Relación de Bifurcación	Rb	-	de 3,76 a 4,25
	Densidad de Drenaje	Dd	Km/Km ²	0.76
	Frecuencia de Corrientes	F	Km ⁻²	0.18

En tal sentido, se requiere calibrar el modelo de Thomas aplicado a la subcuenca del río Quilvire, ubicado en las nacientes del río Maure. En el mapa 02 describe su ubicación geográfica.

4.2. Información Disponible

Para la elaboración del programa en MATLAB que aplica algoritmos genéticos para la calibración del modelo, se tuvieron que tener en cuenta varios aspectos importantes. Estos incluyen, la clara definición de la función objetivo a minimizar, la definición del espacio de búsqueda (y así establecer que codificación se adoptará en el AG), y el estilo de software que se requiere desarrollar. En cuanto a la información hidrológica, se requiere datos de precipitación, evaporación y descargas en el punto de interés. En tal sentido, contamos con la siguiente data:

Descargas Máximas, Medias y Mínimas: Estación Limnométrica Vilacota con un periodo de registro que data de enero de 1964 a diciembre 2012. Evaporación Mensual: Estación Vilacota con un periodo de registro que data de enero de 1994 a diciembre 2000. Precipitación Mensual: Estación Vilacota con un periodo de registro que data de enero de 1964 a diciembre 2012. Los valores promedio

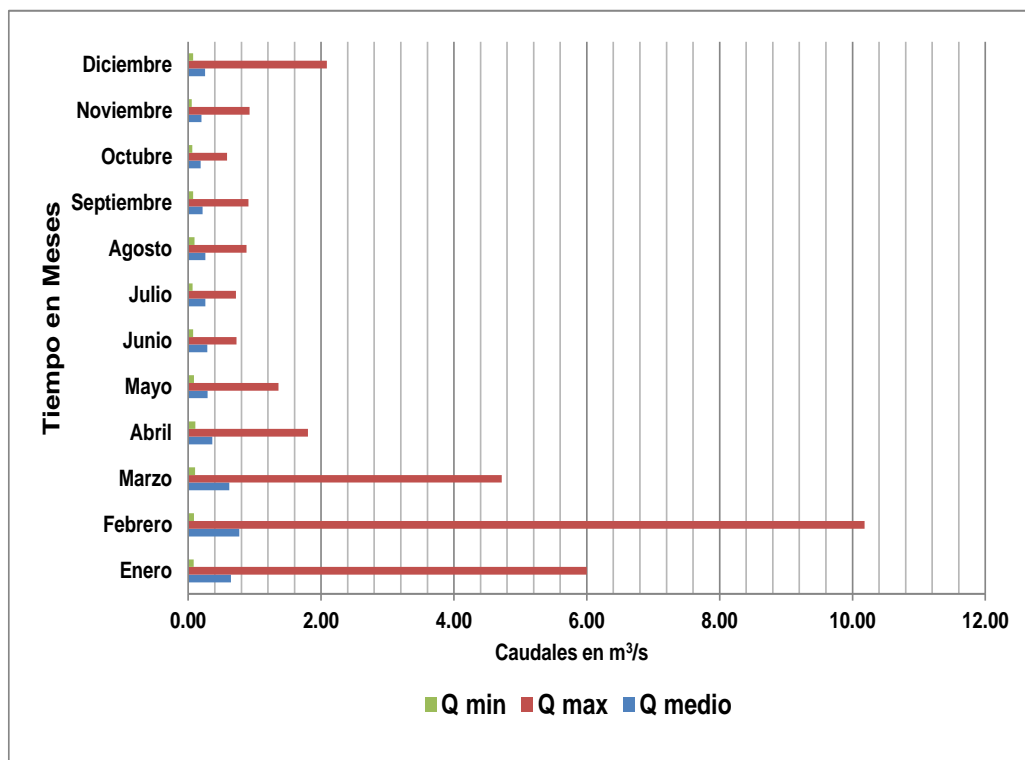
representativos para la subcuenca Quilvire se reportan en el Cuadro 9.

Cuadro 9 Precipitaciones, evaporación y caudales históricos

Mes	P(mm)	Ev (mm)	Q (m/s)	Q(mm)
Enero	130,01	121,43	0,642	23,88
Febrero	134,18	97,65	0,768	25,79
Marzo	90,92	83,20	0,617	22,94
Abril	14,33	90,13	0,362	13,04
Mayo	2,38	86,17	0,292	10,86
Junio	1,48	91,18	0,287	10,35
Julio	1,20	88,28	0,257	9,54
Agosto	5,02	120,07	0,256	9,51
Septiembre	3,52	133,77	0,215	7,75
Octubre	7,63	150,20	0,185	6,88
Noviembre	14,77	153,45	0,201	7,24
Diciembre	54,03	136,04	0,251	9,35
Suma	459,47	1351,57	4,333	157,14
Promedio	38,29	112,63	0,361	13,09
Desvi.Est.	51,37	26,21	0,198	6,93
Maximo	134,18	153,45	0,768	25,79
Minimo	1,20	83,2	0,185	6,88

Fuente: Proyecto Especial - Tacna

En la Figura 10, se muestra la distribución de caudales máximos, medio y mínimos mensuales en la estación Vilacota.



**Figura 10 Caudales Máximos, Medio y Mínimos Mensuales
Estación Vilacota**

El detalle de la información disponible en serie históricas se muestra en el Anexo 1. En la Figura 11 se puede apreciar la serie de descargas medias mensuales de la estación Vilacota, sobre el río Quilvire, en la desembocadura de la subcuenca en estudio.

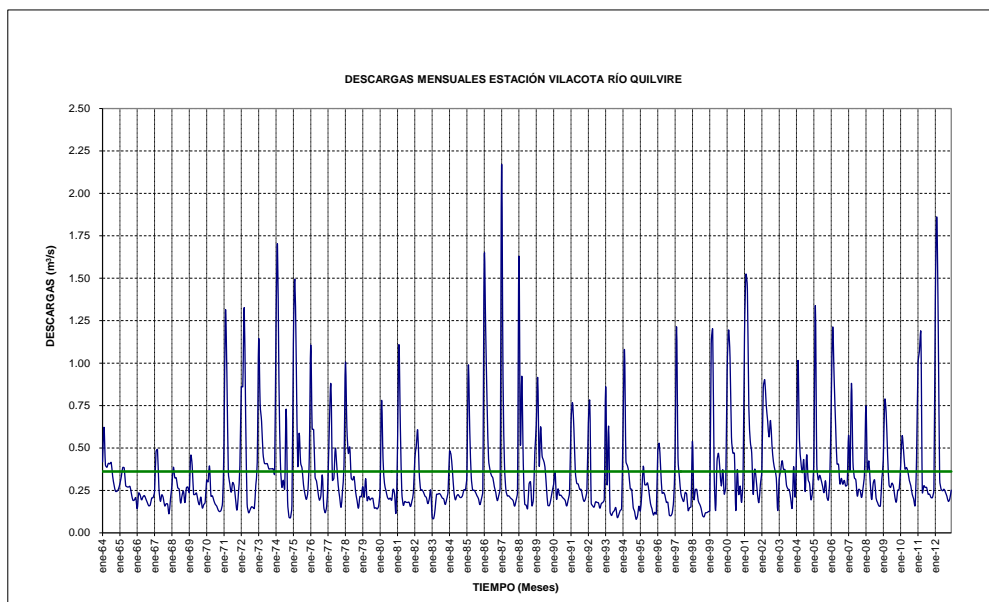


Figura 11 Descargas medias mensuales Estación Vilacota

4.3. Desarrollo del Modelo

La solución que se adoptó para el presente caso fue la de emplear un algoritmo genético el cual, como se expuso en el anterior capítulo, tiene la capacidad de resolver problemas de minimización de funciones.

La función objetivo a optimizar es:

$$FO = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{mes=1}^{12} (Q_{obs \text{ en el mes } i} - Q_{sim \text{ para el mes } i})^2}$$

Donde Q_{obs} en el mes i está determinado por la ecuación FO. Esto involucra entonces un proceso iterativo. Por consiguiente, es pertinente precisar cuál será la función objetivo a minimizar. En la

Figura 12, se muestra el diagrama de flujo para la función objetivo a minimizar.

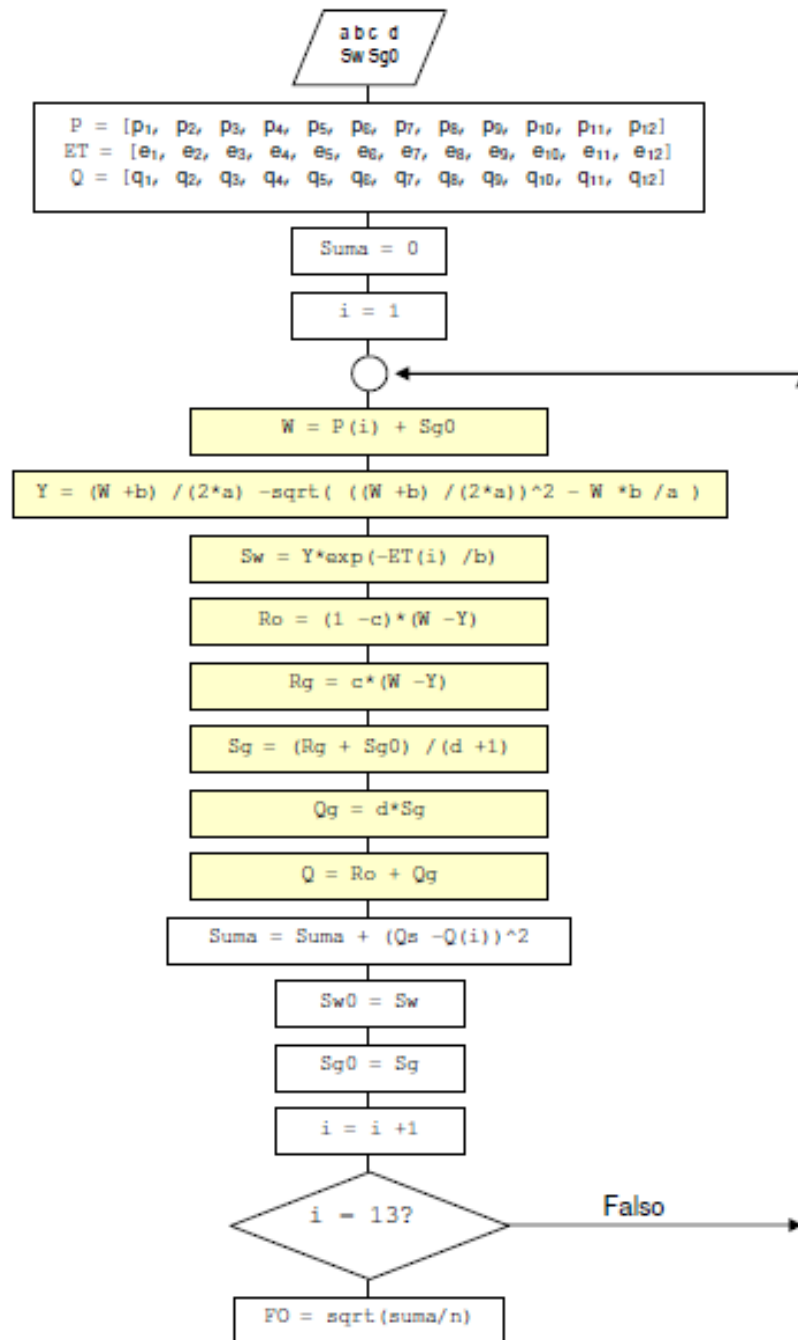


Figura 12 Diagrama de flujo para la función objetivo

El cálculo de la función objetivo comienza por obtener externamente a , b , c , d , Sw_0 y Sg_0 . La función tiene dentro de sí, los valores de las precipitaciones, las evaporaciones y los caudales. En amarillo se indica los pasos para calcular cada caudal (y de paso, cada Sw y cada Sg).

Es importante observar que, a pesar de todos los cálculos que involucra la función objetivo, la Figura 13 muestra claramente que cada vez que se llama a esta función, ingresan cinco valores a , b , c , d , Sw_0 y Sg_0 y sólo sale uno: FO.

4.4. Proceso de Calibración

Para el proceso de calibración, es fundamental definir el espacio de búsqueda y su respectiva codificación. Trabajos anteriores como el de Alley (1984), sugieren rangos entre los cuales pueden variar los parámetros. Ampliando dichos rangos, se determinó que los espacios de búsqueda para cada variable (y las precisiones requeridas) son los indicados en el Cuadro 10.

Cuadro 10 Rangos de búsqueda y precisión para cada uno de los parámetros

Parámetro	Mínimo	Máximo	Precisión
a	0,8	1,00	0,001
b	10,00	350,00	1,00
c	0,001	0,90	0,001
d	0,001	1,00	0,001
Sw ₀	0,00	500,00	1,00
Sg ₀	0,00	500,00	1,00

Una vez definido el espacio de búsqueda, se procede a diseñar los cromosomas. La longitud de cada sub-cadena dentro del cromosoma se determina mediante la ecuación.

$$L = \frac{\ln\left(\frac{w_{\max} - w_{\min}}{\pi} - 1\right)}{\ln(k)}$$

Considerando k igual 2 para un código binario, las longitudes resultantes son las siguientes:

Para a :

$$L = \frac{\ln\left(\frac{1,000 - 0,800}{0,001} - 1\right)}{\ln(2)} \approx 8$$

Para b :

$$L = \frac{\ln\left(\frac{350 - 1}{10} - 1\right)}{\ln(2)} \approx 9$$

Para c :

$$L = \frac{\ln\left(\frac{0,900 - 0,001}{0,001} - 1\right)}{\ln(2)} \approx 10$$

Para d :

$$L = \frac{\ln\left(\frac{1,000 - 0,001}{0,001} - 1\right)}{\ln(2)} \approx 10$$

Para S_{w_0} :

$$L = \frac{\ln\left(\frac{500 - 0}{1} - 1\right)}{\ln(2)} \approx 9$$

Para S_{g_0} :

$$L = \frac{\ln\left(\frac{500 - 0}{1} - 1\right)}{\ln(2)} \approx 9$$

Un aspecto muy importante a tener en cuenta es el grado de sensibilidad de los parámetros. El trabajo de Caro y Flechas (2002) recomienda que los parámetros organizados de mayor a menor sensibilidad son a , d , c y b . Esto influye en el diseño del cromosoma. El operador de entrecruzamiento tiende a romper con mayor probabilidad aquellos esquemas de gran longitud. Por tal razón, se optó por aplicar el operador de entrecruzamiento de doble punto. Por otro lado, entre más sensible sea un parámetro más tiende a influir en la función objetivo. Esto hace pensar que los esquemas que contienen posiciones fijas sobre estas sub-cadenas tendrán mayor influencia sobre la función objetivo, es decir, serán los más importantes. Si se colocan las variables más sensibles distanciadas

entre sí, los esquemas más importantes tendrán mayores longitudes y en consecuencia, tenderán a perderse más fácilmente tras el entrecruzamiento. Por lo tanto, se optó por ubicar juntos dentro del cromosoma a los parámetros más sensibles. El diseño final de los cromosomas se indica en la Figura 13.

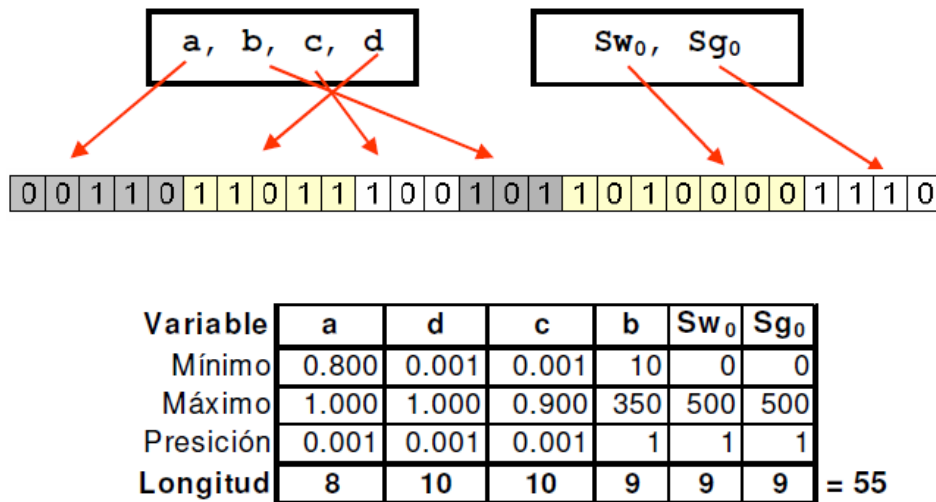


Figura 13 Conformación del tipo de cromosoma a usarse

Si cada cromosoma está compuesto por 55 genes, tal como se indica en la Figura 13, entonces quiere decir que el espacio de búsqueda es de $2^{55} = 3,6 \times 10^{16}$ posibles soluciones. Esto constituye una razón más por la que se empleó la metodología de los AGs, en el entendido que el espacio de búsqueda es muy grande.

El programa elaborado fue desarrollado y se diseñó en lenguaje de programación científica MATLAB R12. La programación tuvo un

enfoque estructural (y no orientado a objetos) lo que permite exponer todo su código de manera secuencial. El programa, además de arrojar al final una solución que lograra la minimización de la función objetivo, registra en archivos los resultados de las diferentes generaciones así como estadísticas que permiten verificar todo el proceso. Se sigue un algoritmo simple pero con las siguientes características especiales:

- La selección de los cromosomas más aptos se hizo mediante normalización.
- Los entrecruzamientos empleados son entrecruzamientos de dos puntos.
- Se aplicó elitismo, la muerte y la supervivencia.

La Figura 16 indica en los cuadros amarillos los nombres de las subrutinas que ejecutan los pasos consecutivos del algoritmo. Los cuadros en azul simplemente indican pasos intermedios en los cuales se reportan en archivo o en pantalla, los resultados que se llevan hasta el momento.

El programa inicia con la subrutina obtener Parametros, el cual le solicita al usuario los siguientes valores:

TPOB: Tamaño de la población.

MAXGEN: Número de generaciones que realizará el AG.

PX: Probabilidad de entrecruzamiento p_c .

PMUT: Probabilidad de mutación p_m^{Δ} .

LCAD: Longitud de cada una de las subcadenas que conformarán al cromosoma

MINVAL Mínimo valor que puede ser representado por la cadena.

MAXVAL Máximo valor que puede ser representado por la cadena.

Los tres últimos parámetros corresponden a los indicados en la Figura 14 como “longitud”, “mínimo” y “máximo”. En la subrutina obtenerOtros se le solicita al usuario que especifique cómo se llamarán los archivos donde se registrarán los resultados y que indique él mismo la semilla que empleará el AG para la generación de números seudo aleatorios.

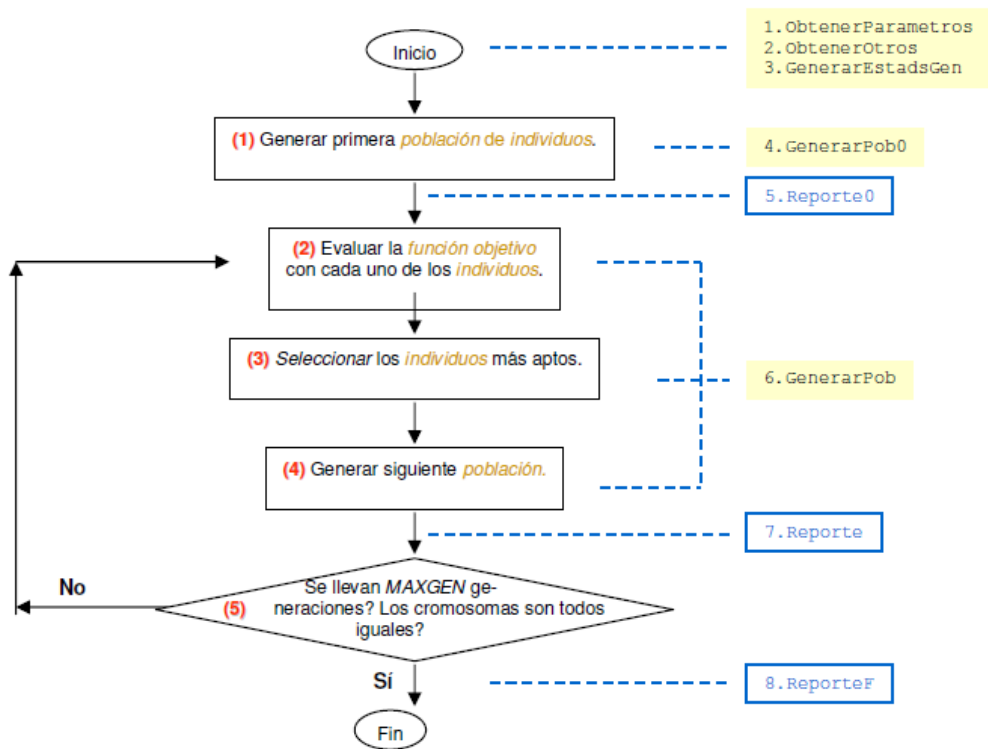


Figura 14 Diagrama de flujo del programa principal

El AG finaliza cuando se haya llegado al número de generaciones indicado en MAXGEN o cuando todos los individuos en una generación sean iguales (es decir, cuando se converge a una sola solución). La Figura 15 muestra cómo es la pantalla inicial del programa.

```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.

+-----+
| PROGRAMA ALGORITMOS GENÉTICOS |
| por Rafael E. Olarte V. |
| Abril 16 de 2003 |
| Actualizado y Modificado 2013, Por Michel Saucedo Oxacopa. |
+-----+

EL PRESENTE PROGRAMA BUSCAMINIMIZAR LA FUNCIÓN:

Norma Cuadrática
(para la calibración del modelo de Thomas)
z = sqrt( sumatoria[ i, 1, n, ( Q(i) - Qs(i) ) ] /n )

INGRESAR PARÁMETROS DEL ALGORITMO GENÉTICO:

5) Longitud de cada Subcadena : ?????
6) Valor Real Mínimo de cada Subcadena: ?????
7) Valor Real Máximo de cada Subcadena : ?????
```

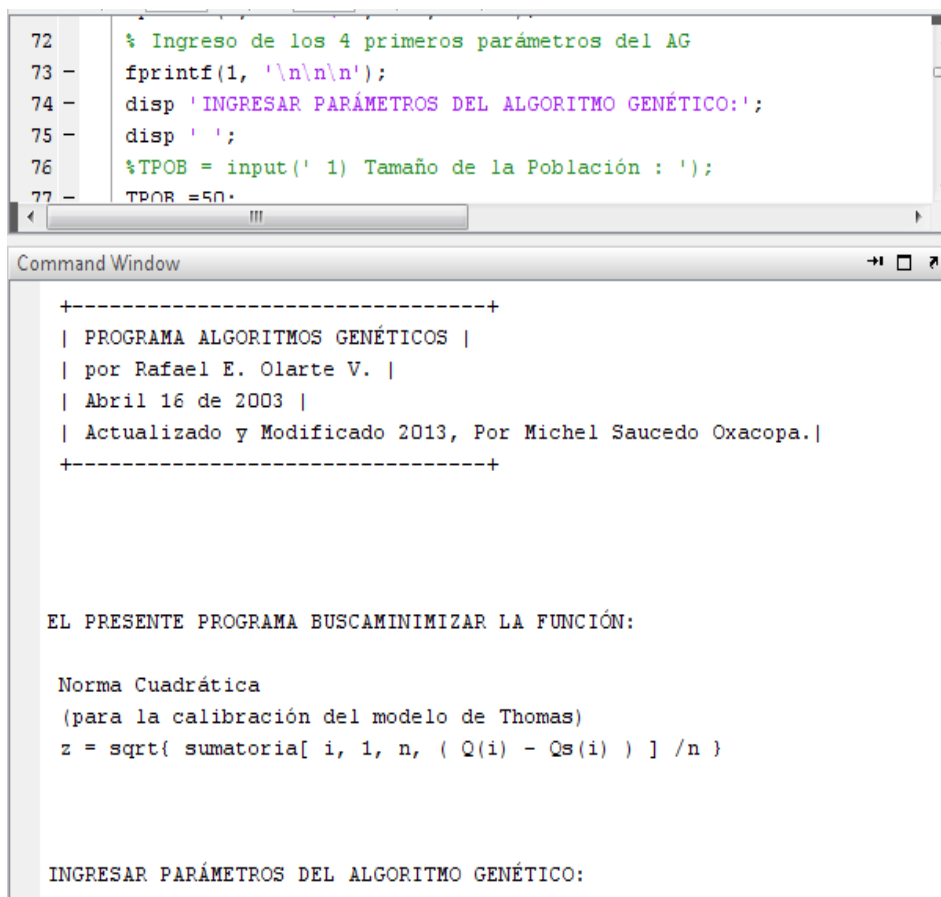
Figura 15 Pantalla inicial del programa computacional

4.5. Ejecución del Programa

Se ejecutó el programa cinco veces para la subcuenca Quilvire. Esto es con el fin de ensayar diferentes semillas. Los parámetros ingresados fueron los siguientes:

- TPOB = 50
- MAXGEN = 1000
- PX = 0,8
- PMUT = 0,01
- LCAD = [8 9 10 10 9 9]
- MAXVAL = [1 350 0,9 1 500 500]
- MINVAL = [0.8 10 0,001 0,001 0 0]

Cada vez que el programa era ejecutado, se creaba un archivo para cada generación, es decir 1000 archivos. Esta creación de archivos reduce notoriamente la velocidad de ejecución, por tanto simplemente podemos desactivar la subrutina reporte. Las pantallas del proceso de simulación se pueden observar en la Figura 16.



```
72 % Ingreso de los 4 primeros parámetros del AG
73 - fprintf(1, '\n\n\n');
74 - disp 'INGRESAR PARÁMETROS DEL ALGORITMO GENÉTICO: ';
75 - disp ' ';
76 %TPOB = input(' 1) Tamaño de la Población : ');
77 - TPOB = 50.
```

Command Window

```
+-----+
| PROGRAMA ALGORITMOS GENÉTICOS |
| por Rafael E. Olarte V. |
| Abril 16 de 2003 |
| Actualizado y Modificado 2013, Por Michel Saucedo Oxacopa. |
+-----+

EL PRESENTE PROGRAMA BUSCAMINIMIZAR LA FUNCIÓN:

Norma Cuadrática
(para la calibración del modelo de Thomas)
z = sqrt{ sumatoria[ i, 1, n, ( Q(i) - Qs(i) ) ] /n }

INGRESAR PARÁMETROS DEL ALGORITMO GENÉTICO:
```

Figura 16 Proceso de Simulación

4.6. Parámetros obtenidos y Simulación

En cuanto a la subcuenca Quilvire, los mejores resultados se obtuvieron con un valor de semilla igual a 45. En el Anexo 2, se muestran los archivos con la primera y última generación para dicha semilla.

El programa durante su proceso de búsqueda cada vez convergía a una solución óptima. No obstante, como se pudo observar que después de la generación 200 dicha optimización es mínima en comparación con las primeras generaciones. Como referencia del desempeño y mejora sucesiva del proceso de calibración y obtención de parámetros mostramos la información obtenida en la generación 1, cuyos resultados se presentan muy lejos de los parámetros que representen el mejor comportamiento o desempeño del modelo.

La salida del programa a parte de los archivos gen...txt generados se observa en las Figuras 17 y 18.

```

Command Window
Archivo: gen1000.txt (Versión Simplificada)

ALGORITMO GENÉTICO - RESULTADOS FINALES

FUNCIÓN A MINIMIZAR:
Norma Cuadrática
(para la calibración del modelo de Thomas)
z = sqrt( sumatoria[ i, 1, n, ( Q(i) - Qs(i) ) ] /n )

+-----+
| GENERACIÓN 1000|
+-----+
| # | Cromosoma | x | F(x) |
+-----+
| 1|1011101001000010011111001011011011110000000000000010| 0.9459
| | | 97.83 | |
| | | 0.8772 | |
| | | 0.7344 | |
| | | 0 | |

```

Figura 17 Resultados Finales Generación 1000

```

Command Window

+-----+
| ESTADÍSTICAS DE LA GENERACIÓN 1000 |
+-----+

Fpromedio : 52.25
Fmax(x1) : 103.6
x1 : 0.9019608 10 0.8674848 0.9345718 250.4892 0
Fmin(x2) : 47.46
x2 : 0.8 10 0.9 1 0 0
Entrecruzamientos: 40
Mutaciones : 35

+-----+

+-----+
| ESTADÍSTICAS DEL AG HASTA LA GENERACIÓN 1000 |
+-----+

Fmax(x1) : 297.6
x1 : 0.8156863 299.4325 0.1732424 0.9267595 428.5714 489.2368
Fmin(x2) : 47.46
x2 : 0.8 10 0.9 1 0 0
Entrecruzamientos: 39898
Mutaciones : 27643

fx >>

```

Figura 18 Estadísticas de la Generación 1000

En el Cuadro 12, se muestra los resultados de los parámetros obtenidos para el Modelo Hidrológico de Thomas, para a, b, c, d Sw_0 y Sg_0 . Asimismo los caudales calculados por dicho modelo usando los parámetros obtenidos. En la Figura 19 se muestra la comparación de caudales simulados y registrados. La función objetivo que corresponde al cálculo del error en este caso sale de todo rango aceptable y es lógico al observar la gran discrepancia que hay entre los caudales simulados y los registrados a la salida de la subcuenca Quilvire.

Cuadro 11 Parámetros y Simulación Usando Generación 1

Mes	P (mm)	Ev (mm)	Q (m/s)	Q(mm)	Sw (mm)	Ro (mm)	Rg (mm)	Sg (mm)	Qg (mm)	Qs (mm)	Qr (mm)
Enero	130,01	121,43	0,64	23,88	172,269	248,158	52,000	280,905	260,332	508,49	23,883
Febrero	134,18	97,65	0,768	25,79	186,79	251,285	52,655	281,245	260,647	511,93	25,791
Marzo	90,92	83,20	0,617	22,94	192,701	219,151	45,922	277,751	257,408	476,56	22,943
Abril	14,33	90,13	0,362	13,04	180,688	164,315	34,431	271,787	251,881	416,2	13,045
Mayo	2,38	86,17	0,292	10,86	181,614	156,077	32,705	270,891	251,051	407,13	10,859
Junio	1,48	91,18	0,287	10,35	178,483	155,460	32,576	270,824	250,989	406,45	10,346
Julio	1,2	88,28	0,257	9,54	180,184	155,265	32,535	270,803	250,969	406,23	9,545
Agosto	5,02	120,07	0,256	9,51	162,473	157,885	33,084	271,088	251,233	409,12	9,506
Septiembre	3,52	133,77	0,215	7,75	155,045	156,855	32,868	270,976	251,129	407,98	7,745
Octubre	7,63	150,20	0,185	6,88	147,184	159,684	33,461	271,283	251,414	411,1	6,884
Noviembre	14,77	153,45	0,201	7,24	146,293	164,622	34,496	271,82	251,912	416,53	7,238
Diciembre	54,03	136,04	0,251	9,35	158,682	192,35	40,306	274,836	254,707	447,06	9,353
Suma	459,47	1351,57	4,333	157,14							
Promedio	38,29	112,63	0,361	13,09							
Desv.Est.	51,37	26,21	0,198	6,93							
Maximo	134,18	153,45	0,768	25,79							
Minimo	1,20	83,2	0,185	6,88							
a	b(mm)	c	d	Sw_0 (mm)	Sg_0 (mm)						
0,81569	299,4325	0,17324	0,92676	428,571	489,237						

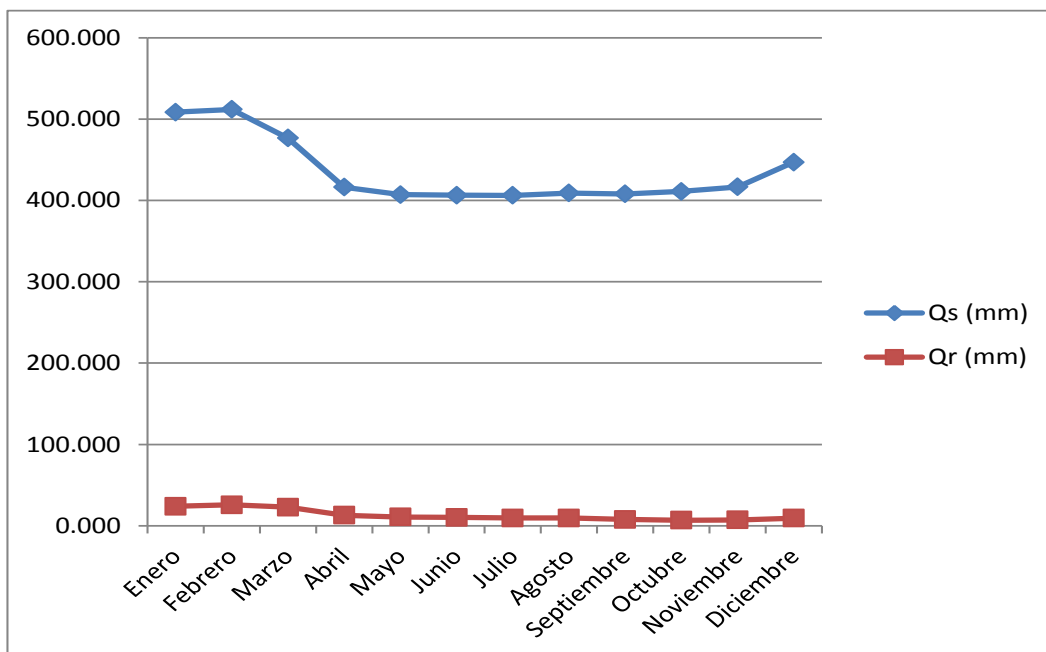


Figura 19 Análisis comparativo caudales simulados y registrados generación 1

Asimismo luego de una serie de simulaciones realizadas, obteniendo en cada proceso 1000 archivos y considerando la extensa disponibilidad de datos en el proceso de calibración no es recomendable mostrar la gran extensión de data obtenido por lo que procedemos a mostrar los resultados favorables obtenidos en el proceso de calibración de parámetros y mostramos los mejores resultados obtenidos. La función objetivo que corresponde al cálculo del error en este caso está en un rango aceptable y corresponde a un valor de 7,60 denominada norma cuadrática normalizada.

En el Cuadro 12 se muestran los mejores valores obtenidos y en la Figura 20 la comparación de caudales simulados y registrados.

Cuadro 12 Parámetros y Simulación Usando Generación 1000

Mes	P (mm)	Ev (mm)	Q (m/s)	Q(mm)	Sw (mm)	Ro (mm)	Rg (mm)	Sg (mm)	Qg (mm)	Qs (mm)	Qr (mm)
Enero	130,01	121,43	0,642	23,88	58,96	10,808	20,071	27,678	16,759	27,566	23,883
Febrero	134,18	97,65	0,768	25,79	68,946	11,607	21,556	28,603	17,319	28,926	25,791
Marzo	90,92	83,20	0,617	22,94	60,388	4,908	9,115	20,854	12,627	17,535	22,943
Abril	14,33	90,13	0,362	13,04	20,736	0,329	0,611	15,557	9,419	9,748	13,045
Mayo	2,38	86,17	0,292	10,86	14,390	0,139	0,259	15,338	9,287	9,426	10,859
Junio	1,48	91,18	0,287	10,35	13,462	0,129	0,239	15,325	9,279	9,408	10,346
Julio	1,20	88,28	0,257	9,54	13,532	0,125	0,233	15,322	9,277	9,402	9,545
Agosto	5,02	120,07	0,256	9,51	13,014	0,173	0,322	15,377	9,310	9,484	9,506
Septiembre	3,52	133,77	0,215	7,75	11,346	0,153	0,285	15,354	9,297	9,450	7,745
Octubre	7,63	150,20	0,185	6,88	11,913	0,211	0,392	15,421	9,337	9,548	6,884
Noviembre	14,77	153,45	0,201	7,24	14,414	3,338	0,627	15,567	9,426	9,763	7,238
Diciembre	54,03	136,04	0,251	9,35	31,641	1,799	3,341	17,258	10,449	12,248	9,353
Suma	459,47	1351,57	4,333	157,14							
Promedio	38,29	112,63	0,361	13,09							
Desv.Est.	51,37	26,21	0,198	6,93							
Maximo	137,18	153,45	0,768	25,79							
Minimo	1,20	83,20	0,185	6,88							
a	b (mm)	c	d	Sw (mm)	Sg (mm)						
0,90000	167,65000	0,56000	0.60548	22,00000	24,36580						

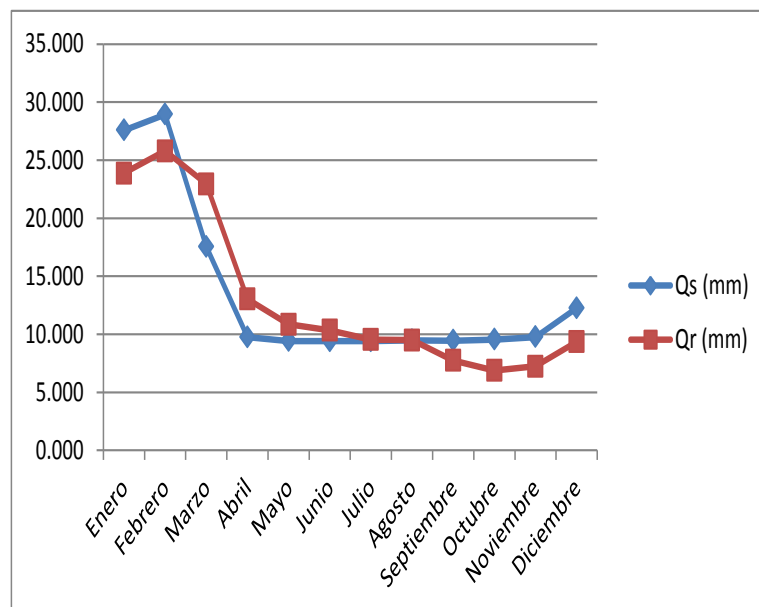


Figura 20 Análisis comparativo caudales simulados y registrados generación 1000

4.7. Análisis Estadístico Comparativo

Complementariamente se estableció una correlación entre los caudales registrados y simulados, en la Figura 21, se puede observar dicha correlación lineal con un coeficiente de determinación r^2 muy alto de 0,848 lo que representa un buen desempeño de los algoritmos genéticos en la determinación de parámetros del modelo de Thomas y su posterior empleo en el proceso de simulación de caudales.

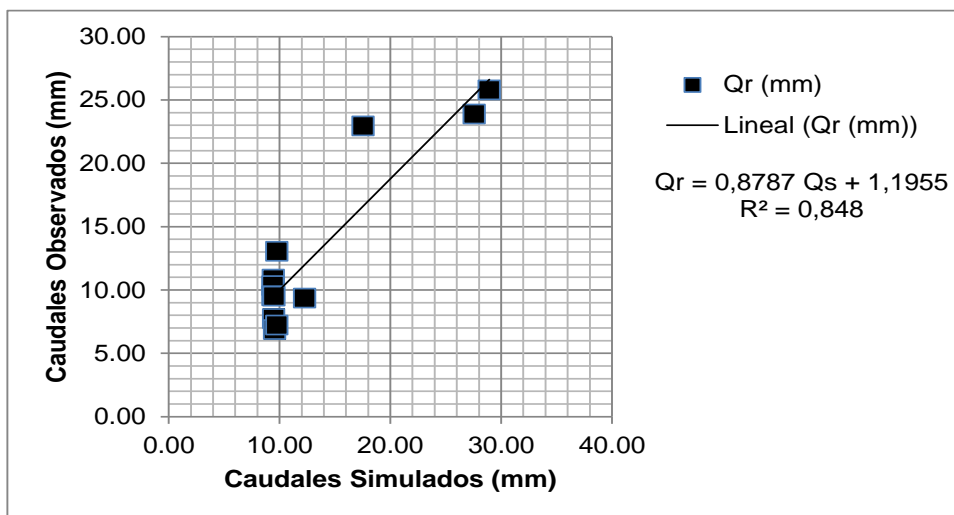


Figura 21 Correlación entre Caudales Simulados y Registrados

CONCLUSIONES

1. Los algoritmos genéticos poseen características que los hacen altamente robustos para resolver problemas de optimización, toma de decisiones, diseño y otros usos en la ingeniería. En el presente trabajo al aplicar los algoritmos genéticos y calibrar la ecuación tenemos como resultados datos muy semejantes a la realidad.
2. El extendido aprovechamiento que se le está dando a los algoritmos genéticos es real. No obstante, la ingeniería en nuestro país, todavía no se ha explotado esta útil herramienta, como ocurre en muchos países del mundo. La ingeniería tiene una gran herramienta de trabajo al aplicar los algoritmos genéticos y se podrían dar mejores soluciones a grandes problemas que se presentan en nuestra actualidad.
3. En la actualidad aún existe espacio dentro de la teoría de los algoritmos genéticos para continuar con la investigación. No solamente indagando sobre su efectividad sino también extendiendo el abanico de aplicaciones que se le puedan dar.
4. Los resultados obtenidos en las diferentes fases de calibración del modelo aplicado a la subcuenca Quilvire abren la especulación sobre

las posibles fuentes de error. Estas se resumen así: imposibilidad misma de la calibración, la mala adopción de la función objetivo o la existencia de deficiencias en el algoritmo genético. De tratarse el tercer caso, otros operadores o codificaciones deberán intentarse y compararse con el presente trabajo. Se presume sin embargo, que si el algoritmo genético empleado fuese en realidad deficiente, no se habría dado la posibilidad de calibrar el modelo en la cuenca Quilvire.

5. En este trabajo se ha mostrado la evolución del proceso de ajuste de los caudales simulados y observados, así en la simulación 1 se puede apreciar la gran diferencia que existe entre dichos valores mas no en la simulación 1000 donde se logra un ajuste muy bueno dándole solución más semejante a nuestra realidad.
6. Las soluciones obtenidas mostraron ser coherentes en similitud a la distribución de caudales observados, con un coeficiente de correlación de 0,848. No obstante, para entrar a comparar sobre cuál de las metodologías fue mejor, se requiere analizar otros aspectos tales como los tiempos requeridos para la búsqueda, los computadores empleados, la ausencia o presencia de comandos secundarios que

reduzcan la velocidad (como por ejemplo, registro de estadísticas), el número de semillas empleadas, etc.

7. La función objetivo que corresponde al cálculo del error en este caso está en un rango aceptable y corresponde a un valor de 7,60 denominada norma cuadrática normalizada.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda, continuar aplicando técnicas de inteligencia artificial en las diferentes ramas de la ingeniería, específicamente en las ciencias de la tierra que nos compete en la especialidad.
2. Aplicar otras metodologías a la subcuenca Quilvire y comparar con los resultados obtenidos en el presente trabajo. Se puede utilizar técnicas estocásticas, redes neuronales u otras técnicas.
3. Difundir con mayor énfasis en empleo de estas técnicas de optimización para la solución de problemas en la ingeniería.

BIBLIOGRAFIA

- (1) AVILA (2011), Uso de las Redes Neuronales Artificiales para la Estimación de la Evapotranspiración Potencial, en la Zona Altoandina de la Cuenca Locumba – Tacna, páginas 113.
- (2) ALANDER, Jarmo T. An indexed bibliography of Genetic algorithms: civil and structural engineering [en línea]. Report No. 94-1-CIVIL. Finlandia : University of Vaasa, Department of Information Technology and Production Economics, 2003. Disponible en <ftp://ftp.uwasa.fi/cs/report94-1/gaCIVILbib.ps.Z>
- (3) ALANDER, Jarmo T. An indexed bibliography of genetic algorithms in the Latin America, Portugal and Spain [en línea]. Report No. 94-1-LATIN. Finlandia : University of Vaasa, Department of Information Technology and Production Economics, 2003. Disponible en <ftp://ftp.uwasa.fi/cs/report94-1/gaLATINbib.ps.Z>
- (4) AURNHAMMER, Melanie, TÖNNIES, Klaus and GUERICKE, Otto von. Horizon correlation across faults guided by geological constraints. Disponible en <http://isgwww.cs.uni-magdeburg.de/bv/pub/pdf/TR-ISGBV-02-02.pdf>
- (5) BALLINI (2000). Análise e Previsão de Vazões Utilizando Modelos de Série Temporais, Redes Neurais e Redes Neurais Nebulosas, Tese de Doutorado, FEEC - Unicamp, Brasil.

- (6) BEASLEY, David, BULL, David R. and MARTIN, Ralph R. An overview of genetic algorithms: Part 1, Fundamentals [en línea]. En :University Computing : [Reino Unido], Inter-University Comité on Computing, 1993. p. 58-69. Disponible en www.indicart.com.ar/ga/OVER93_P.GZ
- (7) BEASLEY, David, BULL, David R. and MARTIN, Ralph R. An overview of genetic algorithms: Part 2, Research Topics [en línea]. En :University Computing : [Reino Unido], Inter-University Comité on Computing, 1993. p. 58-69.
- (8) BLANPAIN, Olivier, BOUSSEMART, F., LECOUTRE, C. and MERCHEZ, Sylvain. Genetic algorithms to determine the profile of urban drainage networks from incomplete data (abstract) [en línea]. [1999]. En: DHI Software Conference 1999. IAHR, AIRH. Disponible http://www.dhi.dk/hic98/papers/full%20papers/047/abs_047.doc
- (9) BROWN, Carol E.. Accounting expert systems applications [en línea]. En: BROWN, Carol. E. And O'LEARY, Daniel E.. Introduction to Artificial Intelligence and Expert Systems [Estados Unidos]. Disponible en http://accounting.rutgers.edu/raw/aies/www.bus.orst.edu/faculty/brownc/es_tutor/acc_es.htm99

- (10) CAI, Ximing, McKINNEY, Daene C. and LASDON, Leon S. A framework for sustainability analysis in water resources management and application to the Syr Darya basin [en línea]. [2001] Disponible en <http://www.ce.utexas.edu/prof/mckinney/papers/aral/LTM-Final.pdf>
- (11) CARO CAMARGO, Carlos Andrés y FLECHAS PARRA, Franklin Paolo. Análisis del balance hídrico de la sabana de Bogotá mediante el método de Thomas. Bogotá, 2002, 139 p. Trabajo de Grado (Ingeniero Civil). Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil.
- (12) CASTILLO (2007), Algoritmo computacional para describir la dinámica del ciclo hidrológico superficial en una cuenca a partir de cartas temáticas: topografía, edafología, uso de suelo y vegetación, página 83.
- (13) CASTILLO, Enrique y ÁLVAREZ, Elena. Sistemas expertos : aprendizaje e incertidumbre. Madrid : Paraninfo, 1989. ISBN 84-283-1669-4.
- (14) CERROLAZA, Miguel y ANNICCHIARICO, William. Algoritmos de optimización estructural basados en simulación genética. Caracas : Universidad Central de Venezuela, Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico, 1996. p. 17-66.

- (15) CISTY, Milan. Advantages of using genetic algorithms over deterministic methods in optimal design of the water networks rehabilitation [en línea]. En : Proceedings of ALGORITHMY 2000. Conference on Scientific Computing. p. 293-300. Disponible en: <http://www.emis.de/journals/AMUC/~contributed/algo2000/cisty.pdf>
- (16) COPELAND, Jack. Inteligencia artificial: una introducción filosófica. Traductor: Julio César Armero San José. Madrid: Alianza 1996. 421 p. ISBN 84-206-2844-1.
- (17) CORREA, DÍAZ (2005) "Implementación del Modelo de Thomas para el Balance Hídrico empleando la Herramienta Computacional Hidrosig-Java, 175 páginas.
- (18) CHAN, Weng Tat, FWA, T. F. and HOQUE, Kh. Zahidul. Constraint handling methods in pavement maintenance programming [en línea]. En : Transportation Research Part C 9. Pergamon, 2001. p. 175-190. Disponible en: <http://www.cs.cinvestar.mx/~constraint/papers/chan01.pdf.gz>.
- (19) CHEN, S-Y. and RAJAN, S. D. Using genetic algorithm as an automatic structural design tool [en línea]. Tempe, Arizona, Estados Unidos, Arizona State University, Department of Civil Engineering, [1998] Disponible en http://www.geocities.com/shenyeh_chen/paper/wcsmo3a.pdf

- (20) CHEN, Zhengxin. Computational intelligence for decision support. Boca Ratón, Florida, Estados Unidos : CRC Press, 2000. p. 380. ISBN 0-8493-1799-1.
- (21) CHORLEY (1962), Geomorphology and General System Theory, páginas 149.
- (22) DE JONG, Kenneth. Geneticalgorithms: a 30 yearperspective [en línea]. En :UNIVERSIDAD DE MICHIGAN. Festschrift Conference in Honor of John Holland. [AnnArbor, Michigan, EstadosUnidos]. 1999. Disponible en <http://www.pscs.umich.edu/jhhfest/abstracts.html>
- (23) DUMITRESCU, D., et al. Evolutionary computation. Boca Ratón, Florida, Estados Unidos: CRC Press, 2000. 386 p. ISBN 0-8493-0588-8.
- (24) EL HARROUNI, Khalid, OUAZAR, Driss and CHENG, A. H.-D. Gas for parameterestimation in contaminant transport by groundwater. Disponible en <http://kfki.baw.de/conferences/ICHE/1998-Cottbus/69.pdf>
- (25) FALKENAUER, Emanuel. Genetic algorithms and grouping problems. Chichester, Reino Unido : John Wiley & Sons, 1998. 220 p. ISBN 0-471-97150-2.

- (26) FEDERHOFER, Judith. Medical expert systems : doctor's silent partners. Disponible en: http://www.computer.privateweb.at/judith/special_field3.htm
- (27) FISHER, Deborah J., O'NEIL, Michael W. and CONTRERAS, Jeffrey C.. DS^2: Drilledshaft decision support system. En : Journal of Construction Engineering and Management. V. 121, No. 1 (mar 1995); p. 86-88. [Citado 2003-05-20] Disponible en: <http://search.epnet.com/> (autorización requerida). ISSN 07339364.
- (28) FOGEL, Lawrence J. Intelligence through simulated evolution: forty years of evolutionary programming. La Jolla, California, Estados Unidos : John Wiley&Sons, 1999. p. ix-7. ISBN 0-471-33250-X (alk. paper).
- (29) FORSYTH, Richard. The expert systems phenomenon. En : FORSYTH, Richard. Expert systems : principles and case studies. 2 ed. Londres : Chapman and Hall Computing 1989. ISBN 0-412-30460-0.
- (30) GREFENSTETTE (1993), Hipótesis Estática de los Bloques Constructores
- (31) GOLDBERG, David E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Reading, Massachusetts, Estados Unidos : Addison-Wesley, 1989. 412 p. ISBN 0-201-15767-5.

- (32) GOLDBERG, David E. and SEGREST, Phillip. Finite markov chain analysis of geneticalgorithms. Tuscaloosa, Alabama : University of Alabama. En : Proceedings of theSecond International Conference on Genetic Algorithms. 1987. p. 1-8.
- (33) HOLLAND, John H. Adaptation in Natural and Artificial Systemas. Cambridge,Massachusetts : MIT Press, 1992. Edición 2. 211 p. ISBN 0-262-08213-6
- (34) HOPGOOD, Adrian A. Intelligent Systems for Engineers and Scientists. Boca Ratón,Florida : CRC Press, 2001. Edición 2. 467 p.
- (35) JIN, Y.-Q. and WANG, Y. A genetic algorithm to simultaneously retrieve land surfaceroughness and soil wetness. En : International Journal of Remote Sensing. V.22. No. 16. 2001. p. 3093-3099. Disponible en <http://dandini.ingentaselect.com/vl=11019346/cl=19/nw=1/rspv/catchword/tandf/01431161/v22n16/53/p3093> ISSN 1366-5901.
- (36) JONG, Jyh-Cherng, JHA, Manoj K. and SCHONFELD, Paul. Preliminary highway designwith genetic algorithms and geographic information systems. En: Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. Julio, 2000. V. 15. No. 4. p. 261-271. Disponible en http://www.engr.umd.edu/~mjha/papers/c_a.pdf También disponible

en <http://search.epnet.com/> (autorización requerida). ISSN 10939687.

- (37) KARR, Charles L. and FREEMAN, L. Michael. Industrial applications of genetic algorithms. Boca Ratón, Florida, Estados Unidos : CRC Press, 1999. ISBN 0-8493-9801-0.
- (38) LEOPOLD, WOLMAN Y MILLER (1 964), Fluvial Processes in Geomorphology, páginas 522.
- (39) MONSALVE SÁENZ, Germán. Hidrología en la ingeniería. 2 ed. Bogotá : Escuela Colombiana de Ingeniería, 1999. 383 p. ISBN 958-95742-1-1.
- (40) MURPHY, L. J. and SIMPSON, A. R. Genetic algorithms in pipe network optimization (reporte). Research report No. R93. Australia : University of Adelaide, jun 1992. Disponible en: <http://www.civeng.adelaide.edu.au/research/reports/R93.pdf>
- (41) PALM, S.K., BANDYOPADHYAY, S. and MURTHY, C.A. Genetic classifiers for remotely sensed images: comparison with standard methods. En :Int. J. Remote Sensing. Calcuta, India, 2001. V. 22. No. 13. p. 2545–2569. Disponible en http://www.isical.ac.in/~sanghami/pal_ijrs.pdf.gz
- (42) PROCOPIO, Michael J. Genetic algorithm analysis. Gainesville, Florida, Estados Unidos, 2001, 45 p. Senior Design Project, Final

Report. Universidad de Florida. Department of Computer and Information Science and Engineering. Disponible en: <http://www.mikeprocopio.com/publications/SeniorDesignFinalReport.pdf>

- (43) SINGH, Vijay P. Computer models of watershed hidrology. Highlands Ranch, Colorado, Estados Unidos : Water Resources Publications, 1995. ISBN 0-918334-91-8.
- (44) SIÑA (2010), Pronóstico de caudales medios mensuales del río Caplina – estación bocatoma calientes usando Redes Neuronales Artificiales (RNA) – Tacna, páginas 120.
- (45) SOROOSHIAN, Sorosoosh, GUPTA, Hoshi Vijai and BASTIDAS, Luis Alberto. Calibration of hydrologic models using multi-objectives and visualization techniques. Tucson, Arizona, Estados Unidos, 1998, p. 1-23. Final Project on Project Proposal Number EAR-9418147. Universidad de Arizona. Department of Hidrology and Water Resources. Disponible en: <http://salt.hwr.arizona.edu/eoshome/proj/nsf/finalreport.pdf>
- (46) SOROOSHIAN, Sorosoosh and GUPTA, Hoshi Vijai. Model calibration.
- (47) SHUMM (1977), The Fluvial System, Cuarta Edición, páginas 98

ANEXO No. 01

SERIES HISTORICAS HIDROLOGICAS

SERIES DE DESCARGAS MEDIAS, MAXIMAS
MINIMAS ESTACION VILACOTA

PROYECTO ESPECIAL TACNA														
GERENCIA DE ESTUDIOS Y PROYECTOS														
ÁREA DE HIDROLOGÍA														
DESCARGAS MEDIAS MENSUALES (m³/s)														
CÓDIGO DE ESTACIÓN : 19151113														
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM	D. LTD
1984	0.418	0.622	0.401	0.386	0.409	0.406	0.414	0.334	0.281	0.245	0.245	0.258	0.368	0.106
1985	0.289	0.332	0.385	0.382	0.279	0.271	0.270	0.273	0.230	0.192	0.153	0.206	0.275	0.066
1986	0.142	0.234	0.223	0.194	0.212	0.219	0.199	0.178	0.159	0.164	0.204	0.208	0.195	0.028
1987	0.246	0.478	0.490	0.266	0.186	0.224	0.206	0.159	0.171	0.169	0.112	0.200	0.242	0.120
1988	0.279	0.386	0.324	0.224	0.266	0.257	0.176	0.220	0.246	0.178	0.265	0.270	0.266	0.060
1989	0.240	0.454	0.297	0.227	0.226	0.234	0.190	0.166	0.211	0.147	0.166	0.181	0.237	0.094
1990	0.310	0.300	0.293	0.216	0.218	0.190	0.168	0.157	0.134	0.125	0.133	0.179	0.210	0.083
1991	0.518	1.305	0.942	0.362	0.290	0.239	0.296	0.277	0.199	0.134	0.233	0.396	0.433	0.246
1992	0.861	0.664	1.227	0.680	0.171	0.119	0.134	0.153	0.150	0.144	0.280	0.415	0.441	0.299
1993	1.139	0.764	0.657	0.470	0.410	0.407	0.403	0.377	0.323	0.323	0.323	0.346	0.509	0.236
1994	1.215	1.698	0.903	0.418	0.270	0.310	0.261	0.729	0.189	0.092	0.089	0.163	0.928	0.909
1995	1.111	1.495	1.004	0.400	0.587	0.415	0.380	0.283	0.229	0.197	0.242	0.445	0.566	0.414
1996	1.107	0.612	0.609	0.331	0.305	0.242	0.192	0.218	0.241	0.156	0.118	0.157	0.366	0.285
1997	0.326	0.673	0.868	0.210	0.321	0.498	0.397	0.280	0.210	0.191	0.252	0.397	0.390	0.204
1998	1.003	0.623	0.469	0.504	0.323	0.311	0.330	0.244	0.192	0.145	0.214	0.213	0.381	0.242
1999	0.272	0.210	0.319	0.191	0.214	0.194	0.203	0.202	0.146	0.148	0.141	0.159	0.200	0.053
2000	0.264	0.780	0.436	0.292	0.251	0.211	0.198	0.205	0.193	0.257	0.228	0.123	0.287	0.173
2001	0.499	1.109	0.616	0.241	0.163	0.184	0.180	0.179	0.180	0.155	0.188	0.237	0.323	0.286
2002	0.438	0.511	0.604	0.360	0.255	0.253	0.239	0.217	0.207	0.172	0.201	0.250	0.309	0.138
PROM	0.642	0.768	0.617	0.362	0.292	0.287	0.257	0.256	0.215	0.185	0.201	0.251	0.261	--
D. LTD	0.444	0.428	0.321	0.144	0.115	0.102	0.099	0.107	0.069	0.068	0.064	0.089	0.141	--
MAX	2.167	1.862	1.441	0.758	0.662	0.565	0.662	0.729	0.420	0.377	0.390	0.475	2.167	--
MIN	0.090	0.083	0.138	0.126	0.102	0.119	0.131	0.102	0.091	0.080	0.089	0.111	0.080	--



PROYECTO: BREAL TACNA														
DIRECCION DE ESTUDIOS														
AREA: DE HIDROLOGIA														
<u>DESCARGAS MAXIMAS MENSUALES (m³/s)</u>														
CODIGO DE ESTACION : 19151123														
UNIDAD DE REPRESENTACION : VE AGUITA														
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM	D. STD
1984	1.970	1.820	0.485	0.428	0.428	0.422	0.428	0.387	0.308	0.377	0.428	0.488	0.680	0.579
1985	0.426	0.792	0.479	0.501	0.324	0.389	0.366	0.304	0.324	0.234	0.234	0.366	0.395	0.150
1986	0.186	0.518	0.490	0.215	0.343	0.264	0.200	0.200	0.186	0.247	0.342	0.322	0.293	0.115
1987	0.506	1.017	1.125	0.573	0.272	0.272	0.272	0.234	0.272	0.234	0.131	0.474	0.449	0.219
1988	0.474	0.539			0.355	0.441	0.228		0.434	0.364	0.490	0.752	0.453	0.145
1989	0.580	0.828	0.549	0.341	0.248	0.276	0.222	0.198	0.439	0.186	0.224	0.292	0.384	0.195
1970	0.512	0.512	0.684	0.279	0.245	0.229	0.185	0.172	0.160	0.160	0.172	0.279	0.299	0.174
1971	2.610	3.500	3.325	0.577	0.343	0.409	0.485	0.409	0.270	0.227	0.681	1.260	1.175	1.234
1972			3.498	1.800	0.275	0.155	0.195	0.230	0.482	0.230		1.485	0.928	1.141
1973	6.000	2.300	0.945	0.711	0.455	0.430	0.430					0.485	1.470	1.936
1974				0.834	0.399	0.482	0.329	0.228	0.399	0.270	0.180	0.697	0.424	0.217
1975	2.200	3.350	1.975	0.975	1.380	0.525	0.445	0.332	0.332	0.230	0.322		1.095	1.021
1976														
1977									0.289	0.525	0.739	1.524	0.769	0.536
1978	3.608	2.859	0.966	0.781	0.408	0.394	0.425	0.285	0.257	0.208	0.465	0.370	0.919	1.114
1979	0.648	0.266	0.496	0.232	0.255	0.290	0.231	0.243	0.191	0.231	0.156	0.233	0.289	0.140
1980			0.648	0.369	0.334	0.249	0.249	0.253	0.220	0.488	0.369	0.162	0.334	0.145
1981	1.179												0.179	
1982														
PROM	1.642	1.878	1.310	0.848	0.392	0.337	0.317	0.306	0.294	0.268	0.341	0.811	0.894	-
D. STD	1.388	1.838	1.058	0.338	0.212	0.118	0.124	0.141	0.149	0.119	0.192	0.444	0.805	-
MAX	8.000	10.132	4.719	1.800	1.380	0.723	0.720	0.879	0.807	0.688	0.923	2.085	10.132	-
MIN	0.138	0.288	0.183	0.145	0.119	0.138	0.145	0.108	0.098	0.111	0.131	0.161	0.098	-

PROYECTO ESPECIAL TACNA																		
DIRECCION DE ESTUDIOS																		
AREA DE HIDROLOGIA																		
DESCARGAS MINIMAS MENSUALES (m³/s)																		
CODIGO DE ESTACION	: 19151133																	
NOMBRE DE ESTACION	: VILACOTA											LONGITUD	: 70° 02'					
CATEG. DE ESTACION	: LHMETRICA								DFTO.	: TACNA			LATITUD	: 17° 05'				
CUENCA	: MAURE							PROV.	: TARATA			ALTITUD	: 4,400 m.s.n.m.					
RIO	: QULVRE											DIST.	: SUSAPAYA			FUENTE	: PET-SBMMH	
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM	D.STD				
1964	0.180	0.367	0.359	0.366	0.365	0.398	0.394	0.289	0.244	0.203	0.210	0.178	-	0.296	0.088			
1965	0.210	0.217	0.306	0.290	0.218	0.189	0.176	0.234	0.167	0.167	0.167	0.167	-	0.209	0.048			
1966	0.102	0.136	0.160	0.172	0.200	0.186	0.186	0.148	0.136	0.126	0.148	0.160	-	0.155	0.028			
1967	0.169	0.272	0.315	0.200	0.143	0.169	0.143	0.119	0.121	0.119	0.089	0.099	-	0.163	0.069			
1968	0.184	0.272			0.220	0.203	0.106		0.160	0.120	0.138	0.106	-	0.168	0.057			
1969	0.120	0.230	0.182	0.137	0.177	0.198	0.157	0.117	0.124	0.124	0.124	0.124	-	0.151	0.037			
1970	0.204	0.169	0.224	0.148	0.185	0.172	0.126	0.137	0.117	0.098	0.107	0.137	-	0.152	0.039			
1971	0.120	0.320	0.409	0.237	0.199	0.199	0.197	0.199	0.151	0.080	0.099	0.108	-	0.193	0.096			
1972			0.260	0.215	0.085	0.075	0.065	0.125	0.085	0.062		0.095	-	0.119	0.071			
1973	0.180	0.163	0.355	0.380	0.380	0.380	0.380					0.267	-	0.311	0.094			
1974				0.215	0.179	0.215	0.145	0.215	0.074	0.089	0.055	0.075	-	0.137	0.071			
1975	0.110	0.520	0.550	0.200	0.375	0.353	0.330	0.244	0.170	0.167	0.167		-	0.290	0.149			
1976													-					
1977									0.142	0.089	0.098	0.089	-	0.105	0.025			
1978	0.334	0.203	0.194	0.350	0.231	0.231	0.244	0.198	0.130	0.084	0.084	0.127	-	0.201	0.086			
1979	0.141	0.148	0.242	0.156	0.184	0.144	0.174	0.165	0.121	0.114	0.121	0.134	-	0.154	0.035			
1980			0.314	0.249	0.193	0.182	0.171	0.171	0.160	0.150	0.116	0.096	-	0.180	0.063			
1981	0.089												-	0.089				
1982													-					
1983													-					
1984													-					
1985													-					
1986													-					
1987													-					
1988	0.081	0.150	0.150	0.107	0.126	0.116	0.106	0.249	0.249		0.126	0.165	-	0.148	0.055			
1989	0.401	0.669		0.343	0.377	0.318	0.249	0.150	0.106				-	0.327	0.174			
1990													-					
1991													-					
1992			0.142	0.145	0.127	0.139	0.126	0.116	0.105	0.098	0.079	0.086	-	0.116	0.024			
1993	0.176	0.104	0.127	0.112	0.091	0.104	0.112	0.104	0.079	0.091	0.085	0.098	-	0.107	0.025			
1994	0.515	0.264	0.214	0.296	0.251	0.225	0.176	0.123	0.081	0.070	0.080	0.087	-	0.199	0.128			
1995	0.091	0.133	0.251	0.214	0.215	0.215	0.203	0.144	0.118	0.094	0.089	0.097	-	0.155	0.060			
1996	0.099	0.133	0.151	0.146	0.210	0.181	0.145	0.159	0.082	0.080	0.082	0.082	-	0.127	0.047			
1997	0.196	0.292	0.135	0.233	0.179	0.179	0.171	0.157	0.106	0.100	0.100	0.100	-	0.162	0.060			
1998	0.162	0.086	0.104	0.204	0.181	0.129	0.122	0.095	0.087	0.108	0.103	0.103	-	0.124	0.039			
2003	0.285	-0.300	-0.305	-0.350	-0.320	-0.230	-0.240	-0.215	-	-	-	-	-	0.281	0.048			
PROM	0.189	0.245	0.248	0.228	0.216	0.205	0.186	0.168	0.130	0.109	0.111	0.121	-	0.180	--			
D. STD	0.109	0.141	0.109	0.084	0.085	0.081	0.083	0.053	0.046	0.036	0.038	0.044	-	0.033	--			
MAX	0.515	0.669	0.550	0.380	0.380	0.398	0.394	0.289	0.249	0.203	0.210	0.267	-	0.669	--			

SERIES DE EVAPORACION

PROYECTO ESPECIAL TADVA GERENCIA DE ESTUDIOS AREA DE HIDROLOGIA															
EVAPORACION TOTAL MENSUAL (mm)															
CODIGO DE ESTACION : 19161143 NOMBRE DE ESTACION : VILACOTA CATEG. DE ESTACION : CO										DPTO. : TACNA LONGITUD : 70° 02' LATITUD : 17° 09' PROV. : TARATA ALTITUD : 4400 m.s.n.m.					
ANO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL	PROM	D.STD
1994				72.0	85.1	89.5	87.6	110.1	127.3	167.5	187.2	112.0	1038.3	115.4	39.2
1995	193.0	108.0	102.0	120.0	97.0	78.0	89.6	168.3	192.0	135.3	124.3	114.6	1522.1	126.8	38.4
1996	85.5	70.6	76.0	84.0	91.0	94.8	82.9	115.2	137.5	147.3	132.0	118.2	1235.0	102.9	26.0
TOTAL	728.6	586.9	489.2	630.9	603.2	638.3	618.0	840.6	936.4	1051.4	1074.2	815.2	11553.0	922.7	33.1
PROM	121.4	97.7	83.2	90.1	86.2	91.2	88.3	120.1	133.8	150.2	153.5	136.0	1289.0	112.6	~
D.STD	39.8	18.9	10.2	15.3	11.0	7.0	7.4	22.1	28.7	13.0	21.5	26.4	11553.0	9.8	~
MAX	193.0	112.4	102.0	120.0	99.7	100.7	103.4	168.3	192.0	167.5	187.2	175.6	11553.0	193.0	~

SERIE DE PRECIPITACION

PROYECTO ESPECIAL TACNA																
SERVICIO DE ESTUDIOS Y PROYECTOS																
ÁREA DE HIDROLOGÍA																
PRECIPITACION TOTAL MENSUAL (mm)																
CÓDIGO DE ESTACIÓN: 119151103																
LONGITUD: -109 03'																
ANO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL	PROM	D. STD	
1964	2.8	85.3	55.2	37.1	0.0	0.0	0.0	15.0	0.0	2.0	42.0	81.0	321.2	26.8	32.8	
1965	59.5	116.3	23.7	6.5	0.0	0.0	0.0	1.5	13.3	0.0	1.7	32.0	254.5	21.2	35.0	
1966	5.3	88.6	36.5	0.0	20.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26.7	2.7	180.1	15.0	26.4	
1967	58.1	117.3	101.9	23.7	0.2	0.0	0.6	0.0		0.3	0.0	81.1	388.2	34.8	46.2	
1968	97.8	81.8			19.3	42.5	0.0	0.0	0.4	23.6	34.4	60.9	380.7	36.1	34.8	
1969	38.7	108.2	29.3	8.8	0.0	0.0	0.0	0.0	17.3	0.0	17.5	66.7	286.5	23.9	33.5	
1970	182.9	75.1	148.6	11.5	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	15.9	436.3	36.4	64.7	
1971	201.3	154.5	40.2	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.3	101.3	507.3	42.3	70.7	
1972	302.0	84.1	194.9	26.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	6.5	5.6	172.0	793.1	66.1	101.9	
1973	455.8	316.5	179.7	15.8	0.0	0.0	0.3	20.5	0.9	0.0	0.5	0.0	990.0	82.5	153.5	
1974	179.7	108.1	45.2	14.2	0.0	1.0	0.0	81.0	0.0	0.0	3.7	61.2	494.1	41.2	57.4	
1975	253.5	283.7	184.0	2.9	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	138.5	845.4	70.5	107.6	
1976	276.6	113.3	70.8	24.4	0.0	0.0	0.0	0.0	15.1	0.0	0.0	78.5	580.7	48.4	82.2	
1977	61.6	266.4	272.4	0.0	8.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	30.3	642.3	53.5	102.5	
1978	214.2	47.0	15.1	27.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.3	317.7	26.5	60.9	
1979	127.1		189.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	0.0	51.4	371.2	33.7	65.0	
1980	0.0	1.5	203.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	81.5	0.0	0.0	286.1	23.8	61.1	
1981	154.5	315.4	135.8	0.0	0.0	0.0	0.0	21.2	0.0	0.0	0.0	69.7	696.6	58.1	98.5	
TOTAL	5590.5	5635.6	3727.9	601.7	102.5	63.8	52.7	210.7	140.7	306.2	605.5	2215.1	19251.9	1715.1	--	
PROM	130.0	134.2	90.9	14.3	2.4	1.5	1.2	5.0	3.5	7.6	14.8	54.0	459.5	35.0	--	
D. STD	92.5	85.0	70.7	16.5	4.8	6.5	4.0	14.4	8.5	16.9	27.8	38.7	215.7	19.8	--	
MAX	455.8	316.5	272.4	38.8	20.3	42.5	21.1	81.0	45.8	81.5	185.1	172.0	1070.7	91.5	--	
MIN	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.3	0.0	--	

ANEXO No02

SALIDAS DEL PROGRAMA ALGORITMOS
GENÉTICOS PARA CALIBRACIÓN DEL MODELO
PRECIPITACIÓN – ESCORRENTÍA

RESULTADO DE GENERACION 1

(Archivo generado "gen1.txt")

3 101011000001001001111111011001000010100100110111001011	0.9349	0.919	2.00	50	11 0	1 100111 109.4
33.95 69.88						
0.8982 0.3903						
0.5654 0.1553						
287.7 130.1						
449.1 119.4						
4 1010101100000010010111010111111011011000100011110000101	0.9341	2.423	2.00	11	50 0	0 001101 141.8
12.66 234.9						
0.6575 0.2312						
0.9648 0.1211						
34.25 347.4						
380.6 18.59						
5 0010001101011100010001101001011101100010110011110100000	0.8275	1.549	2.00	12	13 27	2 001001 170.2
132.4 332.7						
0.4966 0.4931						
0.7315 0.06643						
175.1 405.1						
407 62.62						
6 010111000100010110010110100111100010101110110011001001	0.8737	1.652	2.00	13	12 47	1 100000 171.3
55.91 244.9						
0.53 0.8025						
0.4717 0.8545						
365.9 258.3						
196.7 215.3						
7 0010001110010000101000101000110100100010000011010010011	0.8275	2.929	2.00	27	49 19	0 111010 107.4

202.3 149.7						
0.2435 0.5248						
0.4111 0.4873						
128.2 152.6						
143.8 89.04						
<u> 8 </u> 1000111010010000001001101001100001011010110000100100000	0.9114	2.122	4.00	49	27 16	0 110001 195.7
201.6 179						
0.2717 0.4764						
0.7617 0.8564						
172.2 273						
281.8 287.7						
<u> 9 </u> 1000100111110000111110001111010011110011011111110111000	0.9075	1.237	0.00	36	24 12	1 111011 197.8
330 209.6						
0.8508 0.4588						
0.6553 0.4082						
218.2 128.2						
430.5 439.3						
10 0111010100011000110001100110111101110110110010110011110	0.8918	0.459	0.00	24	36 6	0 001001 130.5
42.6 56.58						
0.4958 0.5836						
0.4834 0.1455						
424.7 283.8						
405.1 45.01						
11 0011010110101001001000001100001111011101100011000010011	0.8416	2.510	6.00	47	13 40	1 100000 106.7
234.9 74.54						
0.2312 0.8587						

396.3 114.5							
16 11110000010001100100000100001000000101000000101001101101	0.9882	3.605	2.00	40	1 6	2 011001 174.1	
103.2 15.32							
0.458 0.8736							
0.2559 0.9014							
4.892 50.88							
106.7 462.8							
17 101001010001110111100111001100010110010001111000110111	0.9294	3.284	2.00	49	22 41	2 100110 139.6	
49.26 155							
0.813 0.6372							
0.7725 0.4873							
139.9 134.1							
53.82 226							
18 11011111001111010101111011001110111110101100001010110	0.9749	1.895	0.00	22	49 5	0 111010 75.09	
220.9 270.8							
0.3341 0.6829							
0.2344 0.4463							
418.8 27.4							
84.15 89.04							
19 10110000101110000111101010111011101110111011010010101010	0.938	2.388	0.00	11	34 43	0 111011 205	
254.9 109.8							
0.8631 0.6812							
0.8672 0.1211							
229 357.1							
166.3 237.8							
20 0111001101100010010110010110101111010001100000111101100	0.8902	1.579	2.00	34	11 20	1 001001	

							154.6
	140.4 234.9						
	0.6293 0.342						
	0.3701 0.6777						
	93.93 394.3						
	481.4 18.59						
							0 010000
21	0010111101011000001011101111011000011000001110110111001	0.8369	2.169	0.00	45	16 18	64.09
	127.1 81.19						
	0.3305 0.458						
	0.6914 0.2559						
	13.7 4.892						
	431.5 65.56						
							0 111100
22	100110101100010001100001000011100100000001001011100111	0.9208	3.092	8.00	16	45 47	92.85
	270.8 103.2						
	0.6829 0.668						
	0.4463 0.2129						
	8.806 80.23						
	226 106.7						
							1 000011
23	0111000011101011110100100101010110010111110100101001011	0.8878	0.482	0.00	5	30 44	88.82
	323.4 334						
	0.5792 0.4747						
	0.6748 0.9375						
	489.2 127.2						
	323.9 44.03						
							0 001000
24	1110111100100110010000010010110100001010000011111000001	0.9875	1.633	2.00	30	5 43	201.5
	60.57 132.4						

0.4588 0.4966							
0.4082 0.7315							
128.2 175.1							
439.3 407							
25 0110111001000011111011000000011111010111100101101111101	0.8863	0.347	0.00	27	41 33	1 011010	163.4
99.82 242.9							
0.7603 0.3077							
0.2451 0.3613							
474.6 259.3							
372.8 184.9							
26 001000111101001100101110111110111010010111101010111001	0.8275	2.516	0.00	41	27 22	0 110001	195.8
290.8 179							
0.3305 0.4703							
0.9326 0.5127							
184.9 273							
181 287.7							
27 1100010001111111010000111011101101100100010111100100110	0.9537	1.642	6.00	47	39 42	0 010111	157.2
179 21.31							
0.4764 0.7937							
0.8564 0.5342							
273 252.4							
287.7 186.9							
28 0011000101001101010110100011101110100101010001000001000	0.8384	2.649	0.00	39	47 39	0 101011	161.2
112.5 17.98							
0.6346 0.09591							
0.8643 0.9102							

329.7 222.1							
7.828 225							
29 001100000111010000100101000011101011110110011110010000	0.8376	0.474	0.00	45	3 47	0 010000	183.8
87.18 81.19							
0.1311 0.668							
0.2305 0.2129							
425.6 80.23							
391.4 441.3							
30 0000111011110011110000110111110111111010000010000101101	0.811	3.364	6.00	3	45 51	0 101011	137.5
334 33.95							
0.4747 0.8982							
0.9375 0.5654							
127.2 287.7							
44.03 73.39							
31 0100000100011100011101110001011011001011111111100010000	0.851	1.882	0.00	47	36 35	0 101011	130.4
47.26 17.98							
0.8376 0.09591							
0.7129 0.9111							
249.5 283.8							
266.1 45.01							
32 0001001101111101010101100001001111110001001001000111	0.8149	2.119	2.00	36	47 53	0 001001	103.9
176.3 184.3							
0.6109 0.5836							
0.07815 0.1446							
384.5 2.935							
69.47 225							

33 0001010011011001100110001001110110100110110110111110100	0.8157	-0.000	0.00	22	48 32	0 100110 140.4
299.4 270.8						
0.1732 0.6829						
0.9268 0.4717						
428.6 104.7						
489.2 257.3						
34 1110110001001011011100001001010110101110011101011110011	0.9851	1.283	2.00	48	22 51	0 101101 104.8
109.8 327.4						
0.7919 0.5476						
0.6777 0.8213						
404.1 8.806						
237.8 223.1						
35 010011110011110110001100110101100000011010001001000010	0.862	2.944	0.00	8	22 0	1 100011 167
91.84 201.6						
0.09064 0.2717						
0.6885 0.7617						
204.5 176.1						
64.58 281.8						
36 0010011010000011010100101110010010100100100010000101110	0.8298	2.679	4.00	22	8 0	0 100110 105.7
184.3 270.8						
0.5836 0.6829						
0.1455 0.4463						
283.8 8.806						
45.01 226						
37 0111111100011110111110001000111100001100001001100101111	0.8996	1.699	2.00	4	37 0	0 101010 147.2

50.59 12.66						
0.8482 0.6575						
0.4707 0.9648						
259.3 34.25						
296.5 380.6						
38 0111010101001001101110000110001001000000100100101000111	0.8918	2.568	0.00	37	4 0	2 011111 200.9
107.8 50.59						
0.3973 0.849						
0.07131 0.4707						
35.23 290.6						
320 296.5						
39 0101111000001000111100001101000100010111100010010111111	0.8737	1.300	6.00	30	7 5	1 000000 122.7
21.31 202.3						
0.7937 0.2435						
0.5342 0.4111						
471.6 128.2						
186.9 169.3						
40 1110010100000110000001110110000000101000011010001110101	0.9796	3.500	2.00	7	30 48	0 001011 115.4
17.98 334						
0.05285 0.4747						
0.005883 0.9375						
25.44 127.2						
114.5 143.8						
41 011010001010111100101010110100001000110000100101010111101	0.8816	2.163	2.00	11	39 49	0 010111 149.4
242.9 21.31						
0.3015 0.7937						

0.5176 0.1211						
259.3 347.4						
184.9 61.64						
42 1000111101000111100011011100000000111011100110010001000	0.9122	2.547	0.00	39	11 21	1 001101 176.4
105.1 234.9						
0.09767 0.2312						
0.007836 0.5342						
225 471.6						
133.1 18.59						
43 0110111001110001110100110001111100010100000111110110000	0.8863	1.102	0.00	30	20 11	2 001011 89.03
161 308.1						
0.5845 0.6293						
0.9717 0.375						
257.3 127.2						
422.7 44.03						
44 1111011111111111011011010011110000010110110110110000100	0.9937	0.506	0.00	20	30 35	0 011100 199.6
349.3 163.7						
0.7682 0.4747						
0.8779 0.9326						
428.6 93.93						
379.6 481.4						
45 0100000100110101110111101110011011001001010010001000011	0.851	3.470	6.00	14	17 22	0 101001 196.8
81.19 26.63						
0.668 0.7005						
0.2129 0.8887						
80.23 437.4						

65.56 141.9							0 101001
46 0011110110010100010001011000101001010101010010110110000	0.8478	0.758	0.00	17	14 30		94.11
206.9 49.26							
0.4896 0.8033							
0.3233 0.02248							
330.7 139.9							
422.7 53.82							
47 101011010000011000001101100111010001100000011011100110	0.9357	3.157	6.00	8	6 22		1 100011 166
17.98 201.6							
0.09591 0.2488							
0.9102 0.4756							
2.935 172.2							
225 281.8							
48 101101111101110110011011101101100010001101011100000100	0.9435	2.547	2.00	6	8 38		1 010111 194.9
327.4 55.91							
0.5476 0.5599							
0.8467 0.7617							
104.7 365.9							
254.4 196.7							
49 1110100001101001010010101000111110010010011100001011011	0.982	3.064	4.00	22	13 28		1 100110 73.57
149.7 270.8							
0.5248 0.6829							
0.4873 0.1026							
152.6 8.806							
89.04 100.8							
50 1001110100101101001101110010010011110010000101001111010	0.9231	3.033	2.00	13	22 33		0 100000

```

||| 69.88| ||||| 74.54| |
||| 0.3885| ||||| 0.8025| |
||| 0.1553| ||||| 0.4414| |
||| 130.1| ||||| 401.2| |
||| 119.4| ||||| 215.3| |

```

```

+--+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
Peso%= Peso dentro de la ruleta que se emplear para seleccion ar los padr es.
Sele%= % que indica el # de veces en que fue efectivamente se le leccionad o como padre.
XP= Posici donde hubo entrecruzamiento. Si no hubo entrecruz am iento, en tonces XP= 0.
NM= Numero de mutaciones.

```

```

+-----+
| ESTAD^STICAS DE LA GENERACI^N 1 |
+-----+
Fpromedio: 144.4
Fmax(x1): 210.2
x1: 0.9019608 74.54012 0.8024545 0.4414194 4 1.1742 215 0.2642
Fmin(x2): 64.09
x2: 0.85098 81.1937 0.45797 0.255877 4.89 23 7 65 0.5577
Entrecruzamientos: 42
Mutaciones: 25

```

```

+-----+
| ESTAD^STICAS DEL AG HASTA LA GENERACI^N 1 |
+-----+

```

```

Fmax(x1): 297.6
x1: 0.8156863 299.4325 0.1732424 0.9267595      4 28.5714 489 0.2368
Fmin(x2): 64.09
x2: 0.85098 81.1937 0.45797 0.255877 4.89    23 7 65 0.5577
Entrecruzamientos: 42
Mutaciones : 25
+-----+

```

RESULTADO DE GENERACION 1000

(Archivo generado "gen1000.txt")

<u> _3 </u> 0001000110000000011111111101001111110000000000000001	0.8133	2.064	4.00	6	23	0
180.3 201.6						
0.8991 0.6328						
0.625 0.8438						
0 0						
0.9785 0.9785						
<u> _4 </u> 000010011001010001011001111101111110000000000000000	0.8071	2.078	6.00	23	6	0
206.9 180.3						
0.6328 0.7866						
0.875 0.9521						
0 7.828						
0 3.914						
<u> _5 </u> 000010011001000001011001111111111110000000000000001	0.8071	2.072	4.00	26	34	19
201.6 33.95						
0.6328 0.8552						
1 0.7422						
0 0						
0.9785 0						
<u> _6 </u> 000010011001000001011001111101111110000000000000001	0.8071	2.069	4.00	34	26	52
201.6 10.67						
0.6328 0.4492						
0.875 1						
0 7.828						
0.9785 0.9785						
<u> _7 </u> 0000000000000000011111111011111110000000000000001	0.8	2.166	4.00	19	46	26
10 32.62						

0.8991 0.7585						
0.999 0.9844						
0 2.935						
0.9785 0						
<u> 8 </u> 00110001100000100111101110011111101110000000000000000	0.8384	2.083	0.00	46	19	39
183 55.24						
0.8692 0.675						
0.9922 0.9453						
0 16.63						
0 0						
<u> 9 </u> 00000000000000010110111110111100011100000001000100001	0.8	1.837	2.00	45	31	15
11.33 22.64						
0.7866 0.871						
0.9453 0.6953						
0.9785 0.9785						
32.29 0						
<u> 10 </u> 000100011000000011110011001011111110000000000000010	0.8133	2.058	0.00	31	45	18
180.3 20.65						
0.8552 0.7875						
0.75 0.9688						
0 18.59						
1.957 0						
<u> 11 </u> 001001000001001001111001111110111110000000000000000	0.8282	2.105	0.00	32	37	26
33.95 32.62						
0.8578 0.7726						
0.9688 0.9922						
0 0						

0 1.957						
12 00001001100100000101100111111111111101000000000000001	0.8071	0.639	0.00	37	32	14
201.6 33.95						
0.6328 0.8991						
1 0.9766						
125.2 0						
0.9785 0						
13 01100001000000100111100111011111110100000011000000110	0.8761	2.072	0.00	42	26	8
12.66 33.95						
0.8569 0.9						
0.998 0.999						
2.935 0.9785						
5.871 0						
14 01000000000000001101111101111101110000001000000000100	0.8502	2.057	2.00	26	42	27
10 13.99						
0.7866 0.3367						
0.9834 1						
7.828 0						
3.914 0						
15 000010011001000001011001111110111111000000100000000011	0.8071	2.014	2.00	19	37	15
201.6 33.95						
0.6328 0.8991						
0.875 0.9922						
3.914 2.935						
2.935 0						
16 0101010000000001110111111111111100000000000000010000	0.8659	2.006	4.00	37	19	43

12 32.62						
0.7875 0.7594						
0.999 0.9453						
0 0						
15.66 1.957						
17 000000000000000011111111111111110000000000000000	0.8	2.175	4.00	46	25	4
10 12						
0.9 0.7875						
1 0.9844						
0 16.63						
0 7.828						
18 000100101000000011010011101011111111000000000000011	0.8141	2.048	0.00	25	46	29
180.3 55.24						
0.7445 0.6671						
0.75 0.999						
0 0						
2.935 0						
19 011001110001000101101011111111000111000000011000000000	0.8808	2.075	6.00	34	25	26
32.62 10.67						
0.7594 0.4079						
0.9453 0.999						
2.935 0						
0 126.2						
20 0000000000000010010110011101111111110000000100000000	0.8	2.124	2.00	25	34	42
12.66 12						

0.632 0.7849						
1 0.7422						
0.9785 0						
0 0						
21 0000100010010000010111111011111011110000000000000000	0.8063	2.081	0.00	5	14	30
201.6 10						
0.6742 0.7453						
0.9844 0.9834						
0 70.45						
0 3.914						
22 00000101100010000101100111111011111000010001000000000	0.8039	1.918	0.00	14	5	22
191 201.6						
0.6328 0.6742						
0.875 1						
16.63 0						
0 0.9785						
23 01000000100000000110111110111100111000000100000000100	0.8502	1.970	4.00	16	31	55
180.3 22.64						
0.7866 0.7875						
0.9521 0.999						
7.828 15.66						
3.914 15.66						
24 000100000000000001101001110101111111000000000000001	0.8125	2.144	0.00	31	16	31
10 17.32						
0.7445 0.9						
0.75 0.9688						
0 18.59						

0.9785 0						
25 001001000000001111011111111111111111000000000000000	0.8282	2.149	6.00	42	4	8
12 206.9						
0.7875 0.6328						
0.999 0.875						
0 63.6						
0 0						
26 00110001000100100111111110111111111111000000000000000	0.8384	2.107	4.00	4	42	46
33.95 11.33						
0.8991 0.3376						
1 0.999						
0 0						
0 0						
27 010000000000001001011111111111100011100000000100000000	0.8502	2.101	0.00	4	17	0
11.33 260.2						
0.3376 0.6328						
0.9453 0.875						
0.9785 0						
0 62.62						
28 0000000000001001111011111110001110000000000000000	0.8	2.115	2.00	17	4	0
22.64 10						
0.784 0.9						
0.9453 1						
0 0						
0 0						
29 00100100000100100111111110111111100011100000000100000000	0.8282	2.097	2.00	23	35	0

33.95 180.3						
0.8991 0.8991						
0.9453 0.9521						
0.9785 7.828						
0 3.914						
30 0000000001000100111100111010111101110000000000000000	0.8	2.088	0.00	35	23	0
55.24 33.95						
0.8569 0.6328						
0.7422 0.9453						
0 35.23						
0 0						
31 0110011000001001111011111111101111100001001100000000	0.88	1.940	6.00	40	31	0
22.64 11.33						
0.7875 0.7875						
0.9688 1						
18.59 0						
0 0						
32 000000010001000101101101111001110000000000000000	0.8008	2.103	2.00	31	40	0
32.62 22.64						
0.7726 0.7875						
0.9766 0.9688						
0 18.59						
0 0						
33 000100011000000001111001100101111111000000000000010	0.8133	2.058	0.00	34	36	0
180.3 10.67						

0.8552 0.8552						
0.75 0.7422						
0 0						
1.957 0.9785						
34 000100000000000101110011001011110111000000000000001	0.8125	2.104	6.00	36	34	0
10.67 12						
0.4052 0.8965						
0.7422 1						
0 0.9785						
0.9785 0						
35 00100111000100100101100111111100011100010010000000000	0.8306	1.748	2.00	6	28	16
33.95 182.3						
0.6328 0.784						
0.9453 0.9434						
35.23 0						
0 0.9785						
36 000000000000001111111011111111110000000100000000	0.8	2.150	4.00	28	6	51
12 20.65						
0.8965 0.6328						
1 0.875						
0.9785 0						
0 0						
37 00100100000100100111111101111101111000000000000010	0.8282	2.089	6.00	5	16	0
33.95 201.6						
0.8991 0.6328						
0.9922 1						
0 3.914						

1.957 0.9785						
38 000000000000010110110011111111101110000000011000000	0.8	-0.000	0.00	16	5	0
13.33 12						
0.6328 0.7875						
0.9922 0.999						
0 7.828						
187.9 140.9						
39 0001000110000000111111101101111110000000000000001	0.8133	2.071	0.00	3	29	6
180.3 33.95						
0.8991 0.8429						
0.874 0.9414						
0 0.9785						
0.9785 8.806						
40 001100010000000111101111111111111000000000000000	0.8384	2.149	2.00	29	3	55
12 180.3						
0.7875 0.8991						
1 0.625						
0 0						
0 0						
41 01010100000000111101111111111000111000000000000010	0.8659	2.131	0.00	3	36	27
12 12						
0.7875 0.675						
0.9453 1						
0 0.9785						
1.957 0						
42 0100010000000010010111111111111100000000100000000	0.8533	2.102	4.00	36	3	25

11.33 180.3						
0.3376 0.8956						
0.999 0.625						
0.9785 0						
0 0.9785						
43 00100100000100100111100111011011111100000000000000000	0.8282	2.102	0.00	4	7	30
33.95 206.9						
0.8569 0.6328						
0.874 0.999						
0 0						
0 0.9785						
44 00000000000001001111111111110111110000000000000010	0.8	2.137	0.00	7	4	1
12.66 10						
0.9 0.8991						
0.9688 0.875						
0 0						
1.957 0						
45 000000010000100001111001110101100011100000001000000000	0.8008	2.107	2.00	15	37	43
20.65 33.95						
0.8569 0.8991						
0.6953 0.9922						
0.9785 0						
0 1.957						
46 00000000001000100101111110111101111000010001000000000	0.8	1.932	4.00	37	15	37
55.24 213.6						
0.6742 0.5204						
0.9844 0.875						

16.63 129.2						
0 2.935						
47 000000000000010011110111101111101110000000000000001	0.8	2.144	0.00	20	9	22
12.66 12.66						
0.871 0.6742						
0.9922 0.4453						
0 0.9785						
0.9785 0						
48 00110001000000011110111111111111100000000000000000	0.8384	2.149	0.00	0	0	35
12 10						
0.7875 0.9						
0.999 1						
0 0						
0 0						
49 01000000000100000101100111111011111110000000000000000	0.8502	2.097	0.00	25	17	0
31.29 12						
0.6328 0.7875						
0.874 0.999						
0 0						
0 0						
50 0000100110000000011111111011011111110000000000000001	0.8071	2.071	0.00	17	25	0
180.3 10						
0.8991 0.9						
0.875 0.75						
0 0						
0.9785 0						
+---+-----+-----+-----+-----	-+	---+---+	---+---	-----	-----	-----
Peso%= Peso dentro de la ruleta que se emplear para <u>seleccion</u>	ar	los <u>padr</u>	es.			

Sele%= % que indica el # de veces en que fue efectivamente seleccionado como padre.
 XP= Probabilidad de hubo entrecruzamiento. Si no hubo entrecruzamiento, en tonces XP=0.
 NM= Numero de mutaciones.

```

+-----+
| ESTADÍSTICAS DE LA GENERACIÓN 1000 |
+-----+
-----
+ Fpromedio: 52.04
Fmax(x1): 79.5
x1: 0.8658824 11.99609 0.7875152 0.9990235 7 0.827789
140 0.9002
Fmin(x2): 47.46
x2: 0.8 10 0.9 1 0
Q
Entrecruzamientos: 34
Mutaciones: 44
+-----+

+-----+
| ESTADÍSTICAS DEL AG HASTA LA GENERACIÓN 1000 |
+-----+
-----
+ Fmax(x1): 297.6
x1: 0.8156863 299.4325 0.1732424 0.9267595 4 28.5714
489 0.2368
Fmin(x2): 47.46
x2: 0.8 10 0.9 1 0
Q
Entrecruzamientos: 19866
Mutaciones: 13619
+-----+

```

ANEXO No03

MAPAS ARCGIS DE LA SUBCUENCA QUILVIRE

