

UNIVERSIDAD DE CUENCA.



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS. ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL.

IMPLEMENTAR EL SISTEMA DE MODELACIÓN WEAP COMO HERRAMIENTA QUE DETERMINE EL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA DISPONIBILIDAD DEL AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO MACHÁNGARA

TESIS DE GRADO PREVIO
A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL.

AUTORA:

MAYRA ALEJANDRA PARRA ULLAURI.
C.I. 0104967187.

DIRECTOR:

ING. MSC. ALEX AVILÉS AÑAZCO.
C.I. 0102247186.

CUENCA – ECUADOR
2016



RESUMEN

Existen diferentes aspectos que pueden perjudicar la cantidad y calidad de agua en una cuenca, como el crecimiento poblacional, el cambio de uso del suelo, cambio climático, etc. Sin embargo, el aspecto más sensible y de mayor preocupación es el cambio en el clima que podría acarrear el incremento de eventos extremos hidrometeorológicos que podría perjudicar al abastecimiento de agua para diferentes demandas. Es por esto que la presente tesis analizó escenarios climáticos futuros de cambios en la precipitación y temperatura y su incidencia en la disponibilidad de agua en una cuenca hidrográfica. Se utilizó el modelo de planificación WEAP (Water Evaluation and Planning) como una herramienta que determinara el impacto del cambio climático sobre la disponibilidad del agua en la cuenca del Río Machángara. La implementación del modelo consistió en recopilar datos históricos climatológicos e hidrológicos, además de la cartografía de la zona de estudio de manera que sirvieron de soporte para la misma obteniendo modelos que pueden ser comparados con la realidad actual. Además, el software permitió el uso de escenarios climáticos ECHAM A2 y B2, para obtener resultados a los cambios producidos por las variaciones de clima sobre el suministro del agua, así los gestores de agua podrían definir y formular estrategias futuras para una planificación y gestión del agua a corto y mediano plazo. Entre los resultados obtenidos del cruce entre la oferta y demanda de agua en el futuro, se tiene que para el caso de la demanda para consumo humano para los meses entre junio y agosto existirá un déficit de agua para cubrir sus necesidades. Este estudio podría servir para que los gestores del agua tomen una decisión sustentada en un mejor uso posible del recurso hídrico actual y futuro y su correcta administración en la permanente búsqueda de un desarrollo sostenible de la población de la cuenca del río Machángara.

Palabras Clave: Disponibilidad de Agua, Cambio Climático, Oferta y demanda de agua, cuenca del río Machángara.



ABSTRACT.

There are different aspects that may impair the quantity and quality of water in a basin, such as population growth, the change of use of soil, climate, etc. However, the greatest concern and most sensitive aspect are the change in the climate that could lead to the increase of extreme events hydro meteorological that could jeopardize the supply of water for different demands. Therefore, this thesis analyzed future climatic scenarios of changes in precipitation and temperature and its impact on the availability of water in a river basin.

In the present study, which will raise was analyzing the WEAP (Water Evaluation and Planning) planning model as a tool that will determine the impact of climate change on water availability in the basin of the Machángara River. The implementation of the model consisted of collecting historical data climatological and hydrological; in addition to the cartography of the zone of study so that they served as support for the same obtaining models that can be compared with the current reality. In addition, the software allowed the use of climate scenarios ECHAM A2 and B2, to for results to the changes brought by the variations of climate on water supply, and water managers could define and formulate future strategies for planning and management of water in the short and medium term. Among the results obtained from a cross between the supply and demand for water in the future, is that in the case of demand for human consumption for the months between June and August there will be a deficit of water for your needs. This study could serve as the water managers to take a decision based on a better use of the current and future water resource and its proper administration in the permanent search for a sustainable development of the population of the Machángara River basin.

Key words: Water availability, climate change, supply and demand for water, the Machángara River basin.



Tabla de Contenidos.

RESUMEN.....	2
ABSTRACT.....	3
CAPÍTULO 1. Aspectos Generales.....	10
1.1 Introducción.....	10
1.2. Justificación.....	11
1.3 Objetivos.....	11
1.3.1 Objetivo General.....	11
1.3.2 Objetivos Específicos.....	11
CAPÍTULO 2. Revisión Bibliográfica.....	12
2.1.- Cambio Climático (CC) y Escenarios de Cambio Climático.....	12
2.1.1.- Escenarios Climáticos.....	13
2.1.2.- Modelos Globales.....	14
2.1.3.- Modelos Regionales.....	15
2.2.- Gestión Integrada Recursos Hídricos (GIRH).....	16
2.3.- Modelación Hidrológica.....	16
2.4.- Modelo WEAP.....	17
2.4.1.- Metodología:.....	17
2.4.2.- Algoritmos de WEAP.....	19
CAPÍTULO 3. Caracterización de la Zona de Estudio.....	24
3.1.- Descripción General.....	24
3.1.2.- Microcuenca del Río Machángara Alto.....	25
3.1.3.- Microcuenca del Río Chulco.....	25
3.1.4.- Microcuenca del Río Machángara Bajo.....	25
3.2.- Características topográficas de la zona de estudio.....	25
3.3.- Características Climatológicas.....	27
3.4.- Uso del suelo.....	27
CAPÍTULO 4: METODOLOGIA.....	29
4.1 Creación de Modelos.....	29
4.1.1. Recopilación y Preparación de los datos.....	29
4.1.2. Series Meteorológicas.....	30
4.1.3. Información disponible en las estaciones.....	31
4.1.4. Creación de la topología en WEAP.....	31
4.1.5. Control Fluviométrico.....	33
4.1.6. Series de Precipitación.....	34



4.1.1. Series de Temperatura.	36
4.1.8. Demanda de Agua.....	37
4.2. Calibración.....	39
4.2.1.- Parámetros de Calibración.	40
4.3.- Creación de Escenarios.	41
CAPÍTULO 5: RESULTADOS.	50
5.1.- Resultados de la Calibración.	50
5.2.- Resultados de la Validación.....	53
5.3. Resultados de los Escenarios Climáticos Futuros.	60
5.3.1.- Análisis de caudales medios mensuales.	61
5.2.2.- Demandas.....	64
CAPÍTULO 6: Conclusiones y Recomendaciones.....	71
6.1. Conclusiones Modelo WEAP.	71
6.3. Recomendaciones.....	73
Referencias Bibliográficas.....	74
ANEXOS.....	78
Anexo 1.....	78
Anexo 2.....	79
Anexo 3.....	80
Anexo 4.....	81

Índice de Tablas.

Tabla 1. Parámetros de Uso del Suelo.....	18
Tabla 2 Alturas Promedio de la Cuenca del Río Machángara	25
Tabla 3 Información Estaciones Meteorológicas.....	31
Tabla 4. Estadística de Caudales del Machángara en Chanlud, período 1988-2008.....	33
Tabla 5. Estadística de Caudales de Chulco en “El Labrado”, período 1988-2008.....	33
Tabla 6. Régimen de la Precipitación Mensual Fuente: (INAMHI 1988-2008).....	34
Tabla 7. Valores referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe.....	39
Tabla 8. Parámetros de Calibración del modelo	50
Tabla 9. Indicadores de Error.....	52
Tabla 10. Indicadores de Error.....	53
Tabla 11. Indicadores de Error en la Validación.....	56
Tabla 12. Indicadores de Error en la Validación.....	59
Tabla 13. Resultados de Caudal para escenarios climáticos, estación Chanlud.....	61
Tabla 14. Resultados de Caudal para escenarios climáticos, estación Labrado.....	61
Tabla 15 Resultados de Demanda promedio mensual, periodos: Observado vs Simulado.....	64

Índice de Figuras.

Figura 1. Esquema Modelo Método Humedad del Suelo.....	20
Figura 2. Mapa de la Cuenca del Río Machángara.	24
Figura 3. Mapa de Bandas de Altura de la Cuenca del Río Machángara.....	26
Figura 4. Mapa de Uso del Suelo.....	28
Figura 5. Mapa de Estaciones meteorológicas.....	30
Figura 6. Esquema Conceptual del modelo WEAP.	32
Figura 7. Mapa de Isoyetas de precipitación anual.....	35
Figura 8. Precipitación media anual Vs Altura.....	36
Figura 9. Gradiente de Temperatura en el Periodo Jun – Sept.....	37
Figura 10. Mapa de distribución de zonas de estudio PRECIS.	42
Figura 11. Mapa de distribución de la grilla en la Zona 2.....	44
Figura 12. Tendencia Precipitación Anual Estación Chanlud Escenario A2.	45
Figura 13. Tendencia Precipitación Anual Estación Chanlud Escenario B2	46
Figura 14. Tendencia Temperatura Estación Chanlud Escenario A2.	46
Figura 15. Tendencia Temperatura Estación Chanlud Escenario B2	47
Figura 16 Tendencia Precipitación Estación Labrado Escenario A2.....	47
Figura 17. Tendencia Precipitación Estación Labrado Escenario B2.	48
Figura 18. Tendencia Temperatura Estación Labrado Escenario A2	48
Figura 19. Tendencia Temperatura Estación Labrado Escenario B2.	49
Figura 20. Caudales medios mensuales simulados y observados Microcuenca Machángara Alto.	51
Figura 21. Ajustes de caudales medios Anuales de la Microcuenca Machángara Alto.	51
Figura 22. Caudales medios mensuales simulados y observados Microcuenca Río Chulco.	52
Figura 23. Ajustes de caudales medios Anuales de la Microcuenca Río Chulco.	53
Figura 24 Ajustes de caudales medios mensuales de la Microcuenca Machángara Alto.....	54
Figura 25 Ajustes de caudales medios Anuales de la Microcuenca Machángara Alto	54
Figura 26 Porcentaje de tiempo excedido de la Microcuenca Machángara Alto.	55
Figura 27. Relación entre caudales medios mensuales observados y simulados.....	56



Figura 28: Caudales medios mensuales simulados y observados Microcuenca rio Chulco57
Figura 29 Ajustes de caudales medios Anuales de la Microcuenca del rio Chulco.....57
Figura 30. Porcentaje de tiempo excedido de la Microcuenca del rio Chulco.....58
Figura 31. Relación entre caudales medios mensuales observados y simulados.....59
Figura 32. Caudal promedio mensual, estación Chanlud, escenarios ECHAM A2 y B2.60
Figura 33. Caudal promedio mensual, estación Labrado, escenarios ECHAM A2 y B2.....61
Figura 34. Promedio mensual Presente y Futuro Caudales A2 Machángara Alto.62
Figura 35 Promedio mensual Presente y Futuro Caudales B2 Machángara Alto.....62
Figura 36 Promedio mensual Presente y Futuro Caudales A2 Río Chulco.....63
Figura 37 Promedio mensual Presente y Futuro Caudales B2 Río Chulco.....64
Figura 38 Comparación entre la demanda del periodo base y el proyectado.....65
Figura 39 Balance Hídrico entre oferta y demanda por consumo humano del periodo observado y el escenario A266
Figura 40 Balance Hídrico entre oferta y demanda por consumo humano del periodo observado y el escenario B267
Figura 41. Balance Hídrico entre oferta y demanda por canal Agrícola Machángara y La Dolorosa del periodo observado y el escenario A2.....69
Figura 42 Balance Hídrico entre oferta y demanda por canal Agrícola Machángara y la Dolorosa en el periodo observado y el escenario B270



Yo, Mayra Alejandra Parra Ullauri, autora de la tesis "IMPLEMENTAR EL SISTEMA DE MODELACIÓN WEAP COMO HERRAMIENTA QUE DETERMINE EL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA DISPONIBILIDAD DEL AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO MACHÁNGARA", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniera Ambiental. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora

Cuenca, 31 de octubre de 2016

A handwritten signature in blue ink, written over a horizontal line.

Mayra Alejandra Parra Ullauri

C.I: 0104967187



Yo Mayra Alejandra Parra Ullauri, autora de la tesis "IMPLEMENTAR EL SISTEMA DE MODELACIÓN WEAP COMO HERRAMIENTA QUE DETERMINE EL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA DISPONIBILIDAD DEL AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO MACHÁNGARA", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 31 de octubre del 2016

A handwritten signature in blue ink, written over a horizontal line.

Mayra Alejandra Parra Ullauri

C.I: 0104967187



AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer a Dios por permitirme culminar mis estudios y continuamente darme la fortaleza para seguir adelante.

A mi director de Tesis el Ing. Msc. Alex Avilés por ser uno de los pilares fundamentales para que este trabajo se logre, con sus conocimientos y sobre todo paciencia para lograr terminar este trabajo con éxito.

A todas las entidades que me aportaron de la información para el desarrollo del modelo como son ETAPA EP, ELECAUSTRO, SENAGUA, INAHMI y al Ministerio de Ambiente, en especial al Ingeniero Jorge Nuñez por su apoyo con la información de escenarios climáticos requeridos para el estudio.



DEDICATORIA.

A mi madre Marlene por ser un ejemplo de constancia, dedicación, sacrificio y sobre todo fortaleza. Por su apoyo, consejos y más que nada ánimos y cariño para continuar cada paso para finalizar mi carrera.

A mis hermanos por demostrarme siempre que se puede llegar lejos y tener expectativas para volar alto.

A mi novio Pedro José por ser mi compañero y mejor amigo durante todos los años universitarios, por creer en mí, por su paciencia, cariño y amor. Por formar parte de este gran logro.

A mis amigos en especial a Lorena, Micaela y Jorge por siempre estar al pendiente, dándome ánimos y apoyándome siempre para obtener los mejores resultados. Por compartir conmigo todos estos años universitarios haciéndolos de esta una experiencia inolvidable.

Finalmente, este logro se lo dedico de manera especial a usted abuelita que ahora nos mira desde cielo, espero esté orgullosa.



CAPÍTULO 1. Aspectos Generales

1.1 Introducción.

La cuenca del Río Machángara representa una importante fuente de agua para la Ciudad de Cuenca y sectores aledaños debido a los grandes beneficios que obtenemos de la misma, como se puede mencionar: el abastecimiento de agua potable a cargo de la empresa ETAPA, el aprovechamiento hidro-energético a cargo de la empresa Elecaastro, los sistemas de riego que benefician a 2.325 usuarios y agricultores aproximadamente y finalmente el sector industrial que aprovechan los recursos hídricos para sus actividades productivas; por lo expuesto podemos observar que es una cuenca estratégica para las actividades socioeconómicas de la población del cantón Cuenca y por lo tanto el sistema hídrico debe ser manejado y gestionado de una forma planificada y en un contexto cuantitativo para una calidad y cantidad del agua adecuada para los distintos usos.

Existen algunos aspectos que perjudican la cantidad y calidad de agua en una cuenca hidrográfica, como cambios en el uso del suelo, el cambio climático, cambios de cultura en la utilización de los recursos hídricos por parte de los seres humanos. Sin embargo, un aspecto que cada vez tiene más relevancia en las instituciones académicas y las instituciones encargadas de la gestión del recurso hídrico es el cambio climático, y como éste impactará en la cantidad y calidad del recurso en el futuro. Es por esto que nace la necesidad de plantear y analizar escenarios futuros de cambios de patrones de algunas variables meteorológicas, como lluvia y temperatura, y sus impactos en el funcionamiento de sistemas de recursos hídricos en cuencas hidrográficas

Debido a lo expuesto anteriormente se plantea el siguiente estudio para implementar el modelo WEAP (Water Evaluation and Planning) como una herramienta que determine el impacto del cambio climático sobre la disponibilidad del agua en la cuenca del Río Machángara, y en donde se piensa desarrollar un modelo del sistema de recursos hídricos para analizar el balance entre la oferta y demanda de agua en la situación actual y mediante el planteamiento de escenarios futuros de cambio climático la situación a la cual nos estaríamos enfrentando en el futuro.



Se espera que los resultados de este proyecto sirvan para sustentar la toma de decisiones de los gestores de agua, mediante la adopción de estrategias, medidas y políticas para una correcta planificación y gestión del recurso hídrico.

1.2. Justificación.

De acuerdo con las necesidades sociales, productivas y ambientales que requieren la ciudad de Cuenca y el país en general lo que se busca con este estudio es lograr una adecuada gestión del agua, mediante el balance entre la oferta y demanda del recurso en la cuenca del río Machángara. Esta información podría servir de gran ayuda para quienes toman las decisiones sobre la planificación y gestión del agua en el ámbito de la investigación, de esta forma servir de apoyo para nuevos estudios que se puedan realizar en la zona.

El programa de aplicación WEAP (Water Evaluation and Planning) servirá como una herramienta para determinar el impacto del cambio climático sobre la disponibilidad de agua en la cuenca del río Machángara, y sus resultados podrán fortalecer la toma de decisiones frente a la gestión y planificación del recurso hídrico; así incrementar la capacidad de respuesta a los riesgos que pueden producirse por eventos hidrometeorológicos extremos que afectan a la población y que pueden intensificarse por los efectos del cambio climático.

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivo General.

Implementar el sistema de modelación WEAP como herramienta que determine el impacto del cambio climático sobre la disponibilidad de agua en la cuenca del río Machángara para el fortalecimiento de la toma de decisiones frente a la gestión y planificación del recurso hídrico.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Construcción de un modelo del sistema de recursos hídricos de la cuenca del río Machángara utilizando WEAP (Water Evaluation and Planning).
- Generar dos posibles escenarios climáticos futuros para simular la gestión del recurso hídrico.
- Analizar y discutir los resultados de la simulación con respecto al cruce entre la oferta y la demanda del recurso hídrico.

CAPÍTULO 2. Revisión Bibliográfica.

En la actualidad, una de las mayores preocupaciones de la sociedad es el déficit del recurso hídrico para las diferentes actividades de uso primordial debido al gran incremento de la población que lo hace a este recurso vulnerable a su escasez por el aumento de su demanda, así como al evidente cambio climático por el que estamos atravesando actualmente, haciendo de suma importancia que los estudios tanto para la calidad como la cantidad de las fuentes hídricas que abastecen a las diferentes zonas así como su planificación vayan tomando cada vez más fuerza.

2.1.- Cambio Climático (CC) y Escenarios de Cambio Climático.

Se define el cambio climático como una modificación del clima con respecto al historial climático a escalas globales y regionales causadas por razones naturales y/o antropogénicas. Este cambio es producido por las variaciones de las concentraciones de los gases de efecto invernadero y radiación solar en la atmósfera y en la cubierta terrestre que afectan a parámetros meteorológicos como: temperatura, presión atmosférica, precipitaciones y nubosidad. El Cambio Climático se hizo evidente con el aumento de la temperatura global del océano de 0,1°C desde 1961 hasta el año 2003, mostrándose en el intervalo desde 1991 al 2003, elevados índices de calentamiento; los cuales en promedio se incrementan con el tiempo a escalas no lineales. Por otro lado, la real importancia de estimar el efecto del Cambio Climático se basa en su influencia sobre los recursos hídricos, el sector agropecuario, la biodiversidad y los eventos extremos (CEPAL, 2009). Otras proyecciones indican un aumento de las emisiones mundiales de los GEI en los años 2000 y 2030 fluctuando entre un 25% y 90%, esto bajo el supuesto que los combustibles fósiles son dominantes a nivel mundial (IPCC, 2007).

Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) los escenarios climáticos “Son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro, y constituyen un instrumento apropiado para analizar de

qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones futuras, y para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis". (IPCC, 2000). De esta forma los escenarios se convierten en una herramienta fundamental para el análisis del cambio climático, y especialmente para la creación de modelos del clima, a su vez para la evaluación de los impactos y para las iniciativas de adaptación y de mitigación.

2.1.1-. Escenarios Climáticos

Los escenarios SRES (Special Report on Emissions Scenarios) (IPCC, 2000), fueron construidos para explorar los futuros desarrollos en el medioambiente global, con especial énfasis en la producción de gases de efecto invernadero y emisiones de aerosoles precursores (Carter et al, 1999), agrupándose en 4 familias, siendo éstos los escenarios A1, A2, B1 y B2. Estos son consistentes con el crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico y el cambio tecnológico.

El escenario **A1** considera un mundo de rápido crecimiento económico, cuyo pico de población se alcanza a mediados de siglo encontrándose una rápida introducción de nueva y más eficiente tecnología. El escenario **B1** describe un mundo convergente, con la misma población que el escenario A1, pero con un cambio aún mayor en lo referente a las estructuras económicas y a la introducción de las economías limpias. El escenario **A2** da cuenta de un mundo altamente heterogéneo, en donde se tiene un fuerte crecimiento demográfico, y un lento crecimiento económico asociado a pequeños cambios tecnológicos. Finalmente, el escenario **B2** da cuenta de un mundo de población y crecimiento económico intermedio, enfatizando las soluciones locales a soluciones de ámbito sustentable. (IPCC, 2007).

Estos cuatro tipos de escenarios climáticos se relacionan con cuatro trayectorias de emisiones de gases de efecto invernadero. El cambio en emisiones de dióxido de carbono provenientes de fuentes energéticas y/o industriales para el año 2100, varía de una disminución del 4% (escenario B1) a un aumento aproximado

de 320% (escenario A2), si se compara con lo observado hasta el año 2000 para estos cuatro escenarios. Estas estimaciones de futuras emisiones se calculan asumiendo que no existiera ninguna puesta en práctica de políticas climáticas. La concentración de dióxido de carbono atmosférico aumenta de la concentración actual de 370 ppmv a una concentración cercana de 550 ppmv en el escenario B1 para el año 2100 y por encima de 830 ppmv en el escenario A2. (IPCC, 2007).

Dado que los escenarios de emisiones son distintos, y varían según los cambios en las emisiones de los GEI derivados por proyecciones en el plano ambiental, social, político, económico y tecnológico, los resultados varían según la elección de un escenario “optimista” o uno “pesimista”. Un escenario Optimista se acoge al hecho de durante un periodo determinado de tiempo se vaya a reducir los GEI y por lo tanto disminuyen los efectos del cambio climático sobre los distintos ámbitos identificados, por otra parte, un escenario pesimista representa un aumento de los GEI y se produce un aumento de los efectos que produce el CC en el planeta.

En este marco es conveniente identificar que se puede realizar modelos a gran escala como más específicos, en este caso existen una serie de modelos globales y regionales que determinan el comportamiento climático de una zona.

2.1.2.- Modelos Globales.

Un modelo general de circulación (MCG, en inglés: GCM) es un modelo de tipo matemático sobre lo que es la circulación de una atmósfera u océano planetario y se basan en ecuaciones Navier-Stokes sobre una esfera rotatoria utilizando términos termodinámicos para las diversas fuentes de energía (radiación, calor latente). Estas ecuaciones sirven de base para modelos complejos en programas de computador que normalmente se utilizan para simular las condiciones de la atmósfera y océanos de la Tierra. (“Modelo de Clima Global (MCG),” n.d.)



Los MCGs son componentes claves del modelo de clima global, junto con componentes de la superficie terrestre y del mar como hielo marino. Estos modelos y los MCGs son ampliamente utilizados para el pronóstico del tiempo, para comprender el clima y para proyectar el cambio climático. (“Modelo de Clima Global (MCG),” n.d.)

2.1.3.- Modelos Regionales

Por otro lado, los Modelos regionales del clima son construidos para derivar información con mayor detalle espacial, en donde el dominio de cálculo corresponde a sólo una parte de la superficie terrestre, con lo cual puede ser descrita con mejor resolución (50, 25 km o menos). La compatibilidad con el modelo global se logra imponiendo la evolución de éste en las paredes laterales que limitan la región. (“Descripción escenarios climáticos | PACC,” 2009.)

EL Modelo Regional PRECIS, el cual es el modelo que se va a usar como referencia en este estudio, utiliza una malla regular latitud-longitud. Las ecuaciones son resueltas en coordenadas polares esféricas. Parametriza la capa límite y flujos en superficie, así como las ondas de gravedad en la interface suelo-atmósfera, la cobertura de la capa nubosa, el contenido de agua en las nubes (fase líquida y sólida) y la convección. El esquema de radiación incluye los ciclos estacionales y diurnos de insolación, y calcula flujos de onda corta y larga, los cuales dependen de la temperatura, del vapor de agua, ozono, dióxido de carbono (CO₂), nubes y gases traza. (“Descripción escenarios climáticos | PACC,” 2009.)

Para el estudio se manejó los resultados obtenidos por el proyecto PACC los cuales se refieren a los escenarios de emisiones SRES-A2 y SRES-B2. Las corridas se realizaron con el formamiento de dos modelos climáticos globales (GCM), en este caso el modelo Echam4, desarrollado en la universidad de Hamburgo y el Instituto Max Plank en Alemania. Estos resultados logran cubrir en parte dos tipos de incertidumbres asociadas a la generación de escenarios de cambio climático: la asociada a diversos modelos globales de circulación y

la relacionada a distintos escenarios de emisión de gases de efecto invernadero. (“Descripción escenarios climáticos | PACC,” 2009.)

Para ambos modelos se realizaron experimentos que llamaremos de control en el periodo entre los años 1960-1990, y luego se procedió a la realización de 4 experimentos futuros 2 por cada modelo (considerando ambos escenarios de emisiones). En el caso del modelo Echam4 los experimentos realizados cubren todo el período entre los años 1991-2100. (“Descripción escenarios climáticos | PACC,” 2009.)

2.2.- Gestión Integrada Recursos Hídricos (GIRH).

La GIRH no es más que una herramienta para asegurar el manejo equitativo, ambiental y económicamente sostenible de los recursos hídricos y de los servicios que suministran (GWP, 2002), además de ser una estrategia de adaptación en sistemas hídricos expuestos a fuertes variaciones espaciales y temporales a consecuencia del cambio Climático, que hacen que la oferta del agua sea cada vez más incierta mientras la demanda crece (García-González & Carvajal-Escobar, 2007).

2.3.- Modelación Hidrológica.

Es una metodología basada en la simulación de sistemas físicos a través de modelos fundamentados en funciones matemáticas empíricas y conceptuales que permite simular el caudal en base de datos propios de la cuenca. Los modelos que simulan fenómenos relacionados con recursos hídricos se pueden clasificar en tres grandes categorías: hidráulicos, que corresponden a aquellos que simulan el comportamiento de flujos en los cauces para distintos escenarios; hidrológicos, que simulan la relación entre las características meteorológicas y la escorrentía de una cuenca; y de planificación, que modelan la operación de los sistemas de recursos hídricos de una cuenca (Mena, 2009).

2.4.- Modelo WEAP.

De acuerdo a las necesidades actuales se han ido desarrollando herramientas que sirvan de apoyo para la toma de decisiones que garanticen y satisfagan las distintas demandas que se presenten, una de estas herramientas es el programa WEAP (Water evaluation and planning) que ha tenido gran aceptación en diferentes países alrededor del mundo apoyando estudios que integran la demanda, oferta y calidad del agua, considerando no sólo las condiciones hidro-climatológicas de la cuenca, sino a su vez las características del suelo, bien sea en una sola o en un conjunto de sub-cuencas (SEI, 2009).

2.4.1.- Metodología:

Los componentes del balance hidrológico que modela WEAP son: evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, escorrentía sub-superficial y flujo base. WEAP requiere la entrada de datos climatológicos y de cobertura vegetal para estimar estos componentes del balance hidrológico para cada una de las unidades espaciales básicas que tienen que ser identificados en el modelo. Estas unidades básicas de modelación corresponden a las zonas de captación denominadas en el modelo como catchments los cuales tienen que ser definidos a través de procedimientos de delimitación de subcuencas.

A través de este proceso se obtiene la caracterización de cobertura vegetal necesaria, incluyendo el estimado de las áreas y la distribución de cobertura vegetal dentro de cada zona de captación. (Guía de Modelación WEAP, 2009).

A continuación, en la Tabla N° 1 se describe brevemente los parámetros de uso del suelo que son considerados por el modelo:

Tabla 1. Parámetros de Uso del Suelo.

USOS DEL SUELO	
Área	Área de tierra para el tipo de cobertura vegetal dentro del catchment.
Kc	Coeficiente de cultivo, relativo al cultivo referencial, para un tipo de tierra.
Capacidad de agua en la zona de raíz (Sw)	El agua efectiva manteniendo la capacidad de la capa superficial de suelo, representado en (mm).
Capacidad de agua profunda (Dw)	Agua efectiva manteniendo la capacidad de la capa profunda del suelo (fondo del balde). Es un valor singular para el catchment y no varía según el tipo de uso. Es ignorado si el sitio de demanda tiene un vínculo de caudal hacia un nudo de agua subterránea.
Conductividad profundidad (Kd)	La tasa de conductividad (longitud/tiempo) de la capa profunda saturada (cuando hay un almacenaje relativo, $Z2 = 1$), que controla la transformación del caudal base. Es un valor singular para el catchment y no varía según el tipo de uso. La caudal base se incrementa si este parámetro incrementa.
Factor de Resistencia al Esguerrimiento (RRF)	Usado para controlar la respuesta del esguerrimiento superficial. El esguerrimiento tendera a decrecer con altos valores de este índice (rango 0.1 a 10). Este parámetro puede variar entre el tipo de uso.
Conductividad en la zona de raíz (Ks)	Tasa de conductividad en la zona de raíz a la saturación (cuando hay un almacenaje relativo $Z1 = 1$), que será repartida, de acuerdo con la preferencia de la dirección del flujo, entre el caudal poco profundo y caudal hacia la capa profunda de suelo. Esta tasa puede variar entre los tipos de uso.
Dirección de flujo preferente (PFD)	1= 100% horizontal, 0 = 100% vertical caudal. Usado para repartir el caudal fuera de la capa de la zona de raíz entre el caudal poco profundo y caudal hacia la capa profunda de suelo o agua subterránea. Este valor puede variar entre los tipos de uso.
Z1 inicial	El valor inicial Z1 al inicio de la simulación. Es el almacenaje relativo dado como porcentaje del almacenamiento total efectivo de la capacidad de agua en la zona de raíz.
Z2 inicial	El valor inicial Z2 al inicio de la simulación. Es el almacenaje relativo dado como porcentaje del almacenamiento total efectivo de la capacidad de agua profunda. Este parámetro es ignorado si el sitio de la demanda tiene un vínculo de esguerrimiento/infiltración al nudo de agua subterránea. Esta tasa no puede variar entre los tipos de uso.

Fuente: (Guía de Modelación WEAP, 2009).

Los datos climáticos requeridos para realizar la modelación incluyen precipitación, temperatura, humedad del viento, velocidad del viento, punto de derretimiento, punto de congelamiento y latitud. Adicionalmente, datos de caudales en estaciones de medición son necesarios para poder comparar los

resultados del modelo y realizar calibraciones. Finalmente, en el análisis de oferta de agua es necesario incorporar la información relativa a la infraestructura física de control y aprovechamiento existente al interior de la cuenca (Guía de Modelación WEAP, 2009).

2.4.2.- Algoritmos de WEAP

La simulación realizada por el modelo WEAP utiliza tres algoritmos o módulos:

1. Precipitación/escorrentía.
2. Demandas.
3. Humedad del suelo.

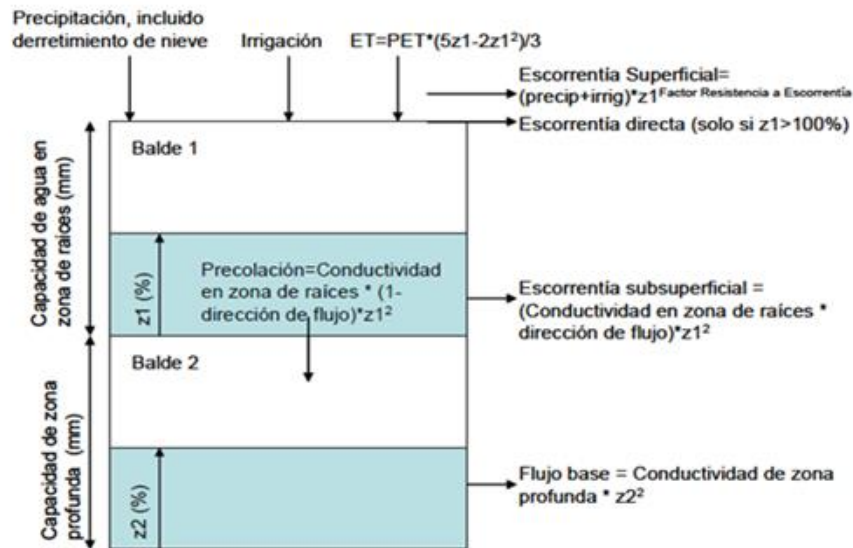
Es importante considerar que la opción de utilización de algunos de estos métodos, depende del nivel de complejidad o detalle que se quiera lograr, conforme el nivel de información con la que se dispone. (Guía de Modelación WEAP, 2009).

De estos tres métodos, el de demandas, es el más simple. Este método utiliza los coeficientes de cultivos para calcular la evapotranspiración potencial en la cuenca y así poder determinar cualquier demanda de riego que pueda ser solicitada para llenar esa porción de requerimiento evapotranspirativo que la lluvia no logra. Sin embargo, este método no simula escorrentía o procesos de infiltración. (Guía de Modelación WEAP, 2009).

El método de precipitación escorrentía, también determina evapotranspiración para el riego de cultivos o vegetación utilizando su coeficiente de cultivo. El resto de la lluvia no consumida por evapotranspiración es simulado como escorrentía hacia el río, o podría ser aportada entre escorrentía al río o flujo subterráneo al sistema acuífero de acuerdo al esquema topológico de la cuenca en estudio. (Guía de Modelación WEAP, 2009).

Finalmente, gracias a su flexibilidad, facilidad y capacidad de ajustar de mejor forma los resultados, se propone el uso del método de la humedad del suelo (Figura 1.) para la realización de este estudio el cual es unidimensional, definiéndose 2 capas de suelo, cuyo esquema se encuentra basado en funciones empíricas que representan la evapotranspiración, escorrentía superficial, escorrentía sub-superficial, y percolación profunda hacia la napa ubicada en la zona basal. Es importante indicar que esta aproximación permite caracterizar tanto el uso del suelo como el impacto de éstos en las posteriores modelaciones hídricas. (Riquelme, 2014)

Figura 1. Esquema Modelo Método Humedad del Suelo



Fuente: (Guía de Modelación WEAP, 2009).

Desde un enfoque de modelación hidrológica, una cuenca puede ser dividida en N fracciones de área, cada una de las cuales puede representar diferentes tipos de suelo o bien tener diversos usos, realizándose un balance hídrico para cada una de las fracciones j de N. Respecto al clima, se va a considerar uniforme sobre cada una de las sub-cuencas, donde el balance de aguas está dado por la ecuación.

$$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{e,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)z_{1,j}^2 - f_j k_s z_{1,j}^2 - (1 - f_j)k_s z_{1,j}^2$$



Donde:

- ✓ 1er término: Cambio en humedad del suelo.
- ✓ 2do factor: Precipitación efectiva (incluye riego y derretimiento de nieves).
- ✓ 3er término: Evapotranspiración.
- ✓ 4to factor: Escorrentía superficial.
- ✓ 5to término: Flujo intermedio.
- ✓ 6to factor: Percolación.

Para la Generación de los posibles escenarios de Gestión del Recurso Hídrico en la zona de estudio mediante el uso de WEAP, una vez que ya se contó con el modelo para la cuenca completamente calibrado se pueden realizar una serie de estudios específicos que corresponden a la evaluación de diferentes escenarios potenciales futuros. Los cuales pueden ser de diferentes tipos:

- a) Escenarios de crecimiento o cambio en la población
- b) Escenarios de uso de suelo
- c) Escenarios de clima.

Los escenarios de crecimiento o cambio de población pueden diseñarse considerando las tasas de crecimiento de población proyectadas hacia futuro, así como el cambio en la proporción de población rural y urbana, o el aumento de población dada por un evento específico dentro del modelo como la construcción de una represa. (Guía de Modelación WEAP, 2009).

Los escenarios de uso de suelo pueden considerar aspectos de cambio en la cobertura vegetal dada por tendencias futuras como por ejemplo disminución o aumento de zonas forestales, o cambio en tipos de cultivos por tendencias económicas. Todas estas consideraciones deben estudiarse de forma que al implementar el escenario se sepa con claridad que variables y funciones se van a tener en cuenta al definir el escenario. (Guía de Modelación WEAP, 2009).

En este estudio nos centraremos en los escenarios de clima debido que el interés es determinar cómo influirá el cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico, los mismos que constituyen uno de los aspectos de mayor uso en un modelo agregado como WEAP. Para este caso se va a manejar la metodología que asume como punto de partida las proyecciones de escenarios de cambio climático a una escala regional derivados del modelo regional PRECIS, el cual va a ser tomado como punto de referencia para esta metodología.

Los pasos sugeridos en este procedimiento se describen a continuación:

1. Una primera etapa consiste en relocalizar las proyecciones climatológicas históricas (de control) provenientes del modelo de cambio climático regional hacia las coordenadas de ubicación de las estaciones de medición (estaciones índices) de temperatura y precipitación. Luego se realiza una interpolación lineal espacial de los valores de las proyecciones climáticas regionales considerando las coordenadas de las diferentes estaciones índices usadas en el modelo, en este caso no se realizó interpolación. Se seleccionó la grilla más cercana a las estaciones base y se tomó los datos para su correspondiente corrección.
2. Se debe realizar una comparación mensual de los valores de acuerdo a la simulación y observación histórica, de esta manera se derivan factores de ajuste mensuales para temperatura y precipitación. En el caso de la temperatura, este factor de ajuste consiste en la diferencia entre los promedios mensuales de temperatura simulado y observado para el periodo histórico. En el caso de la precipitación, este factor de ajuste considera la división entre los promedios mensuales de precipitación simulado y observado. A continuación, se describen matemáticamente estos algoritmos:

$$\delta P_m^{ip} = \frac{\bar{P}_{PRECISBL,m}^{ip}}{\bar{P}_{Obs,m}^{ip}}, \quad \delta T_m^{it} = \bar{T}_{PRECISBL,m}^{it} - \bar{T}_{Obs,m}^{it}$$

Donde δP_m^{ip} y δT_m^{it} son los factores mensuales de ajuste de precipitación y temperatura, ip y it son los índices de las estaciones meteorológicas de precipitación y temperatura respectivamente que son usadas en el modelo y Obs y PRECISBL se refieren las condiciones climatológicas históricas observadas y simuladas en el escenario base de las proyecciones PRECIS.

3. Posteriormente es necesario relocalizar las proyecciones climatológicas futuras hacia la ubicación de las estaciones índice siguiendo la misma metodología descrita en el paso 1.
4. Finalmente, estas proyecciones son modificadas tomando en cuenta el factor de ajuste mensual obtenido para cada estación.

$$\begin{aligned} PS_{PRECIS(A2),m}^{ip} &= PS_{PRECIS_RAW(A2),m}^{ip} / \delta P_m^{ip} \\ TS_{PRECIS(A2),m}^{it} &= TS_{PRECIS_RAW(A2),m}^{it} + \delta T_m^{it} \end{aligned}$$

Donde $PS_{PRECIS_RAW(A2),m}^{ip}$ y $TS_{PRECIS_RAW(A2),m}^{it}$ corresponden a las proyecciones directas de PRECIS y escaladas usando el factor de ajuste respectivamente.

Algo similar debe hacerse para proyecciones de temperatura y para los otros escenarios climatológicos existentes.

Siguiendo este procedimiento se obtienen series de tiempo de condiciones futuras bajo diferentes escenarios de cambio global. Utilizando estas nuevas series de tiempo de variables climatológicas se pueden realizar nuevas simulaciones con el modelo WEAP que ya se encuentra calibrado hidrológicamente y operacionalmente en el escenario presente. (Guía de Modelación WEAP, 2009)

CAPÍTULO 3. Caracterización de la Zona de Estudio.

3.1.- Descripción General.

La cuenca del río Machángara posee una superficie de 325 km², se encuentra ubicada entre la provincia del Azuay y Cañar de las cuales pertenecen trece parroquias. A su vez la Cuenca del Machángara está conformada por tres Microcuencas: Río Chulco, Río Machángara Alto y Río Machángara Bajo. (Elecaastro.gov.ec, 2013).

Figura 2. Mapa de la Cuenca del Río Machángara.



WGS84 ZONA 17 SUR

Elaborado por: Parra M, 2016

Fuente: Instituto Geográfico Militar (IGM, 2013)

3.1.2.- Microcuenca del Río Machángara Alto.

Posee una superficie de 13238 ha y la cual representa el 41% de la cuenca del río Machángara. Hidrográficamente se encuentra ubicada en la parte alta de la cuenca. En esta se encuentra ubicado el embalse de Chanlud perteneciente a la empresa Elecaastro. (Elecaastro.gob.ec, 2013).

3.1.3.- Microcuenca del Río Chulco.

Hidrográficamente se encuentra ubicada en la parte media alta de la cuenca del río Machángara, tiene una superficie de 6623 ha y representa 20% de la cuenca del río Machángara. En esta se ubica el embalse de El Labrado perteneciente también a la empresa de Elecaastro. (Elecaastro.gob.ec, 2013).

3.1.4.- Microcuenca del Río Machángara Bajo.

Posee una superficie de 12683 ha, lo que representa el 39% de la cuenca del río Machángara. Esta microcuenca se encuentra ubicada en la parte media y baja de la zona de estudio. (Elecaastro.gob.ec, 2013).

3.2.- Características topográficas de la zona de estudio.

En este estudio el relieve va a ser determinante, debido que influye sobre distintas variables como son las precipitaciones, temperatura, escorrentía, etc. La altitud de la cuenca del río Machángara se clasifica principalmente en tres grupos, los cuales tienen diferentes características hidrometeorológicas y se presentan en la siguiente tabla:

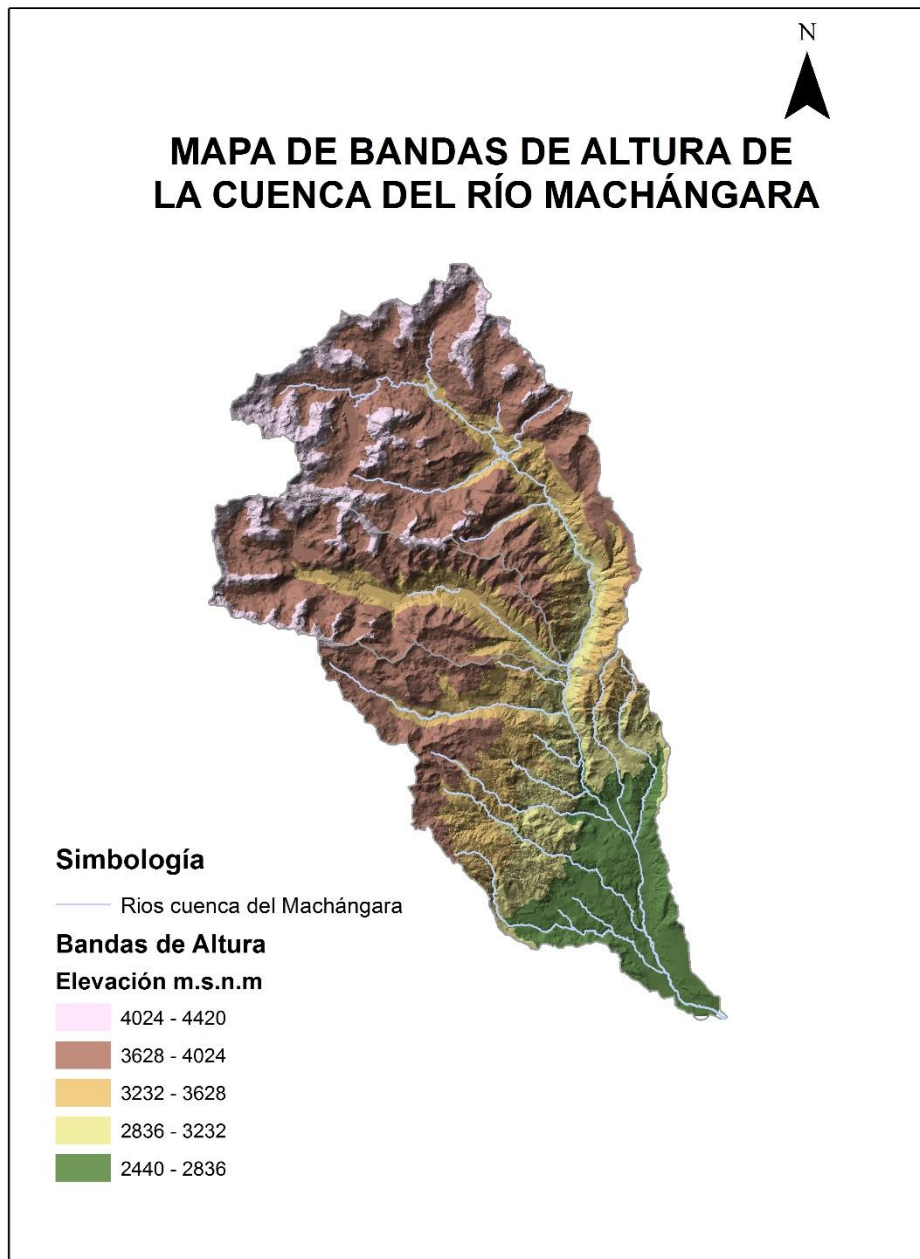
Tabla 2 Alturas Promedio de la Cuenca del Río Machángara

Cuenca	Altura Promedio
Cuenca alta.	3500 a 4500 m.s.n.m.
Cuenca media.	2600 a 3500 m.s.n.m.
Cuenca baja	2500 a 2600 m.s.n.m.

Elaborado por: Parra M, 2016.

En la siguiente figura se muestra un mapa que determina las diferentes bandas de altura de la Cuenca del Río Machángara.

Figura 3. Mapa de Bandas de Altura de la Cuenca del Río Machángara.



WGS84 ZONA 17 SUR
Elaborado por: Parra M, 2016
Fuente: Instituto Geográfico Militar (IGM, 2013)



Para cada banda de altura, se delimitaron características como altura y área mediante sistemas de información geográfica.

3.3.- Características Climatológicas.

El clima de la cuenca es lluvioso-húmedo y la parte alta es especialmente más húmeda debido a que es una zona cubierta de paramo en donde son muy frecuentes las lluvias. (INAMHI).

La cuenca de estudio presenta variaciones temporales de periodos de lluvias y periodos de sequías. Las épocas lluviosas se presentan en los meses de febrero a mayo con un pico de lluvias intensas en el mes de abril y en los meses de octubre a diciembre siendo octubre el mes que presenta lluvias intensas. También se presenta un periodo seco que se presenta entre los meses de junio y septiembre, determinando el mes de septiembre como el de periodo más seco. (INAMHI).

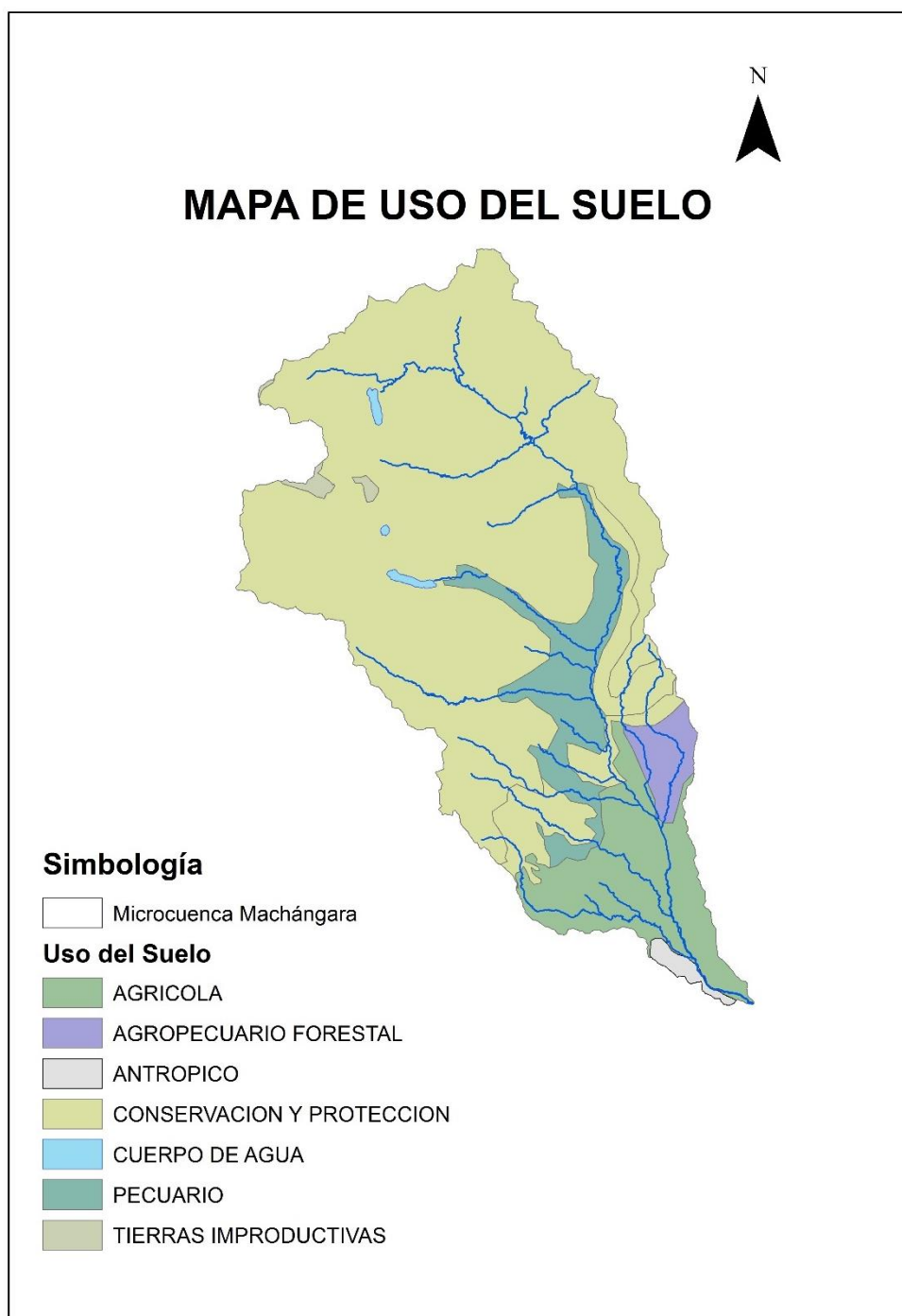
La temperatura oscila entre 4 y 18° C según los registros de las estaciones pertenecientes al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) utilizadas en este estudio. Definiendo como un promedio de temperatura de 12 °C.

3.4.- Uso del suelo.

La cuenca alta del Río Machángara está conformada principalmente por zonas de paramo y bosques, en donde están delimitadas zonas de conservación y protección. Las zonas agrícolas-ganaderas se ubican en la parte media y baja, mientras que las zonas urbanas se ubican en las zonas bajas. En su mayoría la Cuenca está compuesta por área de paramo por lo que su tipo de suelo es de tipo volcánico y se diferencian principalmente por el material parental: existen suelos formados en cenizas volcánicas recientes y suelos formados en roca metamórfica meteorizada.

En el siguiente mapa se muestra la división del uso del suelo en la Cuenca del Río Machángara.

Figura 4. Mapa de Uso del Suelo.



WGS84 ZONA 17 SUR
Elaborado por: Parra M, 2016
Fuente: (ODEPLAN, 2003).



CAPÍTULO 4: METODOLOGIA.

4.1 Creación de Modelos.

Se presenta a continuación las metodologías seguidas en la construcción del modelo de la cuenca del Rio Machángara. Además, de la metodología seguida para la calibración, validación y generación de escenarios.

4.1.1. Recopilación y Preparación de los datos.

Se realizó una recopilación de toda la información disponible en memorias anteriores y empresas como Etapa EP, INAMHI y Elecaastro que cuentan con datos de estaciones hidrometeorológicas. De los datos obtenidos se consideraron relevantes para el estudio las siguientes variables:

- Series de precipitación mensual 1988-2008
- Series de temperatura media mensual 1988 - 2008.
- Series de caudal medio mensual 1988 – 2008.
- Topografía de la cuenca donde se realizó el estudio.
- Concesiones de agua.

Se toma como referencia la serie de 20 años debido que es ese periodo se obtuvo datos completos para cada una de las estaciones de uso en este estudio, además de ser un tiempo considerable para representar adecuadamente el comportamiento de cada una de las variables como lo recomienda la guía metodológica de WEAP.

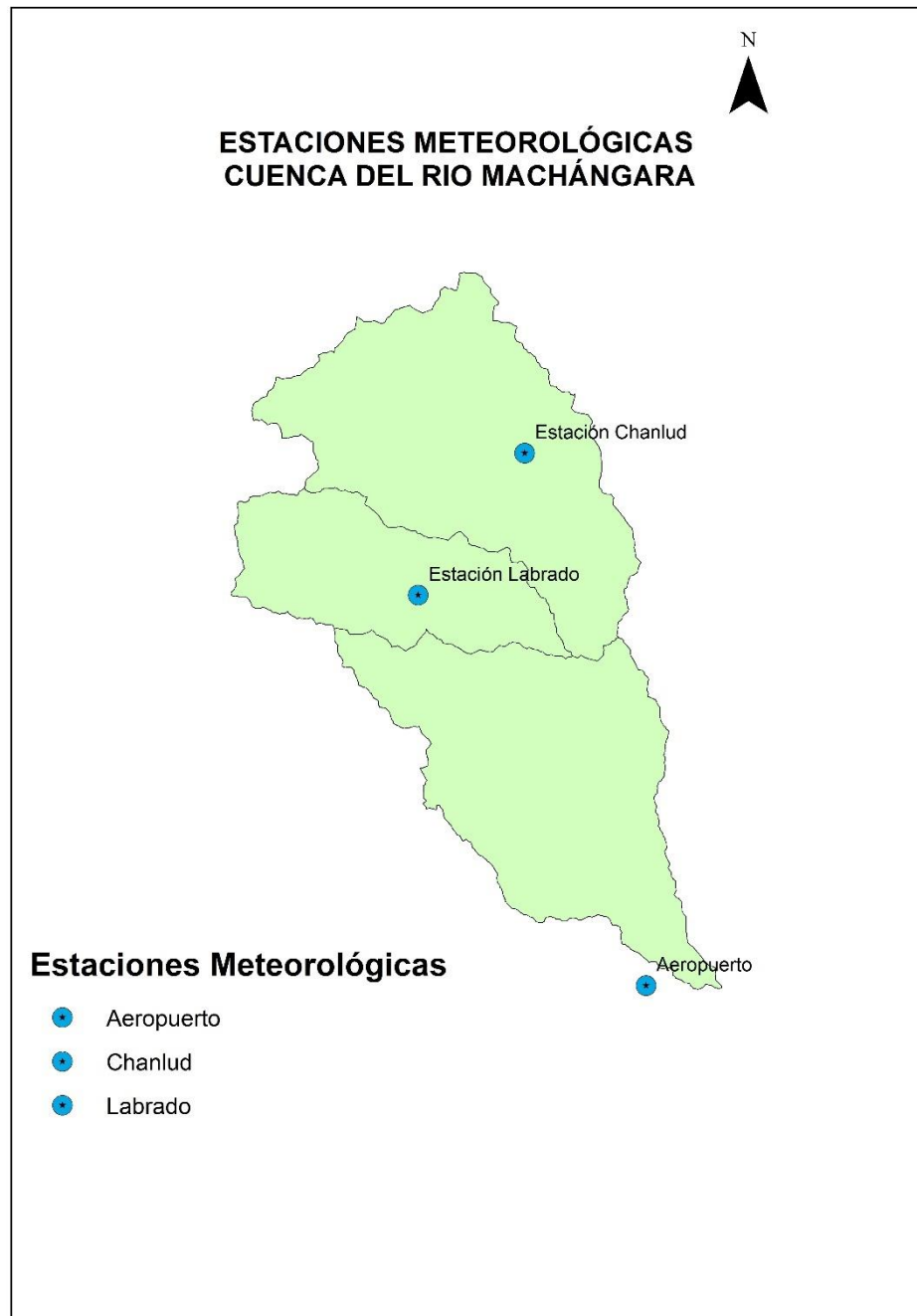
A continuación, se describirá la ubicación de las estaciones de medición utilizadas en el estudio, además se expone la metodología que se va a desarrollar para la generación de los datos de entrada necesarios para la utilización del modelo WEAP en la cuenca del Rio Machángara.

Cabe señalar que los datos obtenidos de caudales son datos estimados de un estudio hidrológico realizado por el Consejo de Gestión de la cuenca del río Machángara (CGCM) por lo tanto se sugiere para próximas investigaciones medir los caudales en la cuenca para obtener resultados más precisos.

4.1.2. Series Meteorológicas

En la Figura se presenta la ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas utilizadas para el estudio.

Figura 5. Mapa de Estaciones meteorológicas.



WGS84 ZONA 17 SUR

Elaborado por: Parra M, 2016

Fuente: Instituto Geográfico Militar (IGM, 2013).

4.1.3. Información disponible en las estaciones.

La serie de datos utilizada para el modelo es correspondiente al periodo 1988 – 2008. La información de precipitación y temperatura provienen de los registros históricos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 1988-2008) de las estaciones meteorológicas localizadas en Chanlud, Labrado y Aeropuerto que se encuentran instaladas dentro del área de estudio. Los datos de precipitación y temperatura corresponden a 3 estaciones meteorológicas, las cuales se describen en la siguiente tabla.

Para estimar los datos de precipitación y temperatura se manejó la información de 3 estaciones meteorológicas, que se enuncian a continuación en la tabla.

Tabla 3 Información Estaciones Meteorológicas.

Estación	Altura [msnm]	Longitud	Latitud	Información
Labrado	3335	-79.073054	-2.7327764	1988-2008
Chanlud	3485	-79.031378	-2.6768303	1988-2008
Aeropuerto	2545	-78.98333	-2.8866680	1988-2008

Fuente: INAMHI (2014)

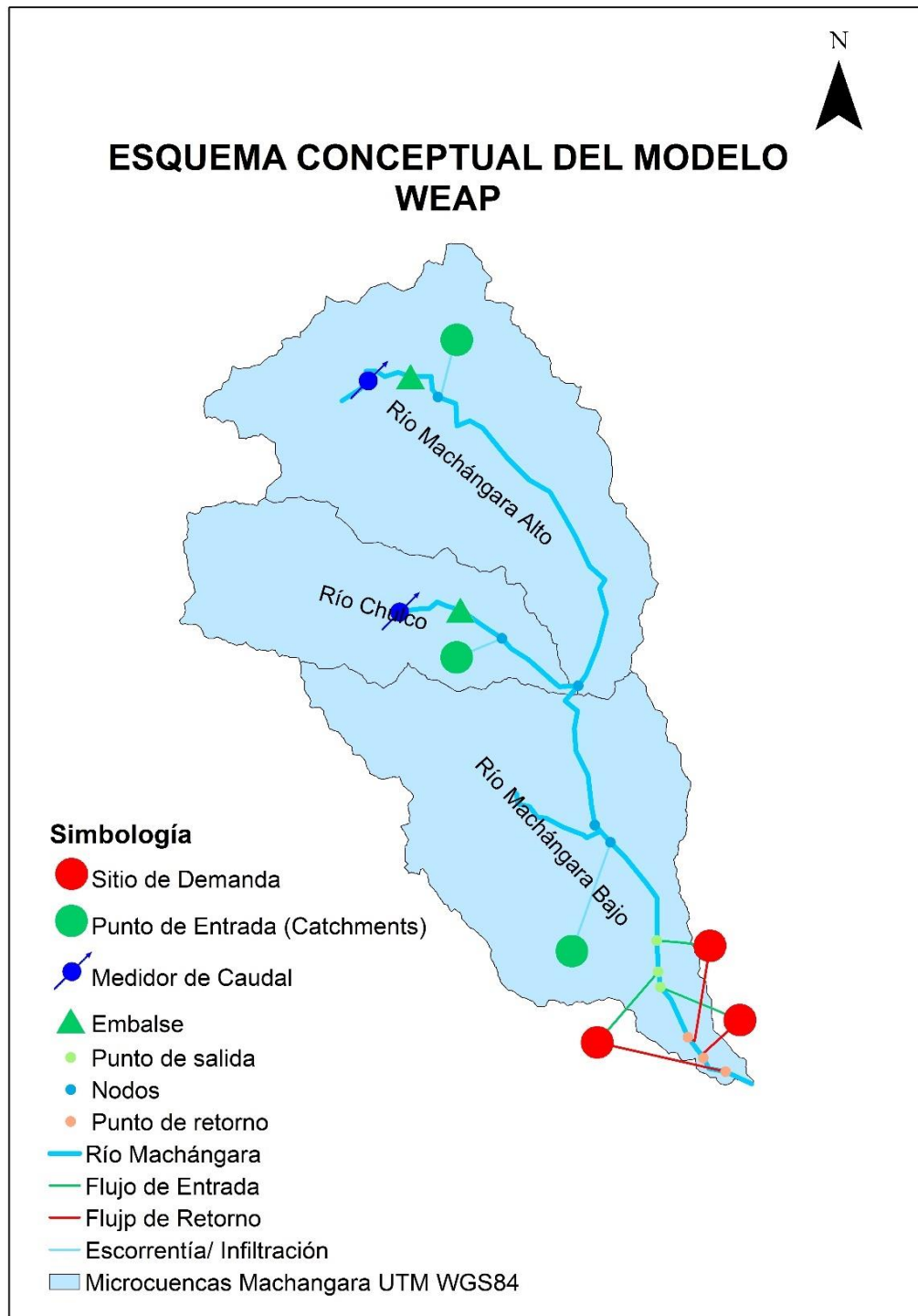
WEAP al ser un modelo semidistribuido, necesita que los datos sean ingresados a partir de una subdivisión de la cuenca, proceso que se describe en la siguiente sección.

4.1.4. Creación de la topología en WEAP.

WEAP va a definir nodos de influencia denominados “catchments”. Estos representan un área geográfica en la cual las propiedades del suelo son específicas para la zona o microcuenca en este caso. También los datos meteorológicos se asumen uniformes sobre el área que delimita el catchment.

En la siguiente figura se esquematiza el funcionamiento del modelo WEAP.

Figura 6. Esquema Conceptual del modelo WEAP.



WGS84 ZONA 17 SUR.

Elaborado por: Parra M, 2016.

Fuente: Instituto Geográfico Militar (IGM, 2013)

4.1.5. Control Fluviométrico.

Los puntos de control para la calibración del modelo hidrológico fueron los sitios de entradas a los embalses de Chanlud y El Labrado, manejando las series de tiempo de caudales desde 1988 a 2008.

Tabla 4. Estadística de Caudales del Machángara en Chanlud, período 1988-2008

Q [m3/s]	Promedio	Mínimo	Máximo	Desv. Est
Enero	1.96	0.46	4.67	1.12
Febrero	3.26	0.71	6.62	1.87
Marzo	3.95	1.29	7.47	1.93
Abril	4.78	1.38	7.87	1.60
Mayo	3.60	1.61	7.09	1.56
Junio	3.03	1.59	6.03	1.07
Julio	2.35	1.23	4.02	0.71
Agosto	1.54	0.73	3.6	0.69
Septiembre	1.58	0.39	6.06	1.25
Octubre	1.93	0.31	4.38	1.15
Noviembre	2.53	0.27	5.3	1.43
Diciembre	2.30	0.19	5.73	1.42

Elaborado por: Parra M, 2016.

Tabla 5. Estadística de Caudales de Chulco en “El Labrado”, período 1988-2008

Q [m3/s]	Promedio	Mínimo	Máximo	Desv. Est
Enero	0.95	0.2	2.26	0.56
Febrero	1.58	0.32	3.26	0.92
Marzo	1.93	0.64	3.66	0.94
Abril	2.31	0.65	3.82	0.78
Mayo	1.71	0.74	3.44	0.77
Junio	1.43	0.75	2.94	0.52
Julio	1.11	0.57	1.92	0.35
Agosto	0.72	0.33	1.71	0.33
Septiembre	0.75	0.17	3.00	0.62
Octubre	0.94	0.13	2.19	0.58
Noviembre	1.24	0.11	2.64	0.72
Diciembre	1.11	0.08	2.86	0.71

Elaborado por: Parra M, 2016.

4.1.6. Series de Precipitación.

La representatividad de la precipitación se la realizó a través de la construcción de isoyetas, en una cuenca dicho criterio se cumple si el régimen de precipitaciones y su variación espacial dependen de los efectos topográficos.

En este caso, la variabilidad espacial de un evento de lluvia generalmente corresponderá a la variabilidad de su precipitación anual normal, por lo tanto, al calcular el cociente entre la precipitación observada en cada estación y la de la precipitación anual normal representativa, los coeficientes tienden a ser constantes (Espíldora et al., 1975), es decir, isoyetas constantes, por lo tanto las isoyetas de la precipitación anual normal serán una versión amplificada de la lluvia en estudio.

Considerando este criterio y a partir de la información de precipitación disponible y la aplicación de un SIG se obtuvo los valores de la precipitación anual normal para la cuenca de estudio y para cada catchment, aplicando para ello el método de interpolación geoestadístico Krigin ordinario.

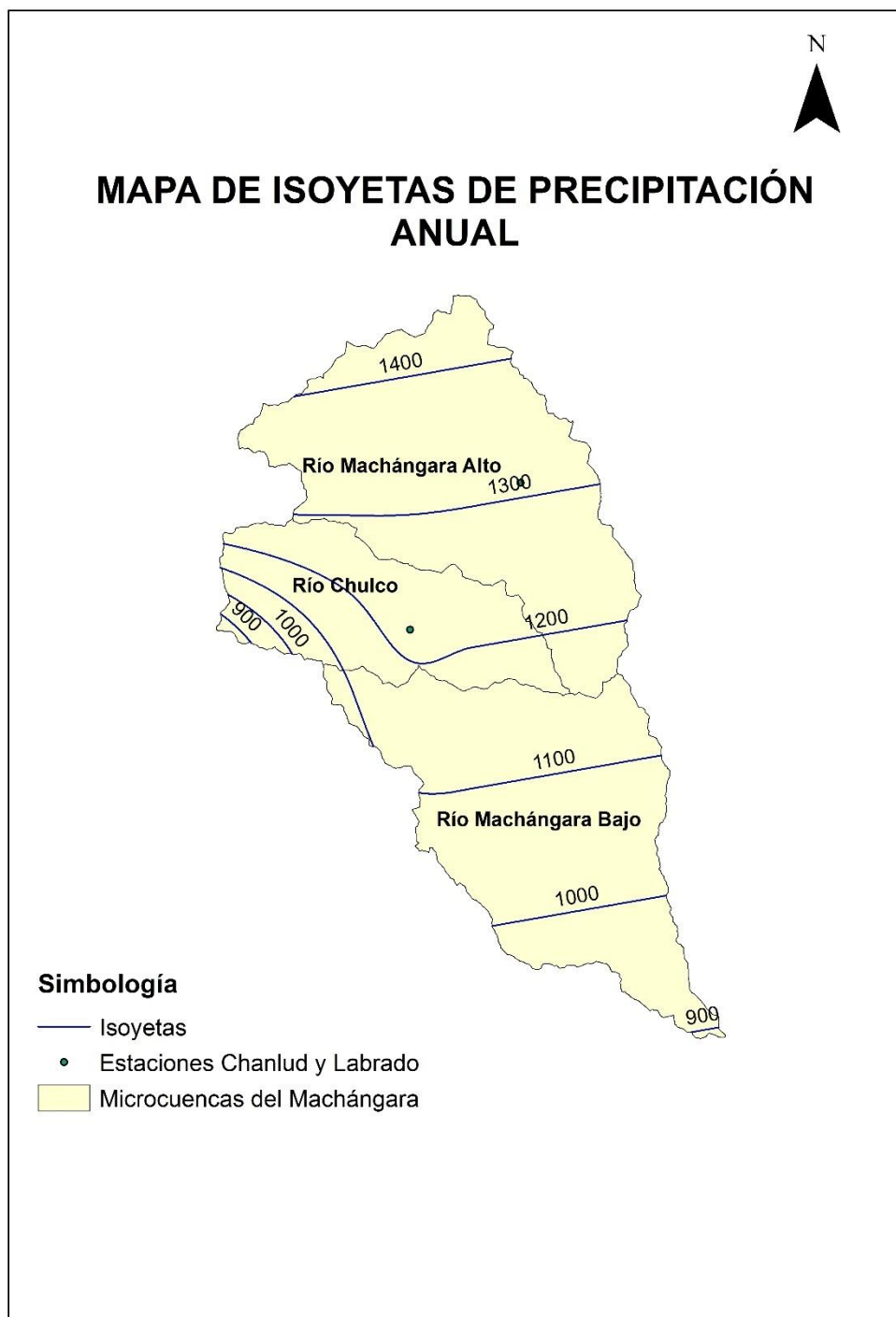
Utilizando las estaciones de Chanlud, Labrado y Aeropuerto se obtiene valores similares entre los cocientes de la precipitación de cada estación en este caso y su correspondiente isoyeta.

Tabla 6. Régimen de la Precipitación Mensual

Estación	Altura	Mes												Suma
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Labrado	3335	100.3	127.8	146.7	161.2	127.5	102.7	91.7	71.1	79.1	102.0	110.1	102.3	1220.2
Chanlud	3485	88.0	104.8	143.6	146.8	135.9	128.4	96.6	79.6	79.6	104.9	113.5	89.2	1310.7
Aeropuerto	2545	59.3	95.4	121.2	122.9	83.4	51.4	26.1	18.3	55.2	90.8	90.9	88.8	903.6

Fuente: (INAMHI 1988-2008).

Figura 7. Mapa de Isoyetas de precipitación anual.



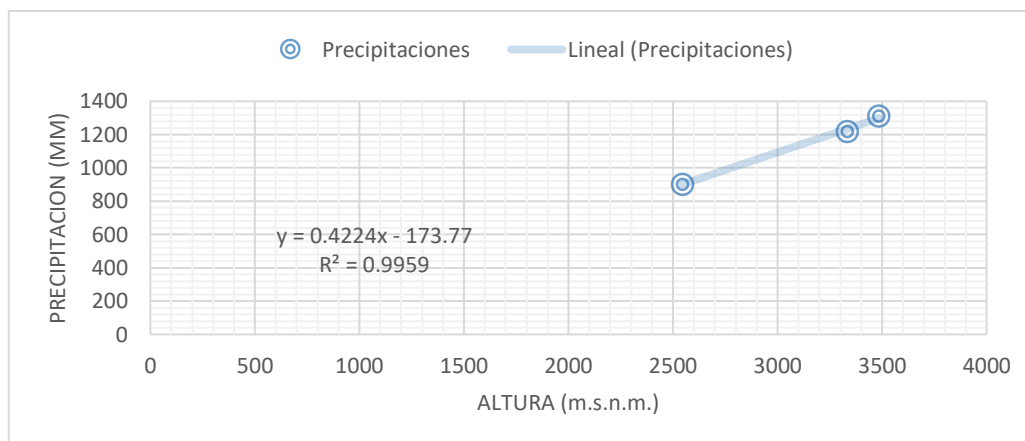
WGS84 ZONA 17 SUR.

Elaborado por: Parra M, 2016.

Fuente: Instituto Geográfico Militar (IGM, 2013)

En la figura N° 8 se determina la relación encontrada para las precipitaciones, y como varia con respecto a la altura. Obteniendo un R2 cercano a 1 lo que quiere decir que los datos están muy relacionados entre sí, como se logra apreciar en la dispersión de los mismos.

Figura 8. Precipitación media anual Vs Altura



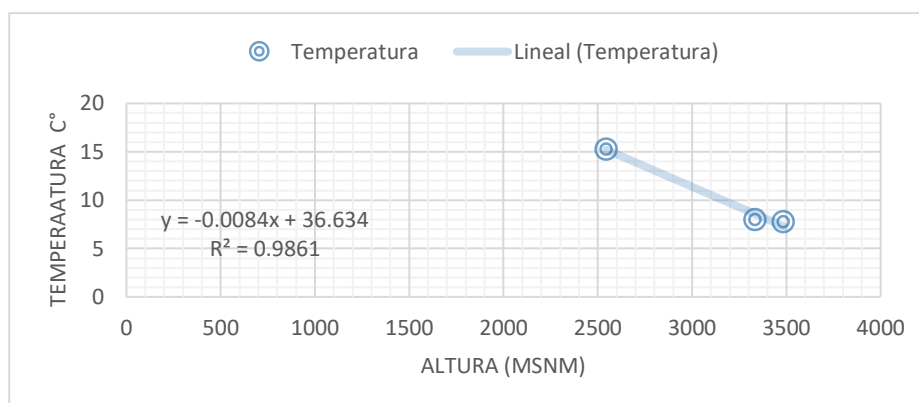
Elaborado por: Parra M, 2016.

4.1.1. Series de Temperatura.

Se generó gradientes de temperatura con respecto a la altura para todos los meses del año usando los promedios de temperaturas medias mensuales de las series de datos de las estaciones Labrado, Chanlud y Aeropuerto y se definieron franjas de igual cota promedio con ArcGIS. En esta zona se determina que la temperatura baja entre 0,5°C y 0,7°C por cada 100 m de altitud (a partir de los 2000 m).

En la siguiente figura se toma como ejemplo los meses de junio a septiembre para representar como varia los gradientes de temperatura de cada estación tomada para el estudio.

Figura 9. Gradiente de Temperatura en el Periodo Jun – Sept.



Elaborado por: Parra M, 2016.

4.1.8. Demanda de Agua.

Además de la caracterización física espacial y temporal de la zona de estudio, se requiere la ubicación de los sitios de demanda, los cuales incluyen sistemas de riego, urbes a considerar, población rural y caudales mínimos, entre otros. Dependiendo del objetivo del modelo, esta caracterización puede ser detallada o gruesa. Por ejemplo, las demandas de riego pueden agruparse como un “sitio de demanda” o pueden caracterizarse dentro del modelo hidrológico. Por otro lado, los consumos urbanos pueden asumirse como un consumo per cápita o pueden clasificarse de forma detallada en categorías de uso interno domiciliario (baños, lavandería, etc.) y uso externo (jardines, zonas comunes, etc.). (Guía de Modelación WEAP, 2009).

Para el estudio se utilizó la información disponible por La Secretaria Nacional del Agua (SENAGUA) en las cuales se determinó los siguientes usos del recurso en la cuenca del río Machángara:

- **Riego:** Alrededor de 1300 ha son regadas por medio de dos canales principales como son la dolorosa y Machángara que abastecen 1900 usuarios.



- **Industria:** En la cuenca baja del Machángara se encuentran localizadas empresas del parque industrial, las cuales captan el recurso hídrico para utilizarlo en sus procesos de producción.
- **Hidroeléctrica:** En cuenca alta se encuentran las represas de El Labrado y Chanlud a cargo de ELECAUSTRO SA, las cuales proporcionan de energía eléctrica para las provincias de Azuay, Cañar y Morona Santiago.
- **Consumo humano:** En la cuenca baja se encuentra la planta de potabilización de agua, que abastece a la ciudad de Cuenca.

Existen muchos factores que condicionan la demanda del agua, por ejemplo, el clima, tamaño de la ciudad, estándar de vida, grado de industrialización, costo del servicio, riego de jardines, aire acondicionado, presión de entrega y la calidad del agua para el consumo. La presencia de industrias suele aumentar el uso total del agua por persona, pero disminuye la fluctuación en la demanda. Las ciudades pequeñas tienen con frecuencia una baja demanda de agua, en especial si hay zonas de la ciudad que no cuentan con drenaje. Las fluctuaciones en la demanda son mayores en las ciudades pequeñas, principalmente por la falta de industrias grandes. Debido a estándares de vida altos, aumenta la demanda de agua y las fluctuaciones en el volumen usado.

Los climas cálidos y secos tienen mayor demanda de agua, por el riego de jardines y el aire acondicionado. En tiempo frío, a veces aumenta el consumo de agua porque se deja correr para evitar la congelación en las tuberías.

Las altas presiones del agua aumentan la demanda debido a que hay mayor cantidad de fugas en las tuberías principales, válvulas y llaves en general. Normalmente si aumenta el costo del agua también se reduce su demanda.

En este caso se requirió en el modelo la ubicación de sitios de demanda para determinar el cruce entre la oferta y demanda de tal forma que se pueda definir como cambiaría este en el futuro tomando en consideración un

incremento de la población basándonos en el índice de crecimiento poblacional de 1.9% obtenido en el último censo realizado en el país.

4.2. Calibración.

Para realizar la calibración del modelo WEAP se toma en consideración los siguientes criterios

- Calibración empleando cerca del 65% de la serie de datos lo que permite utilizar el resto de la serie en la validación del modelo, siempre que se utilicen más de 10 años.
- Cálculo de indicadores de error: coeficiente de Nash-Sutcliffe, sesgo porcentual (PBIAS) y Raíz del error cuadrático medio (RMSE).
 - El coeficiente de Nash and Sutcliffe (NS). Este coeficiente se define como:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^m (Q_{obs} - Q_{pobs})^2}$$

(Nash and Sutcliffe, 1970).

Donde:

-Qobs: Caudal Observado.

-Qsim: Caudal Simulado

-Qpobs: Promedio de Caudales observados.

Tabla 7. Valores referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe.

NS	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 -0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

Fuente: Molnar, 2011.

- El Sesgo porcentual debe ser $PBIAS \pm 25\%$ (Tendencia promedio de los datos simulados de ser mayores o menores que los datos observados).

$$Bias = 100 * [(\bar{Q}_s - \bar{Q}_o) / \bar{Q}_o]$$

Donde Q_s y Q_o , corresponden a caudales simulados y observados para cada paso de tiempo.

- Raíz del error cuadrático medio (RMSE): La raíz del error cuadrático medio permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los observados. Se formula como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sm} - Q_i)^2}{n}}$$

El rango de valores que puede tomar va desde 0 hasta el infinito (positivo). El 0 corresponde a un ajuste perfecto mientras que valores más grandes indican un menor ajuste. (Cabrera, 2008).

4.2.1.- Parámetros de Calibración.

Para la calibración se utilizó la información disponible de las estaciones Labrado y Chanlud en el periodo de 1988-2000 respectivamente. Y para la validación del mismo se tomó en consideración el periodo del 2000 al 2008.

En esta etapa se ingresaron los datos meteorológicos en los puntos de entrada del modelo y se calcularon los caudales mensuales utilizando los parámetros que venían por defecto, luego se procedió a ajustar los caudales mensuales en forma manual cambiando los parámetros iniciales del modelo.

Los parámetros que van a determinar la calibración del modelo son:

- ✓ **Coeficiente de Cultivo (Kc):** Relación entre evapotranspiración real para un cultivo y la evapotranspiración de referencia para las mismas condiciones climáticas.
- ✓ **Soil Water Capacity (SWC):** Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo en el estanque superior.
- ✓ **Deep Water Capacity (DWC):** Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo en el estanque inferior.
- ✓ **Root Zone Conductivity (RZC):** Conductividad en la zona de raíces (estanque superior), capacidad de absorción mensual.
- ✓ **Deep Conductivity (DC):** Conductividad en la zona profunda (estanque inferior).
- ✓ **Preferred Flow Direction (PFD):** Dirección preferencial del flujo, 0 implica flujo 100% horizontal, 1 implica flujo 100% vertical.
- ✓ **Factor Precipitación (FPp):** Corrección respecto a precipitación extrapolada.

De esta forma se hace la comparación entre el caudal observado y el caudal simulado.

4.3.- Creación de Escenarios.

Para realizar la evaluación de los impactos del cambio climático para el período futuro se manejaron los resultados obtenidos por el proyecto PACC (Proyecto de Adaptación al Cambio Climático a través de una efectiva gobernabilidad del agua en el Ecuador) usando el modelo regional de clima PRECIS que son los datos oficiales de escenarios de cambio climático disponibles para nuestra zona.

En los estudios realizados con el modelo PRECIS se describen los escenarios de emisiones SRES-A2 (pesimista) y SRES-B2 (optimista). Ambos escenarios tomaron como serie de proyecciones el periodo comprendido entre 1991-2100. Se utilizó el modelo climático global ECHAM4 para bajar la escala con PRECIS, el cual arroja resultados en una grilla con un espaciamiento de 25 km lo que permite generar series de tiempo de variables atmosféricas a nivel diario o mensual en una ubicación del territorio nacional según las coordenadas de las grillas. En este caso no se realiza

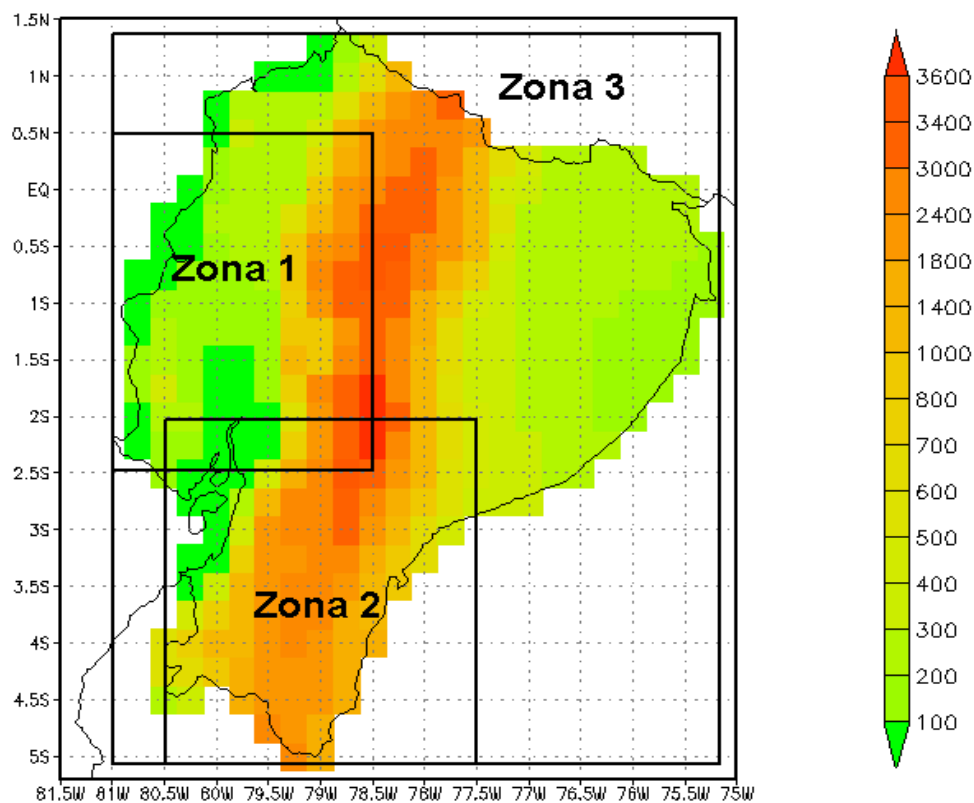
interpolación tomando en cuenta en investigaciones anteriores que puede solo variar por pocos decimales, por lo que se tomó en consideración el punto de la grilla más cercano a las estaciones utilizadas para este proyecto.

Las variables que se utilizan en el presente estudio corresponden a precipitaciones y temperaturas mensuales de los escenarios A2 y B2 perteneciente a los años 2021-2050.

Una primera etapa consiste en relocalizar las proyecciones climatológicas provenientes del modelo PRECIS-ECHAM a la ubicación de las estaciones meteorológicas (estaciones índices) con la finalidad de obtener las series de tiempo de temperatura y de precipitación.

PRECIS define tres zonas en el país para presentar sus resultados, en este caso se utiliza la grilla de la zona número 2 que representa la parte sur del país.

Figura 10. Mapa de distribución de zonas de estudio PRECIS.

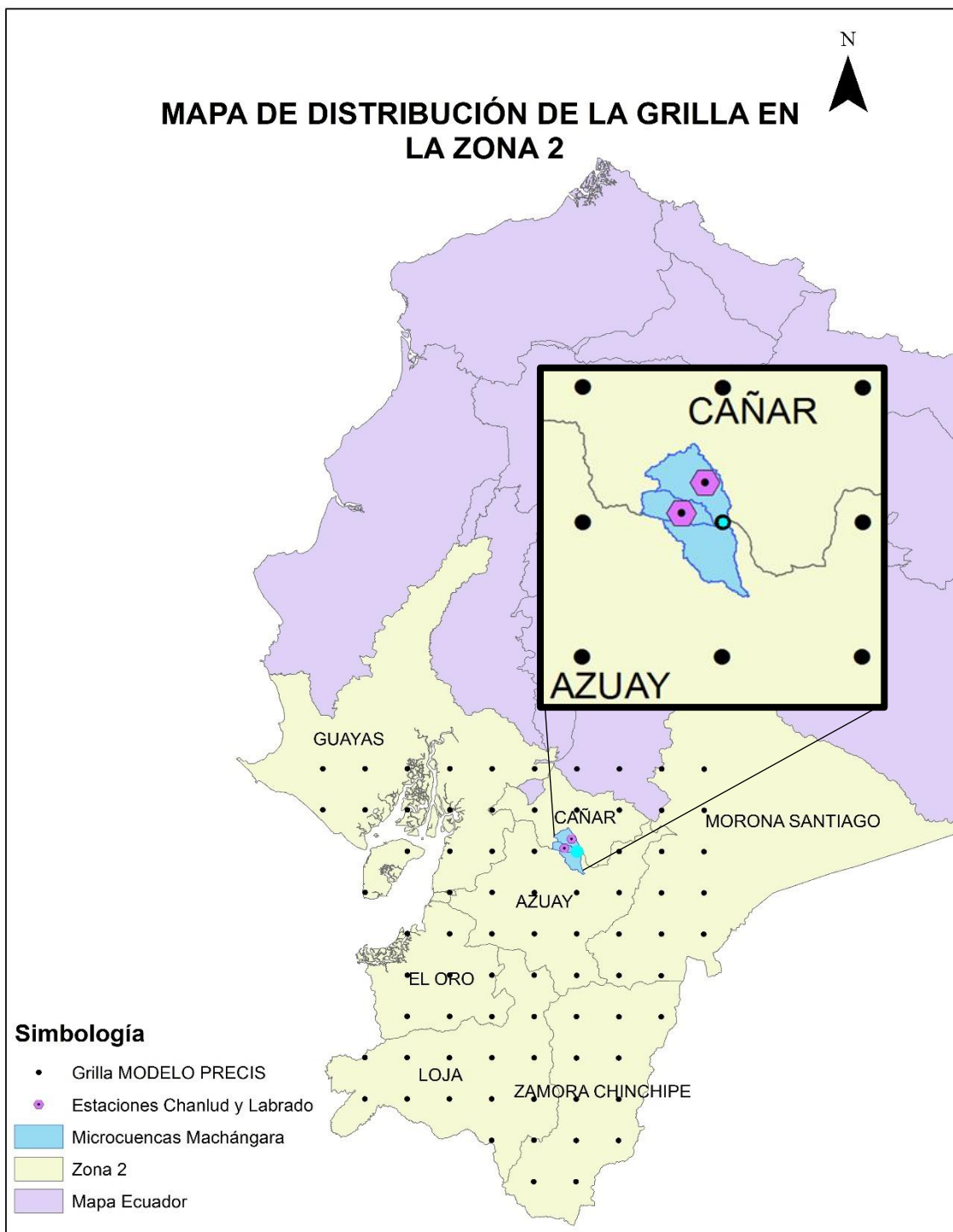


Fuente: (MAE, 2011).



En la siguiente figura se muestra como está distribuida la grilla en la zona 2 utilizada por PRECIS y la ubicación de la estación utilizada basándose en el punto más cercano en este caso señalado por color celeste, a las estaciones índice representadas por color purpura para definir las precipitaciones y temperaturas.

Figura 11. Mapa de distribución de la grilla en la Zona 2.

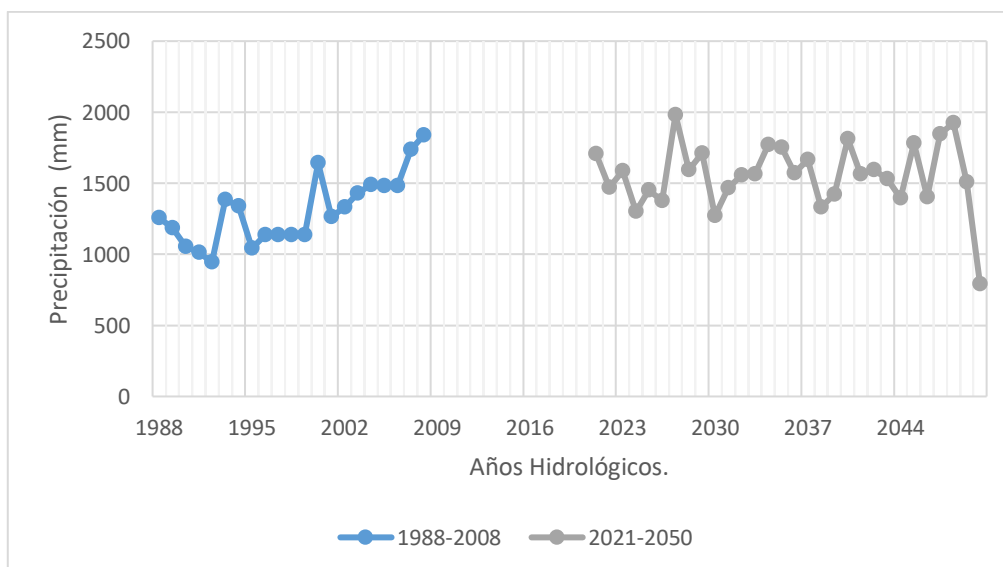


WGS84 ZONA 17 SUR.
Elaborado por: Parra M, 2016.
Fuente: (MAE, 2011).

Una vez relocalizadas estas proyecciones se realiza una comparación mensual de los valores de acuerdo a la simulación y observación histórica. De esta comparación se derivan factores de ajuste mensuales para temperatura y precipitación. En el caso de la temperatura, este factor de ajuste consiste en la diferencia entre los promedios mensuales de temperatura simulado y observado para el periodo histórico. En el caso de la precipitación, este factor de ajuste considera la división entre los promedios mensuales de precipitación simulado y observado. Posteriormente es necesario ajustar las proyecciones climatológicas futuras a partir de los factores de ajuste mensual obtenido para cada estación. Siguiendo este procedimiento se obtienen series de tiempo de condiciones futuras bajo diferentes escenarios de cambio global.

Como se aprecia en la Figura 12 y 13 no existe una tendencia clara de las precipitaciones en la cuenca. En el período 1988-2008 el promedio de precipitación anual es de 108,87 mm, mientras que para el período 2021-2050 es de 130,41 mm para el caso del escenario A2. Sin embargo, para el escenario B2 el promedio anual es de 138,39 mm

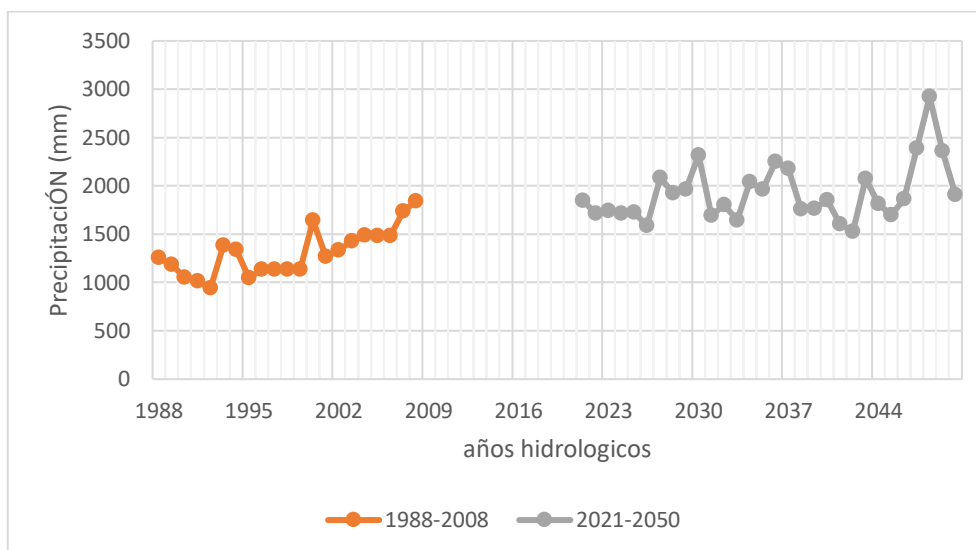
Figura 12. Tendencia Precipitación Anual Estación Chanlud Escenario A2.



Elaborado por: Parra M, 2016.

Como se puede observar en el grafico 13 la proyección para los años 2021-2050 demuestran un aumento en las precipitaciones.

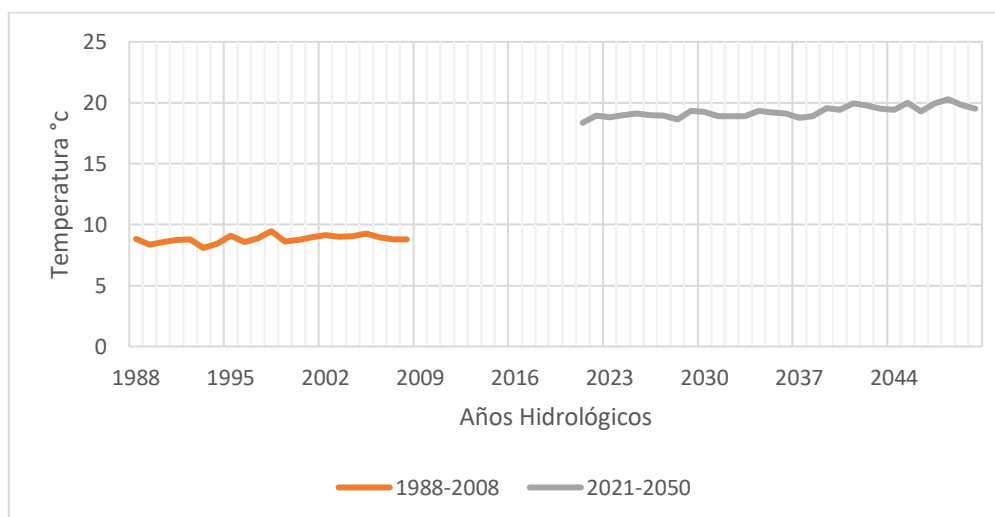
Figura 13. Tendencia Precipitación Anual Estación Chanlud Escenario B2



Elaborado por: Parra M, 2016.

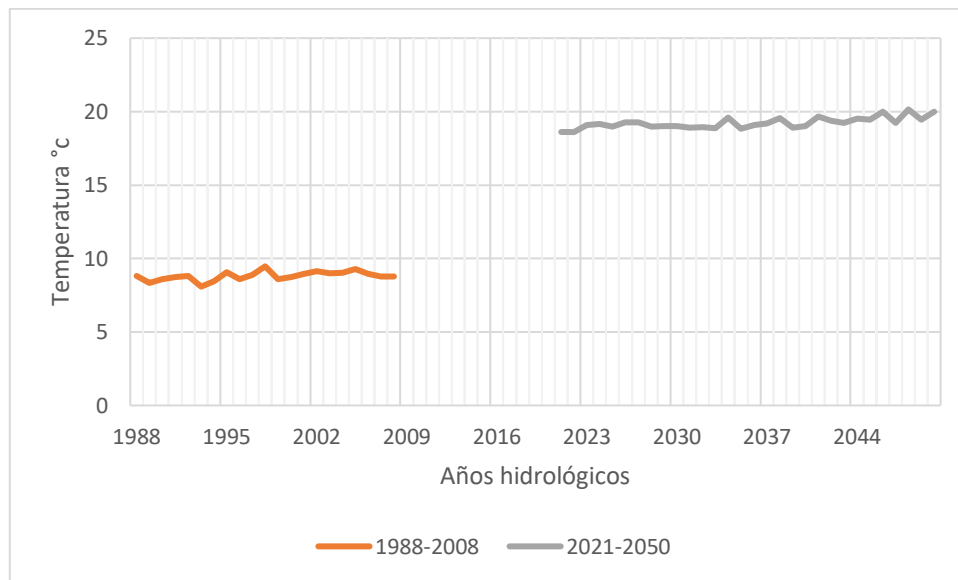
En la Figura 14 y 15 se observa que existe un claro aumento en las temperaturas medias anuales. El promedio de los datos observados en el período 1988- 2008 es de 8,34 °C, aumentando a 14,86 °C en el período 2020-2050 para el escenario B2 y en el caso del escenario A2 el promedio es de 15,3° C

Figura 14. Tendencia Temperatura Estación Chanlud Escenario A2.



Elaborado por: Parra M, 2016.

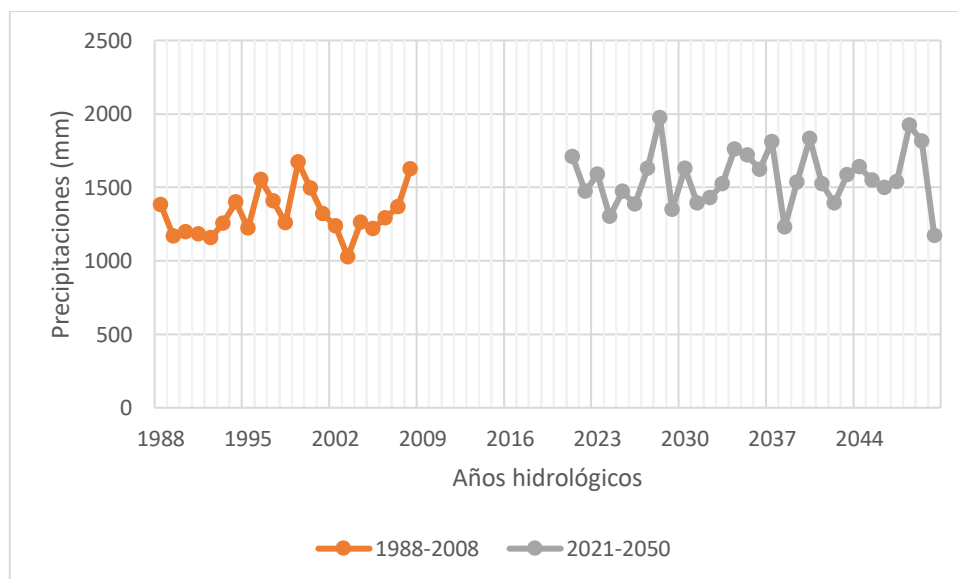
Figura 15. Tendencia Temperatura Estación Chanlud Escenario B2



Elaborado por: Parra M, 2016.

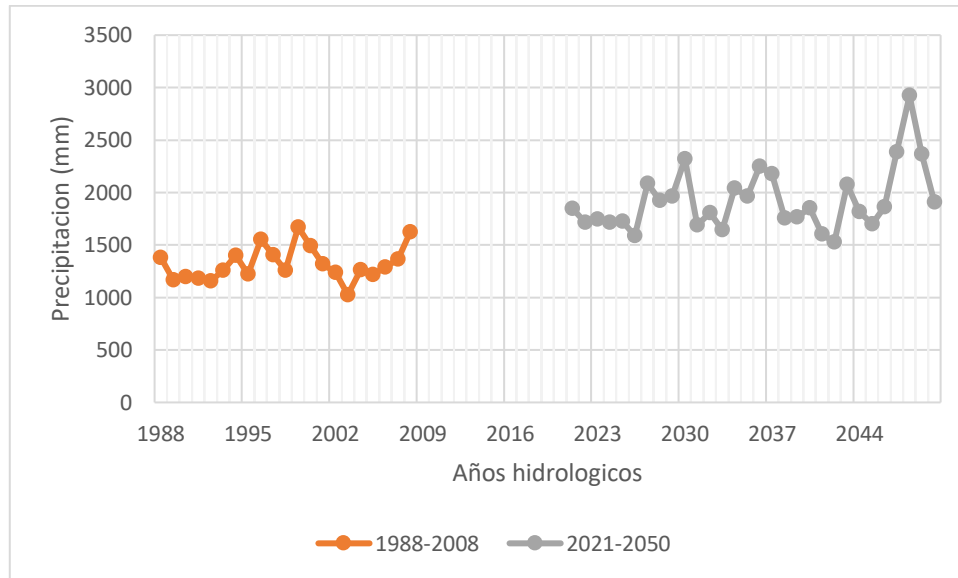
Como se aprecia en la Figura 16 y 17 de las precipitaciones en la microcuenca del río Chulco no se identifica de igual manera una tendencia clara sin embargo se logra apreciar como existe mayor espaciamiento de tiempo en las precipitaciones dando un valor promedio anual de 108,44 mm que se tiene para los datos observados en el período 1988-2008, a un valor de 130,49 mm en el período 2021-2050 en el escenario A2 y para escenario B2 139.05mm.

Figura 16 Tendencia Precipitación Estación Labrado Escenario A2



Elaborado por: Parra M, 2016.

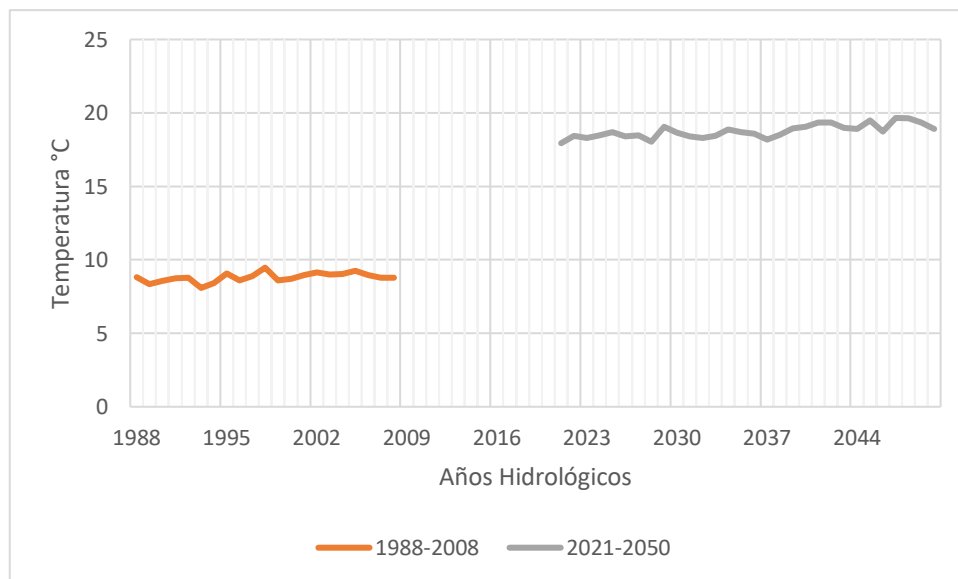
Figura 17. Tendencia Precipitación Estación Labrado Escenario B2.



Elaborado por: Parra M, 2016.

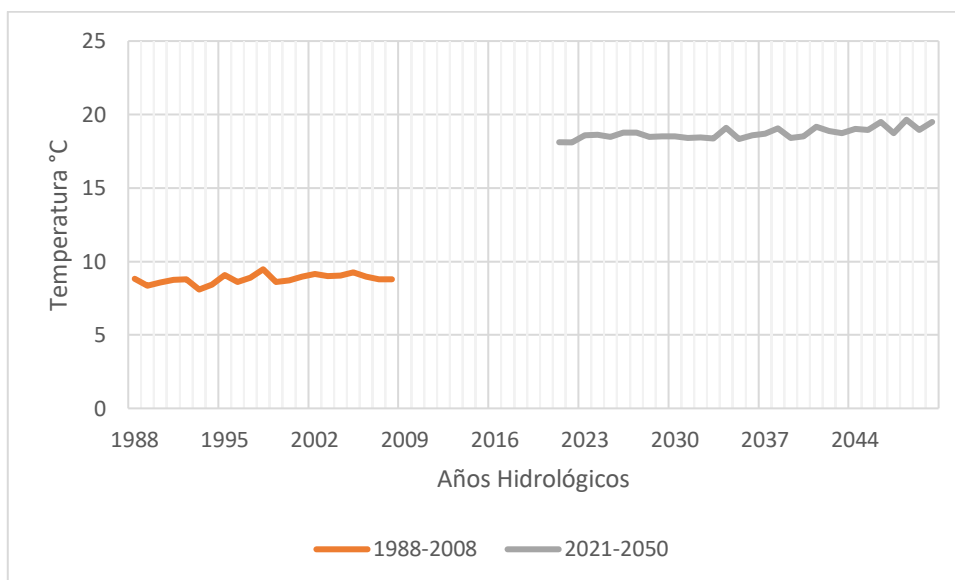
En la Figura 18 y 19 se observa un aumento importante en las temperaturas medias anuales en la microcuenca del río Chulco. Para los datos observados el promedio de la temperatura media anual es de 8,97 °C. Para el período 2021-2050 la temperatura media sobre la cuenca se elevará a un valor de 14,30 °C aproximadamente para ambos escenarios.

Figura 18. Tendencia Temperatura Estación Labrado Escenario A2



Elaborado por: Parra M, 2016.

Figura 19. Tendencia Temperatura Estación Labrado Escenario B2.



Elaborado por: Parra M, 2016.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS.

5.1.- Resultados de la Calibración.

En el siguiente cuadro se expone en forma de resumen los valores definitivos de los parámetros calibrados por cuenca en el periodo de 1988-2000, en este caso se estimó información de estudios previos realizados en zonas de paramo debido que no existían datos específicos para la zona de estudio. Además, se muestran hidrogramas y curvas de duración observados (color azul) y simulados (color rojo) para las dos microcuencas, respectivamente.

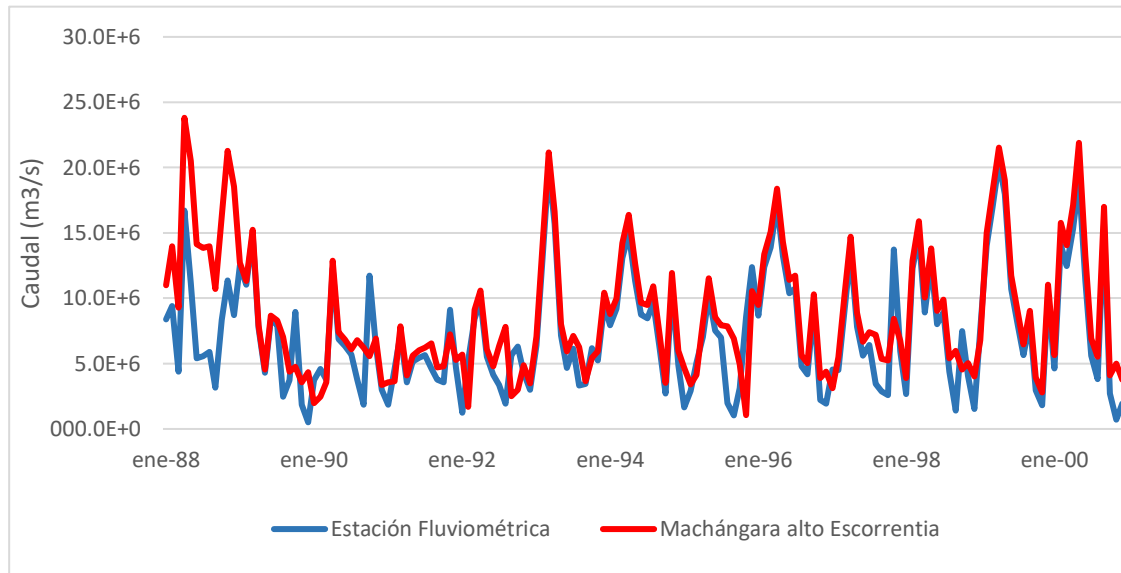
Tabla 8. Parámetros de Calibración del modelo

Parámetro del Modelo	Unidad	Rango de Valores
Coeficiente de cultivo (Kc)	Adimensional	0.4-1.05
Índice de resistencia a la escorrentía (RRF)	Adimensional	1-8
Dirección preferida del flujo (fd)	Adimensional	0.2-0.8
Capacidad del suelo (Sw)	mm	1600-3500
Conductividad de Zona de Raíces (Rzc)	mm/meses	10-100
Capacidad en zona de raíces (Dwc)	mm	100-12500
Conductividad del suelo (Dc)	mm/meses	5-500

Elaborado por: Parra M, 2016.

La Figura N° 20 la curva de la serie de caudal medio mensual simulado se ajusta a la curva de los caudales observados en gran parte de la serie de datos utilizada sin embargo se presenta problemas de ajuste para simular meses en que el caudal mensual es alto, además que el ajuste inicia desde el año 1989 hasta 2000 por lo que el año 1988 se puede observar de forma no ajustada.

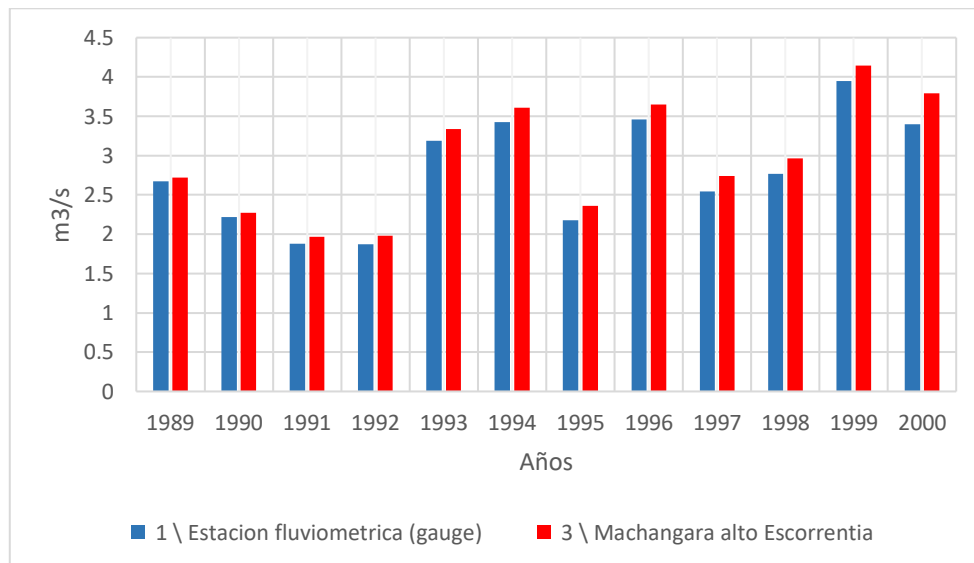
Figura 20. Caudales medios mensuales simulados y observados Microcuenca Machángara Alto.



Elaborado por: Parra M, 2016.

En la Figura 21 los caudales medios anuales generados se ajustan a los observados en el periodo 1989-2000, a excepción del año hidrológico 1988 y el 2000, en donde la simulación sobrepasa alrededor del 50% al caudal medio anual medido en el año 1988 y un 10% en el 2000.

Figura 21. Ajustes de caudales medios Anuales de la Microcuenca Machángara Alto.



Elaborado por: Parra M, 2016.

Una vez realizada la calibración se puede calcular el error que arroja la serie simulada con respecto a la observada, en este caso se utilizara el coeficiente

de Nash-Sutcliffe, sesgo porcentual (PBIAS) y Raíz del error cuadrático medio.

Tabla 9. Indicadores de Error.

Indicadores de Error	Valor obtenido
NS	0.75
PBIAS	-12.54
RMSE	2.7

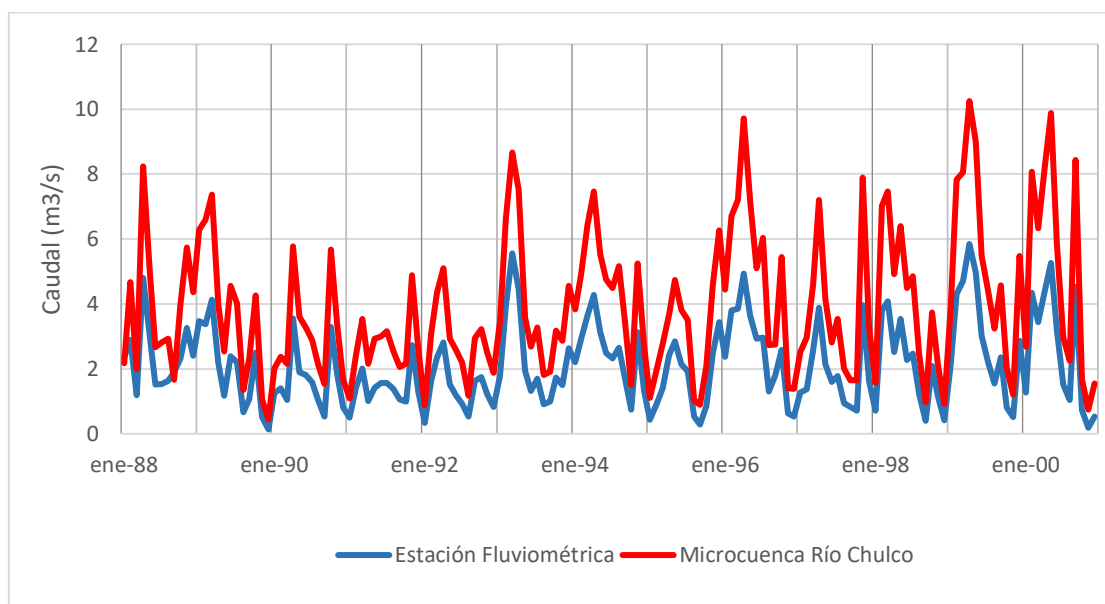
Elaborado por: Parra M, 2016

Las Figuras 22 y 23 representadas a continuación muestran los resultados de la calibración para la Microcuenca del Rio Chulco.

La Figura 22 la curva de la serie de caudal medio mensual simulado no se ajusta a la curva de los caudales observados de una forma adecuada como en la Microcuenca del Machángara alto. Esto se debe a que el caudal producido por el Rio Chulco es menor, que lo que se produce por las diferentes variables tomadas en cuenta en la unidad hidrológica en este caso toda la microcuenca del Rio chulco.

Se puede observar problemas de ajuste para simular meses en que el caudal mensual es alto como son los meses de marzo y abril en los que se presentan lluvias en mayo cantidad.

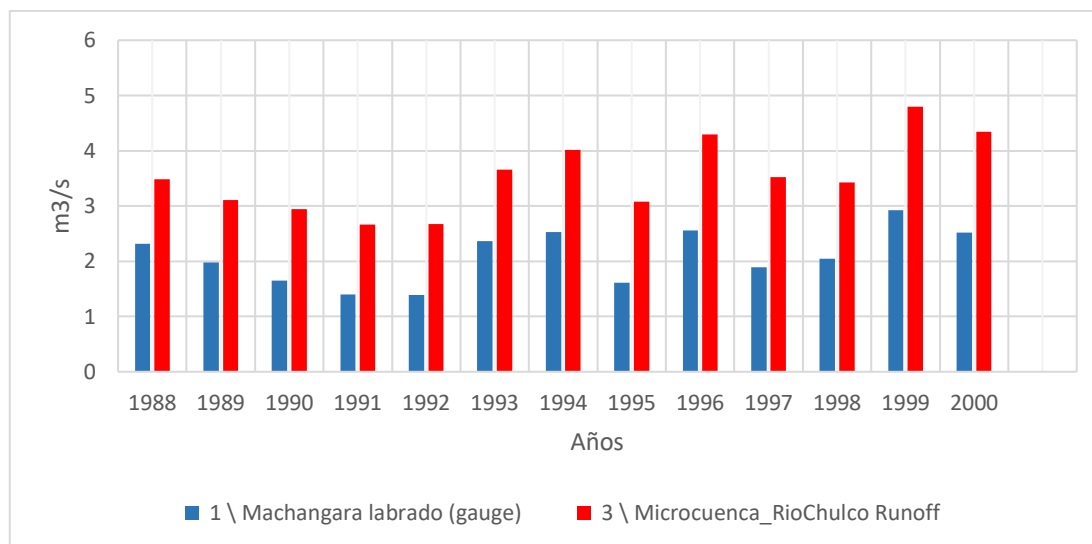
Figura 22. Caudales medios mensuales simulados y observados Microcuenca Rio Chulco.



Elaborado por: Parra M, 2016

En la Figura 23 los caudales medios anuales generados se ajustan a los observados en el periodo 1989-2000, sin embargo, la simulación sobrepasa alrededor del 30% al caudal medio anual medido en todos los años por lo expuesto anteriormente.

Figura 23. Ajustes de caudales medios Anuales de la Microcuenca Rio Chulco.



Elaborado por: Parra M, 2016

Una vez realizada la calibración se puede calcular el error que arroja la serie simulada con respecto a la observada, en este caso se utilizara el coeficiente de Nash-Sutcliffe, sesgo porcentual (PBIAS) y Raíz del error cuadrático medio.

Tabla 10. Indicadores de Error.

Indicadores de Error	Valor obtenido
NS	0.6
PBIAS	-33.96
RMSE	3.45

Elaborado por: Parra M, 2016

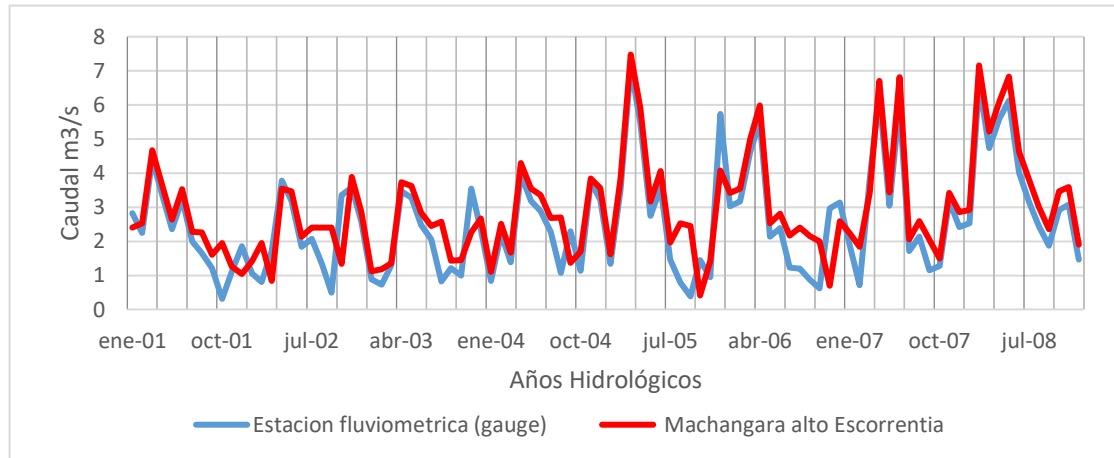
5.2.- Resultados de la Validación.

Con el fin de comprobar que la calibración reproduce de manera aceptable los sucesos reales, se realiza una validación para el período 2000 - 2008, período que posee años húmedos, secos y normales. Resultados se exponen en las siguientes figuras.

Como se observa en la figura 24 el ajuste entre los caudales simulados y observados siguen siendo favorables en el caso de la microcuenca del

Machángara alto. Teniendo algunos picos del caudal simulado para los meses de julio del 2002 y enero del 2007.

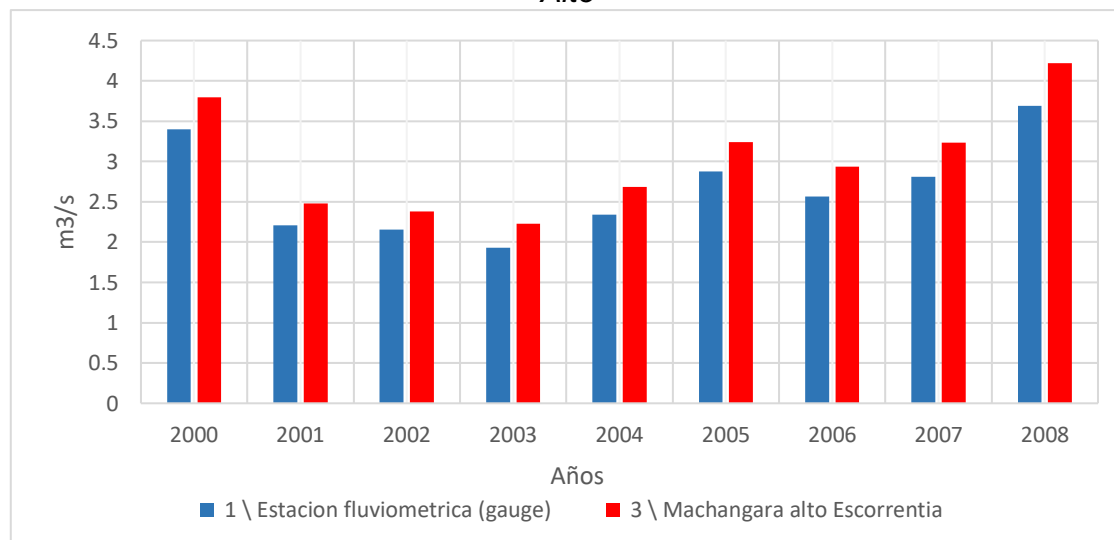
Figura 24 Ajustes de caudales medios mensuales de la Microcuenca Machángara Alto



Elaborado por: Parra M, 2016

En la figura 25 se puede apreciar de manera más clara el ajuste entre caudales de los diferentes años utilizados para la validación de los datos. Es evidente que el ajuste se logra se forma adecuada para cada uno de los años teniendo solo una diferencia mínima entre 0.3-0.5 puntos.

Figura 25 Ajustes de caudales medios Anuales de la Microcuenca Machángara Alto

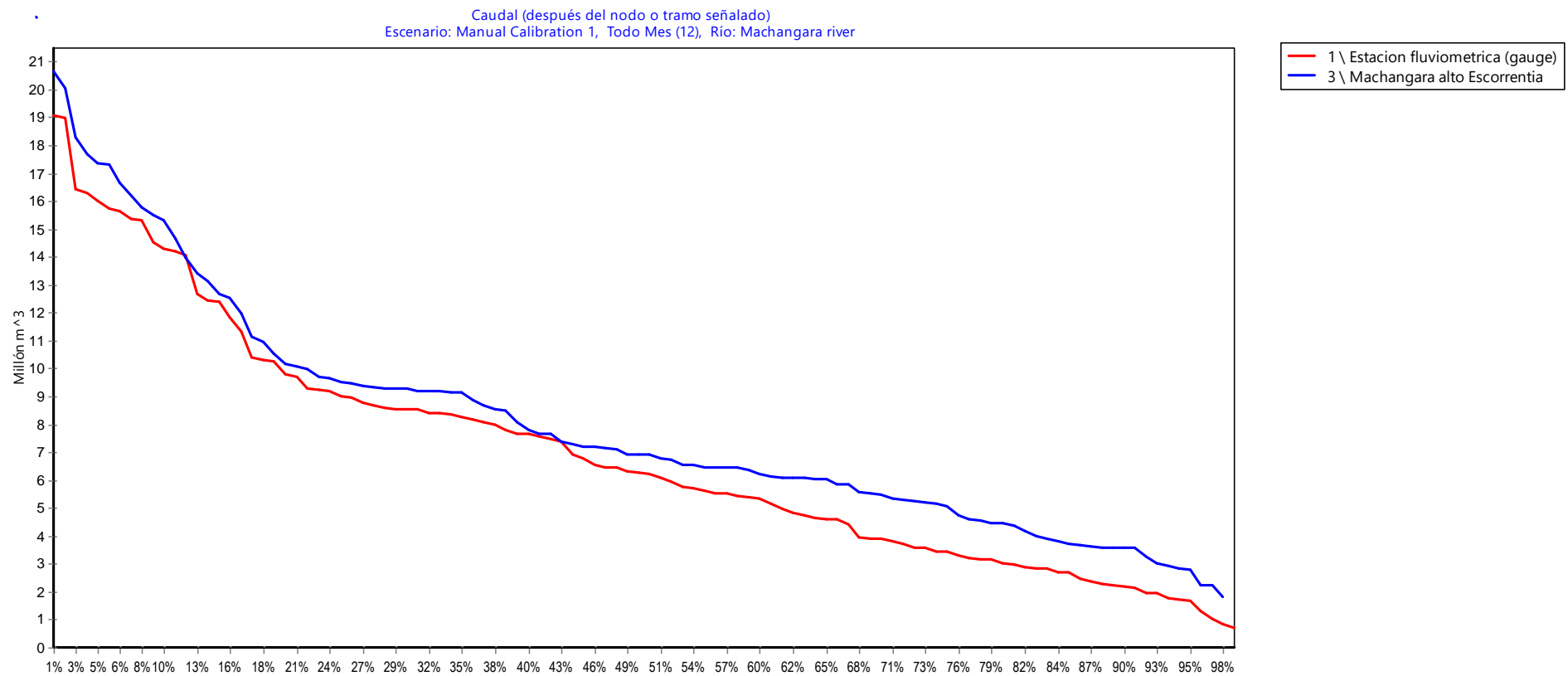


Elaborado por: Parra M, 2016



En la figura 26 se observa como está representada la frecuencia acumulada del caudal para el periodo de validación, en este caso la línea de color roja representa la estación fluviométrica y la línea de color azul el caudal simulado.

Figura 26 Porcentaje de tiempo excedido de la Microcuenca Machángara Alto.



Elaborado por: Parra M, 2016



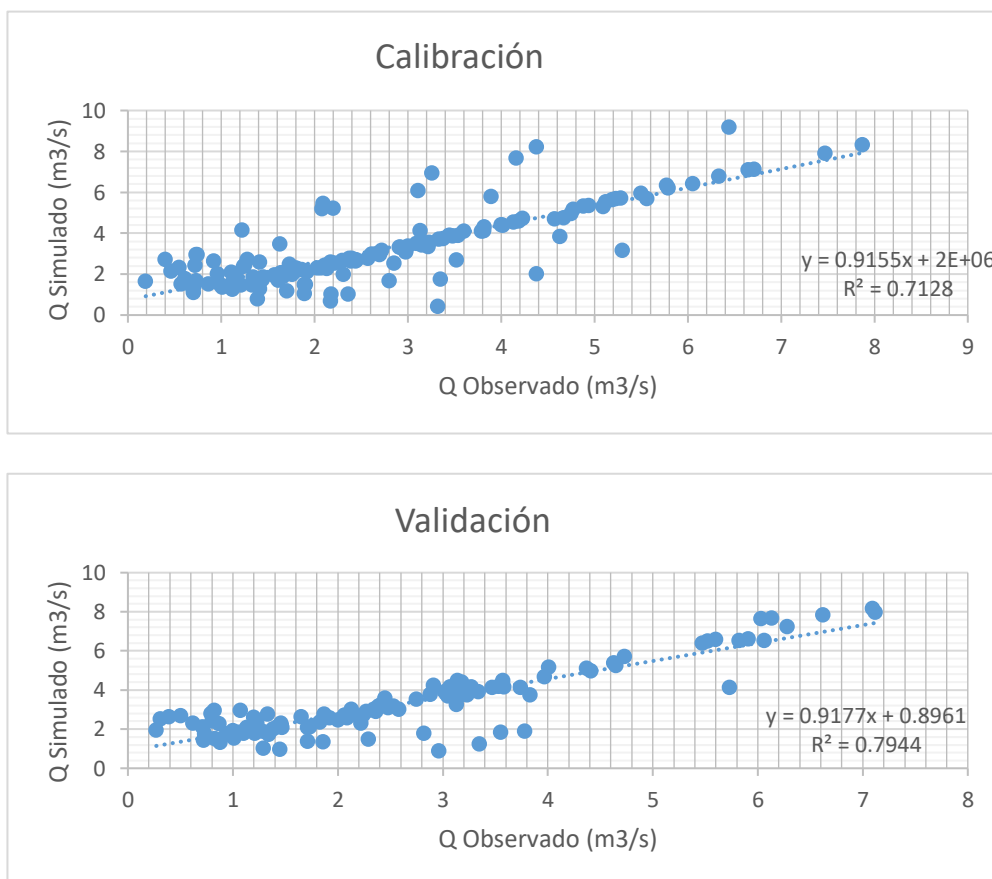
Tabla 11. Indicadores de Error en la Validación.

Indicadores de Error	Valor obtenido
NS	0.8
PBIAS	-10.66
RMSE	0.08

Elaborado por: Parra M, 2016

En los siguientes gráficos se compara la tendencia de los caudales simulados y validados. Como se puede observar se obtiene una buena correlación entre los datos simulados y observados por lo que se puede asumir que la información obtenida es de buena calidad.

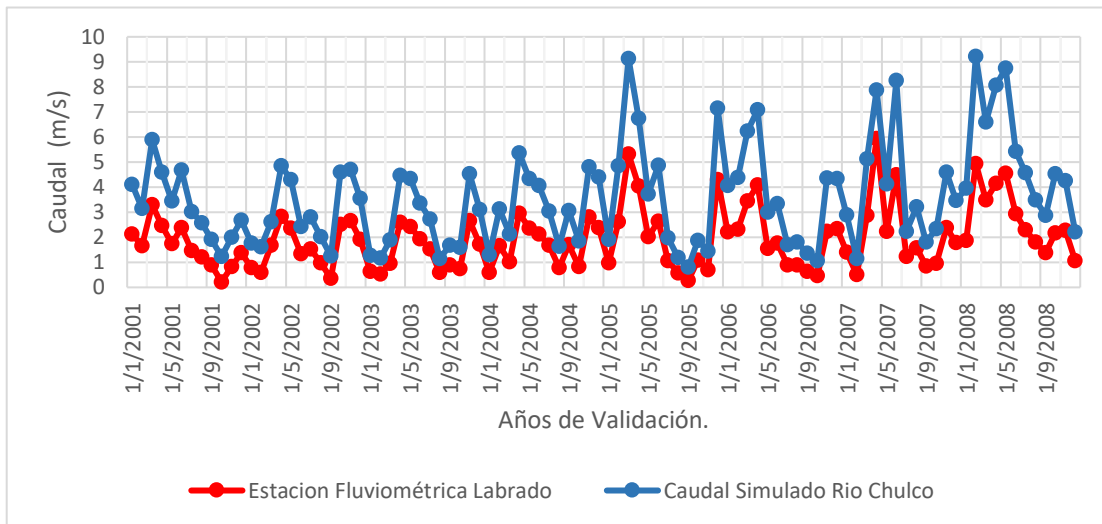
Figura 27. Relación entre caudales medios mensuales observados y simulados



Elaborado por: Parra M, 2016

En las siguientes figuras se presentan los resultados validación Rio Chulco 2000-2008.

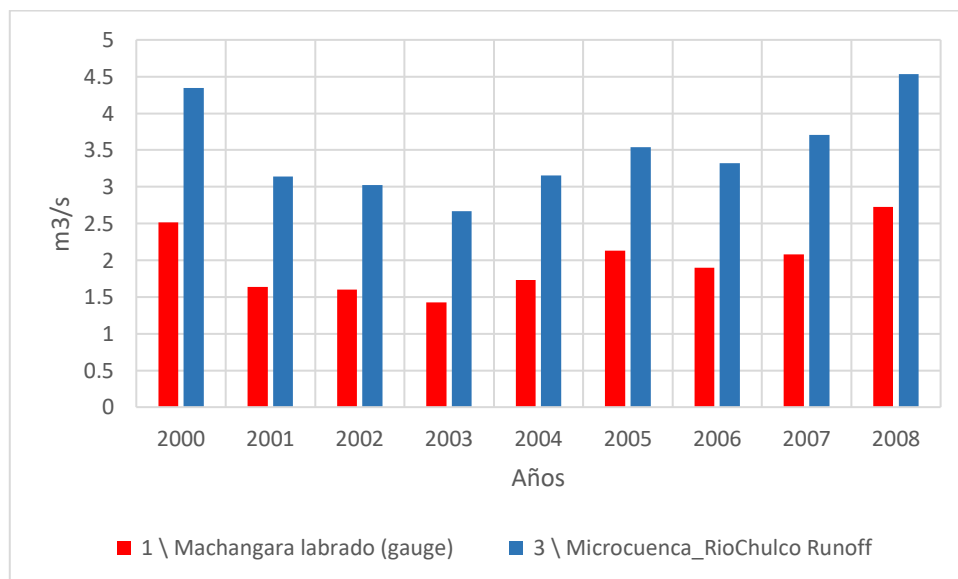
Figura 28: Caudales medios mensuales simulados y observados Microcuenca rio Chulco



Elaborado por: Parra M, 2016

En este caso se observa a diferencia de la microcuenca del Machángara alto que los valores de caudales simulados y observados no se ajustan adecuadamente, existiendo diferencias hasta de 1.5 puntos.

Figura 29 Ajustes de caudales medios Anuales de la Microcuenca del rio Chulco.



Elaborado por: Parra M, 2016



En la figura 30 se observa como está representada la frecuencia acumulada del caudal para el periodo de validación, en este caso la línea de color azul representa la estación fluviométrica y la línea de color rojo el caudal simulado.

Figura 30. Porcentaje de tiempo excedido de la Microcuenca del río Chulco

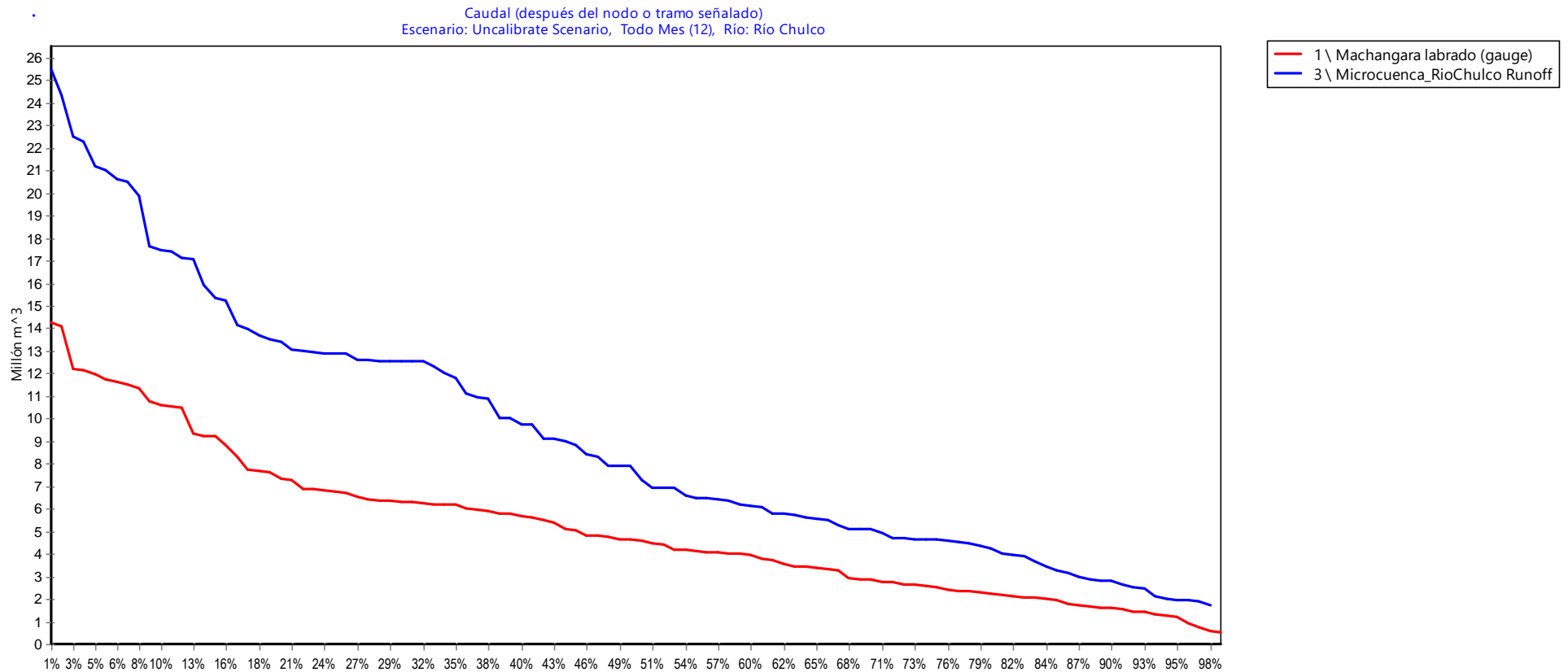


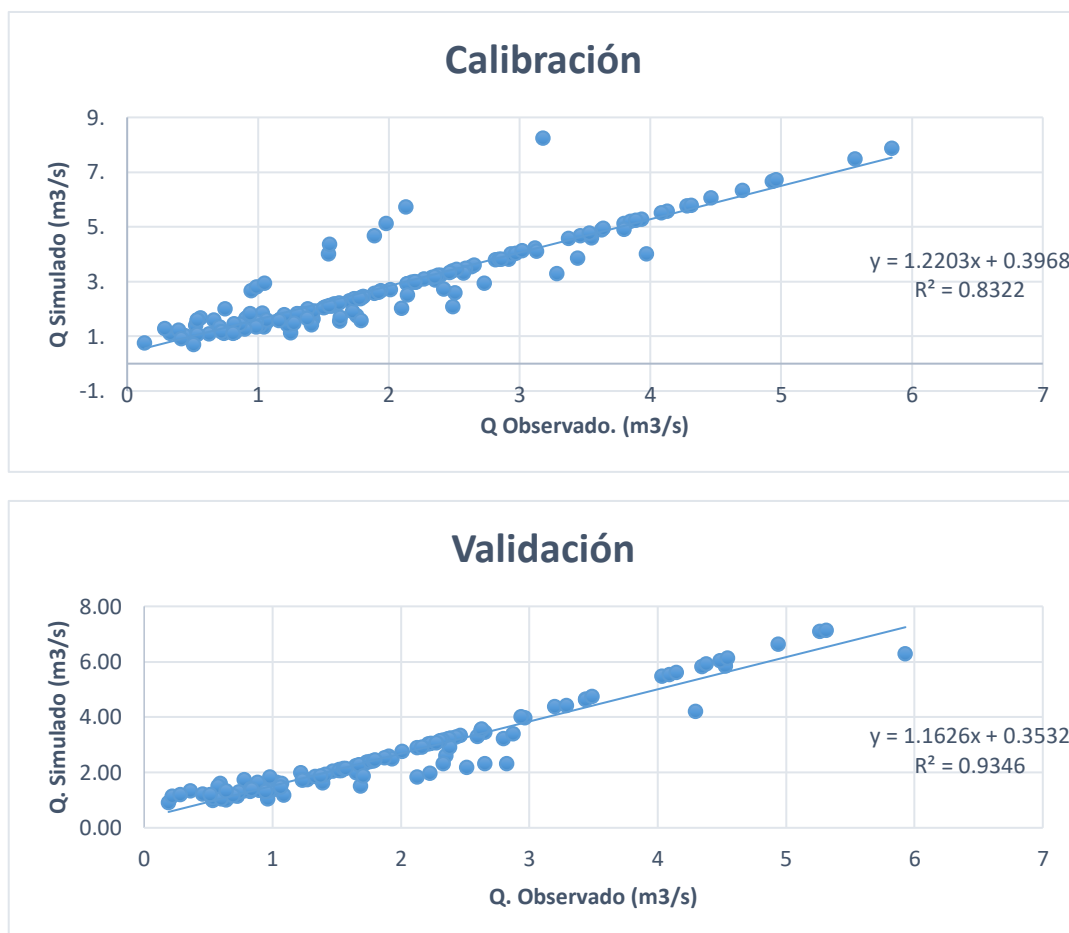
Tabla 12. Indicadores de Error en la Validación.

Indicadores de Error	Valor obtenido
NS	0.6
PBIAS	-33.25
RMSE	3.14

Elaborado por: Parra M, 2016

En los siguientes gráficos se compara la tendencia de los caudales simulados y validados en la microcuenca del río Chulco. De igual forma que en la microcuenca del Machángara alto se obtiene una buena correlación de datos entre los simulados y los observados.

Figura 31. Relación entre caudales medios mensuales observados y simulados



Elaborado por: Parra M, 2016

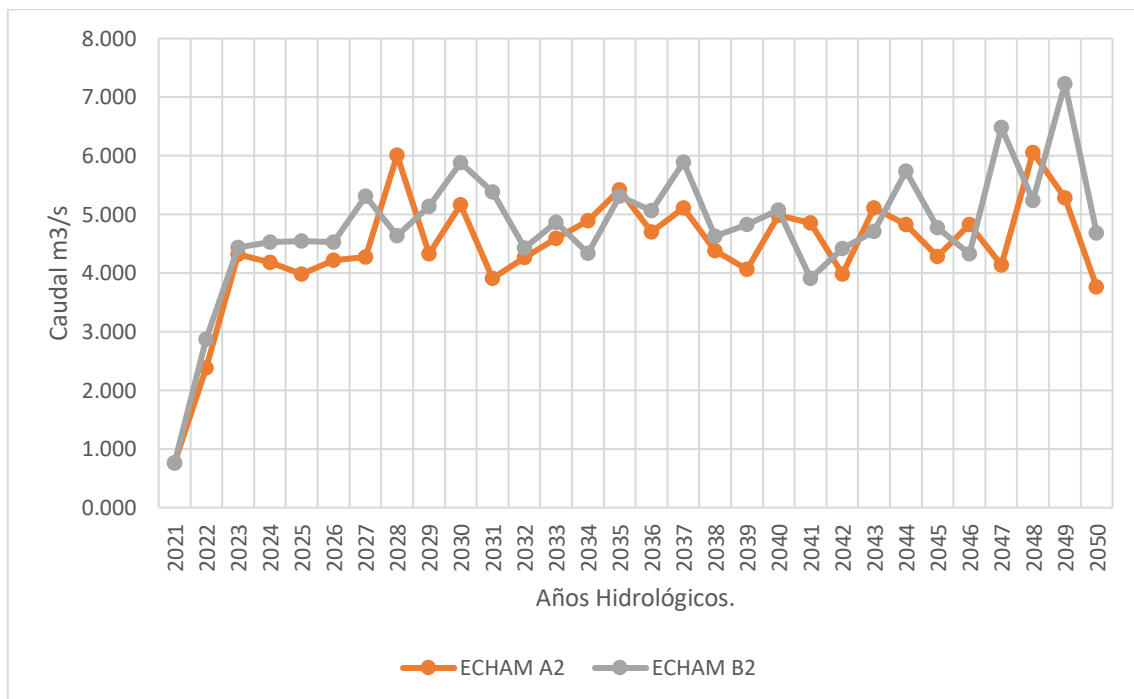
5.3. Resultados de los Escenarios Climáticos Futuros.

Finalmente se presenta los resultados del modelo WEAP en la estimación de caudales medios mensuales para el período 2021-2050 en comparación a los caudales observados en la microcuenca Machángara alto y microcuenca del río Chulco bajo el escenario A2 y B2 del modelo PRECIS ECHAM. Se realiza un análisis de los caudales medios mensuales y el estrés hídrico en la cuenca.

Además, basado en los valores de caudal disponibles en el período observado se compararon las situaciones presentes. Y en base a los datos de crecimiento poblacional se obtuvo la demanda que se producirá durante los años proyectados.

A continuación, se analiza la información de caudales obtenidos para las dos estaciones relevantes en este estudio comparando los escenarios ECHAM A2 y B2.

Figura 32. Caudal promedio mensual, estación Chanlud, escenarios ECHAM A2 y B2.



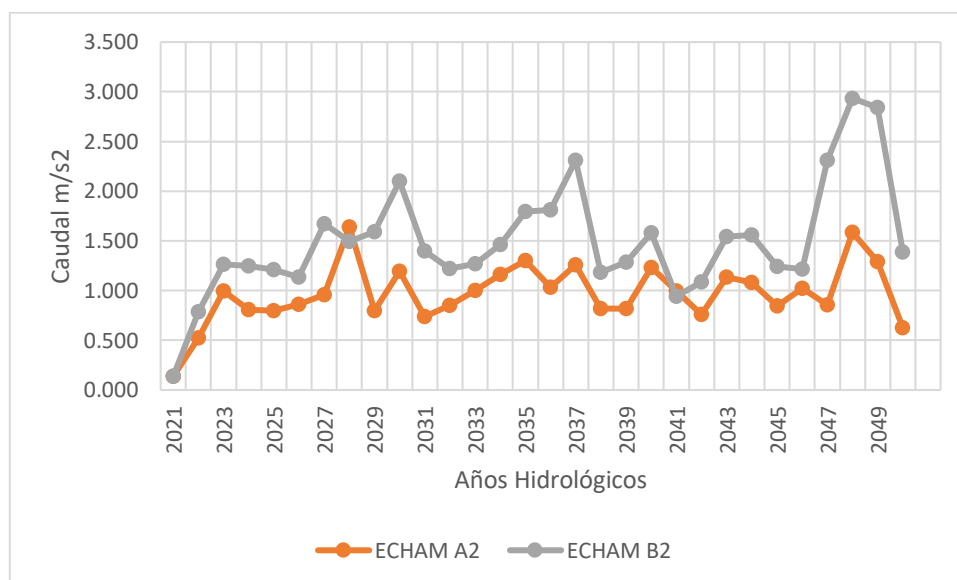
Elaborado por: Parra M, 2016

Tabla 13. Resultados de Caudal para escenarios climáticos, estación Chanlud.

CAUDAL m3/s		
	ECHAM-A2	ECHAM-B2
Promedio Anual	4.436123716	4.799616588
Max Anual	6.059	7.227
Min Anual	0.767	0.767

Elaborado por: Parra M, 2016

Figura 33. Caudal promedio mensual, estación Labrado, escenarios ECHAM A2 y B2.



Elaborado por: Parra M, 2016

Tabla 14. Resultados de Caudal para escenarios climáticos, estación Labrado.

CAUDAL m3/s		
	ECHAM-A2	ECHAM-B2
Promedio Anual	0.909100788	1.430409185
Max Anual	1.53284773	2.828180334
Min Anual	0.138	0.123

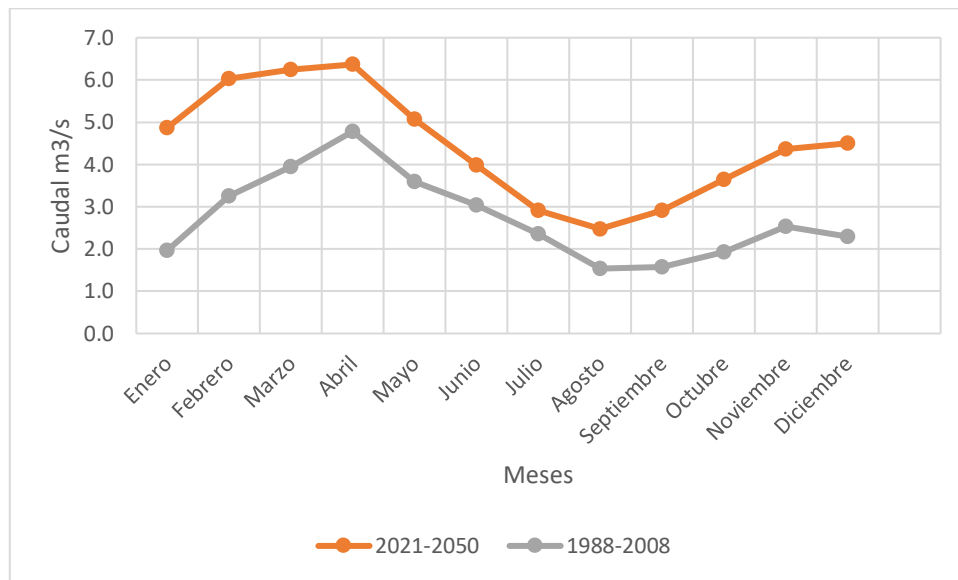
Elaborado por: Parra M, 2016

5.3.1.- Análisis de caudales medios mensuales.

A continuación, se presenta como varían mensualmente los caudales de cada escenario tomado para el estudio en relación al caudal observado.

Como se puede observar en la Figura 34 si existe una variación del régimen en la cuenca. La línea ploma representa los caudales medios mensuales para los datos observados para el periodo 1988-2008 a su vez la línea de color naranja representa los caudales medios simulados para el período 2021-2050 del Escenario ECHAM A2. Notamos que tienen un comportamiento similar sin embargo hay un notable aumento de caudal en los datos simulados.

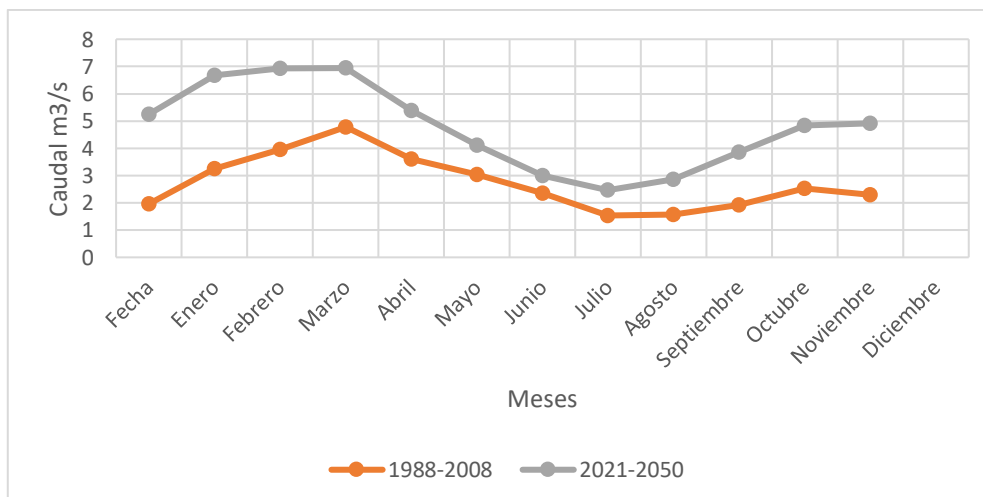
Figura 34. Promedio mensual Presente y Futuro Caudales A2 Machángara Alto.



Elaborado por: Parra M, 2016

En la figura 35 se observa que en este escenario la diferencia entre el aumento del caudal es menor, tomando en cuenta que de igual forma que el escenario A2 tiene un comportamiento similar a la serie observada.

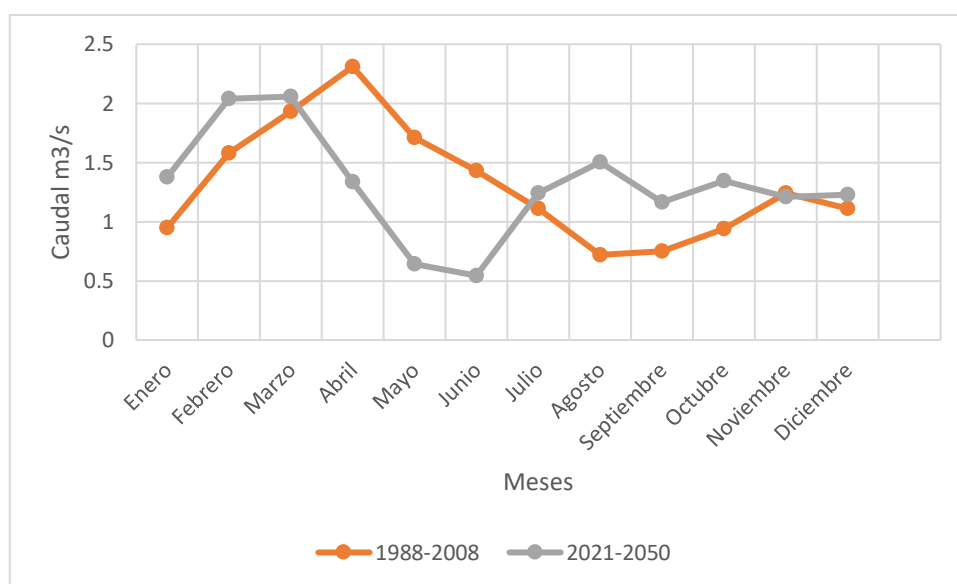
Figura 35 Promedio mensual Presente y Futuro Caudales B2 Machángara Alto.



Elaborado por: Parra M, 2016

Como se observa a diferencia de lo que sucede con el caudal en la microcuenca alta del Machángara, las proyecciones futuras del escenario A2 muestran una disminución en los meses de mayo junio y julio a comparación del caudal observado. Se puede asumir que se debe a la mayor retención de agua por parte de los bosques presentes en esa zona en épocas de sequía.

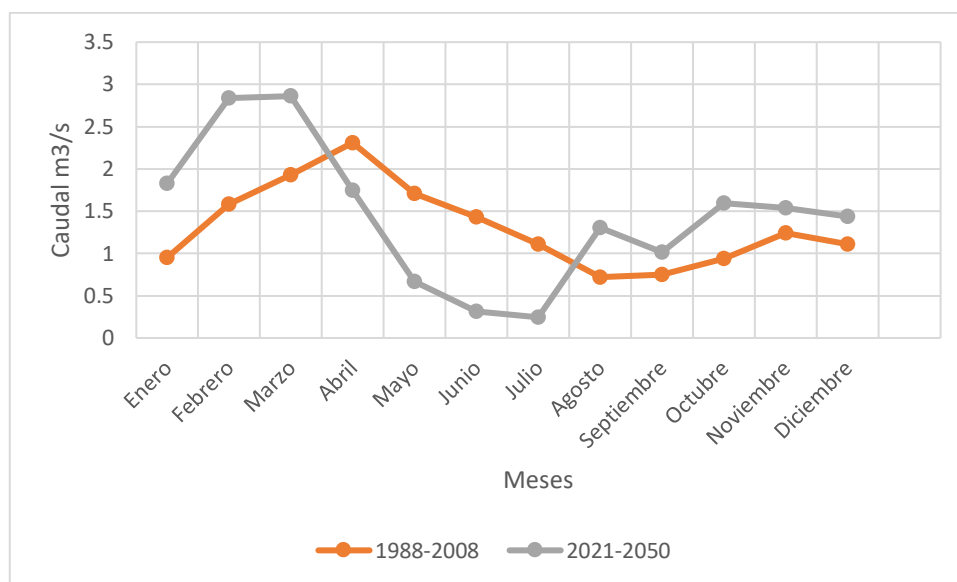
Figura 36 Promedio mensual Presente y Futuro Caudales A2 Rio Chulco.



Elaborado por: Parra M, 2016

Finalmente, en la figura 37 se representa como varia mensualmente el caudal observado en relación al escenario B2, en este caso se observa que para los meses de mayo hasta julio disminuirá el caudal, sin embargo, para el resto de meses del año se mantendrá aproximadamente con el mismo nivel que presenta el caudal en el periodo de 1988-2008.

Figura 37 Promedio mensual Presente y Futuro Caudales B2 Rio Chulco.



Elaborado por: Parra M, 2016

5.2.2.- Demandas.

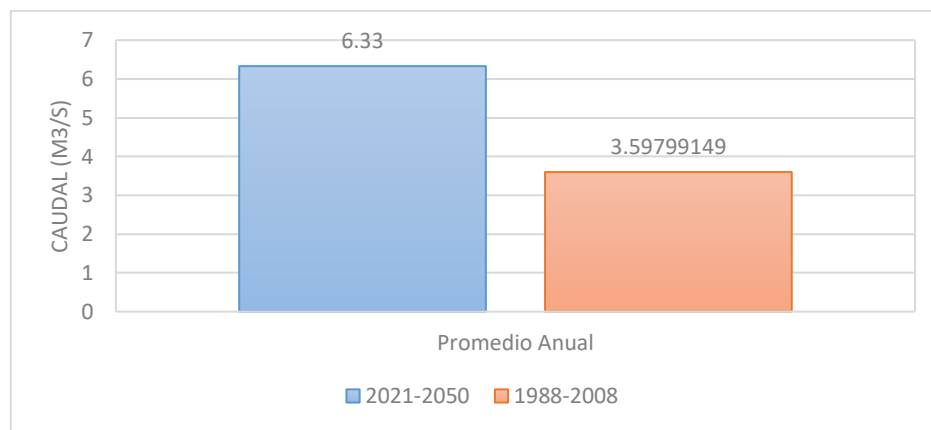
La demanda de agua fue modelada en función a la población y la dotación de recurso entregada, con lo cual se obtuvieron datos de demanda que dependen del crecimiento poblacional en la ciudad de Cuenca, la Tabla N° 15 presenta el cuadro resumen de los datos comparados entre máximos, medios y mínimos de los periodos de los escenarios observados y simulados, mientras la Figura 38 se representa la comparación entre el periodo base y el proyectado.

Tabla 15 Resultados de Demanda promedio mensual, periodos: Observado vs Simulado.

		1988-2008	2021-2050
DEMANDA (m³/s)	Max anual	4.90	10.82
	Promedio	3.59	6.338
	Min anual	2.63	3.90

Elaborado por: Parra M, 2016.

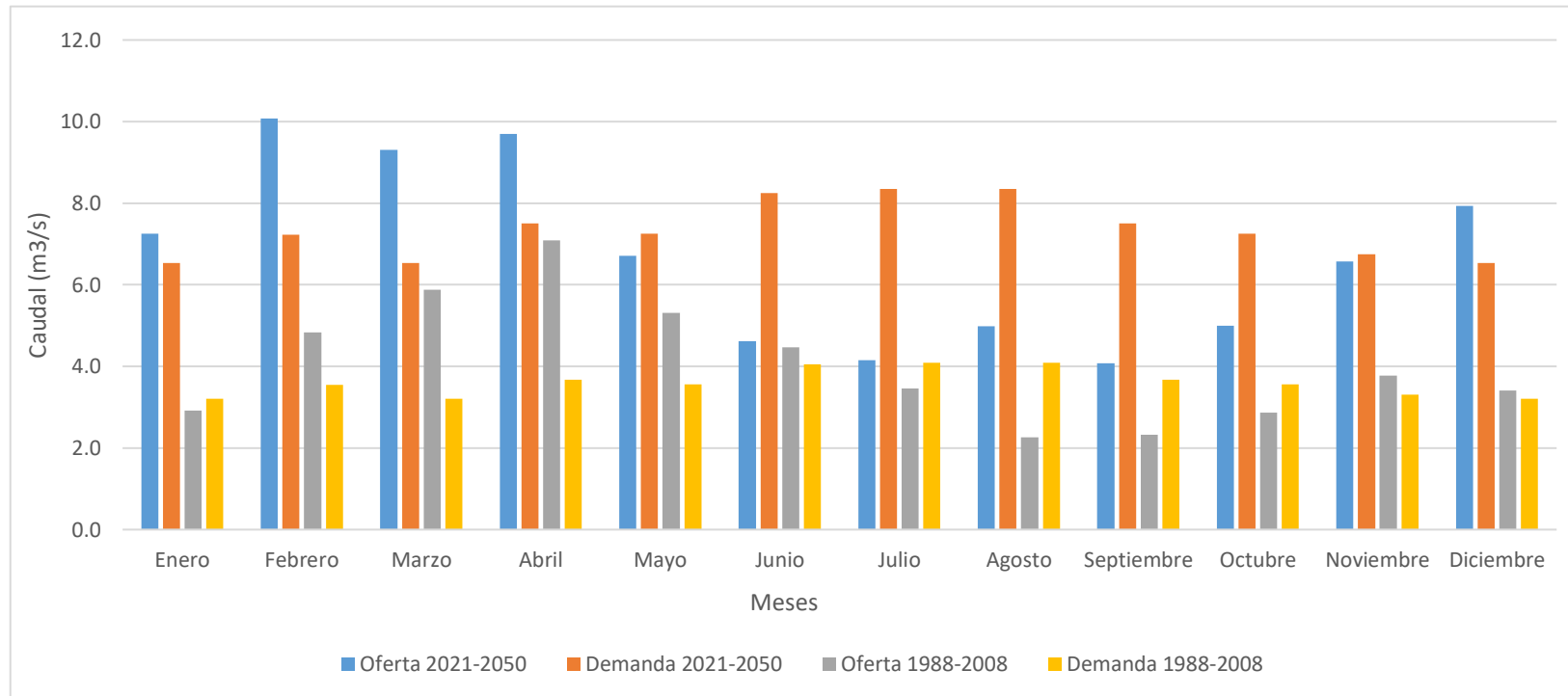
Figura 38 Comparación entre la demanda del periodo base y el proyectado.



Elaborado por: Parra M, 2016

Ahora es posible analizar el cruce entre la oferta y demanda de consumo humano para la microcuenca.

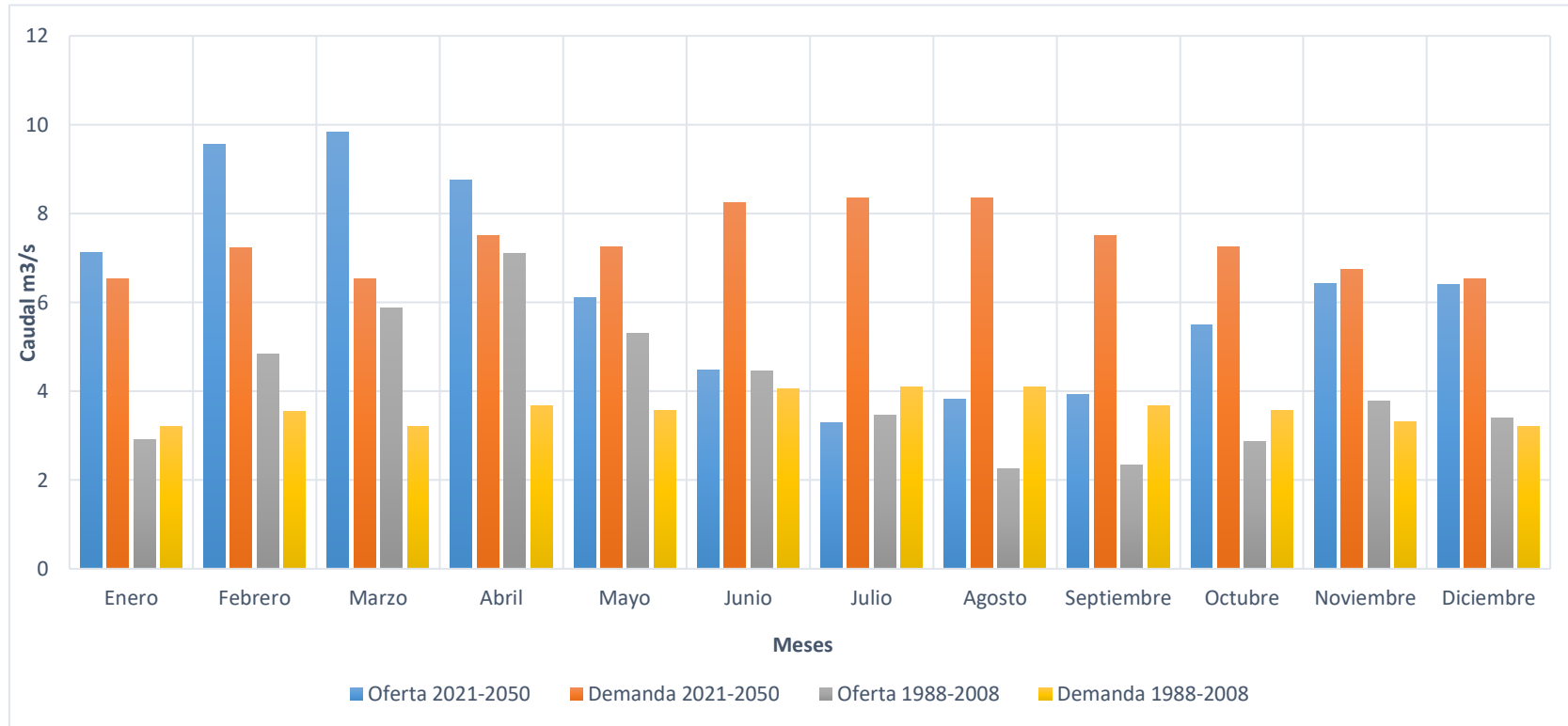
Figura 39 Balance Hídrico entre oferta y demanda por consumo humano del periodo observado y el escenario A2



Elaborado por: Parra M, 2016

Realizando un análisis de esta grafica 39 podemos observar que en la cuenca del río Machángara en los meses de junio a septiembre la demanda aumentaría notablemente en relación a la oferta basándose en la serie de datos del escenario A2. A su vez, comparando con la serie observada, se incrementa de forma considerable la oferta como la demanda.

Figura 40 Balance Hídrico entre oferta y demanda por consumo humano del periodo observado y el escenario B2



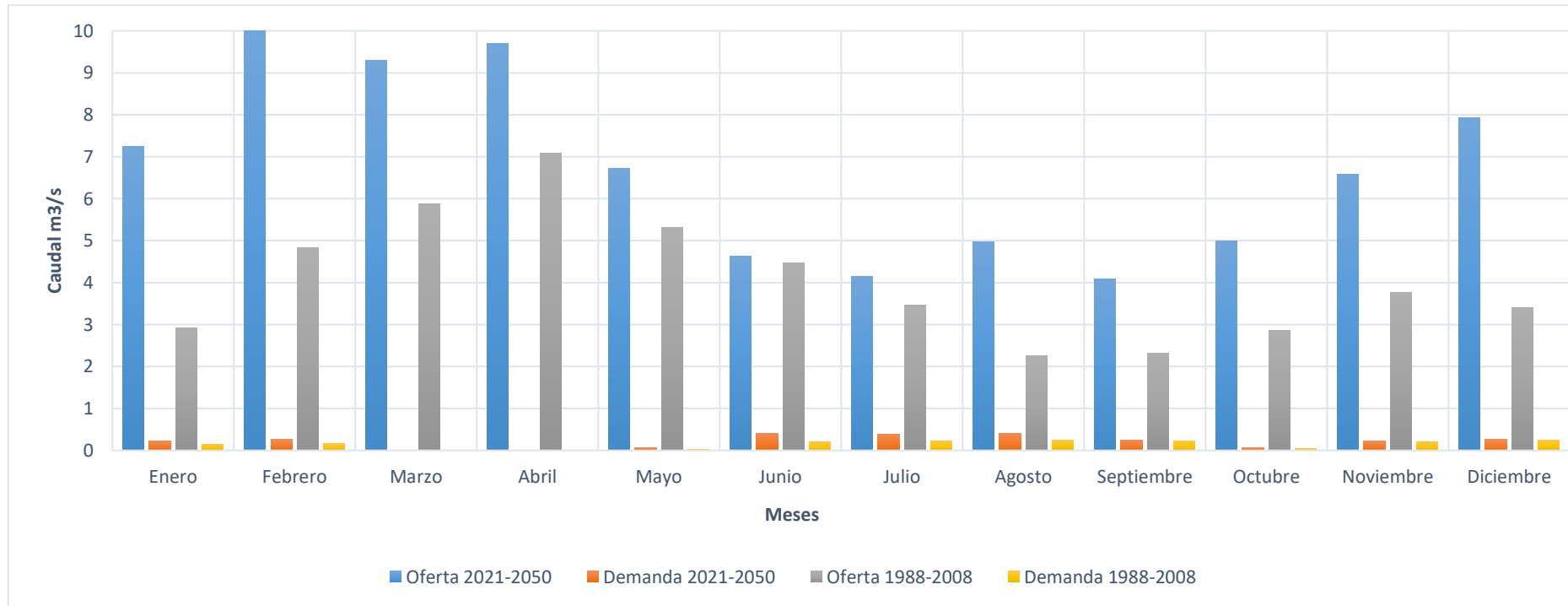
Elaborado por: Parra M, 2016



Como en el gráfico anterior (figura 40) se observa que en la cuenca del río Machángara en los meses de junio a septiembre la demanda aumentaría en relación a la oferta basándose en la serie de datos del escenario B2. A diferencia del escenario A2 en el mes de diciembre se reducirá el caudal de forma que se mantendría igual que la demanda. Comparando con la serie observada, se incrementa de forma considerable la oferta como la demanda.

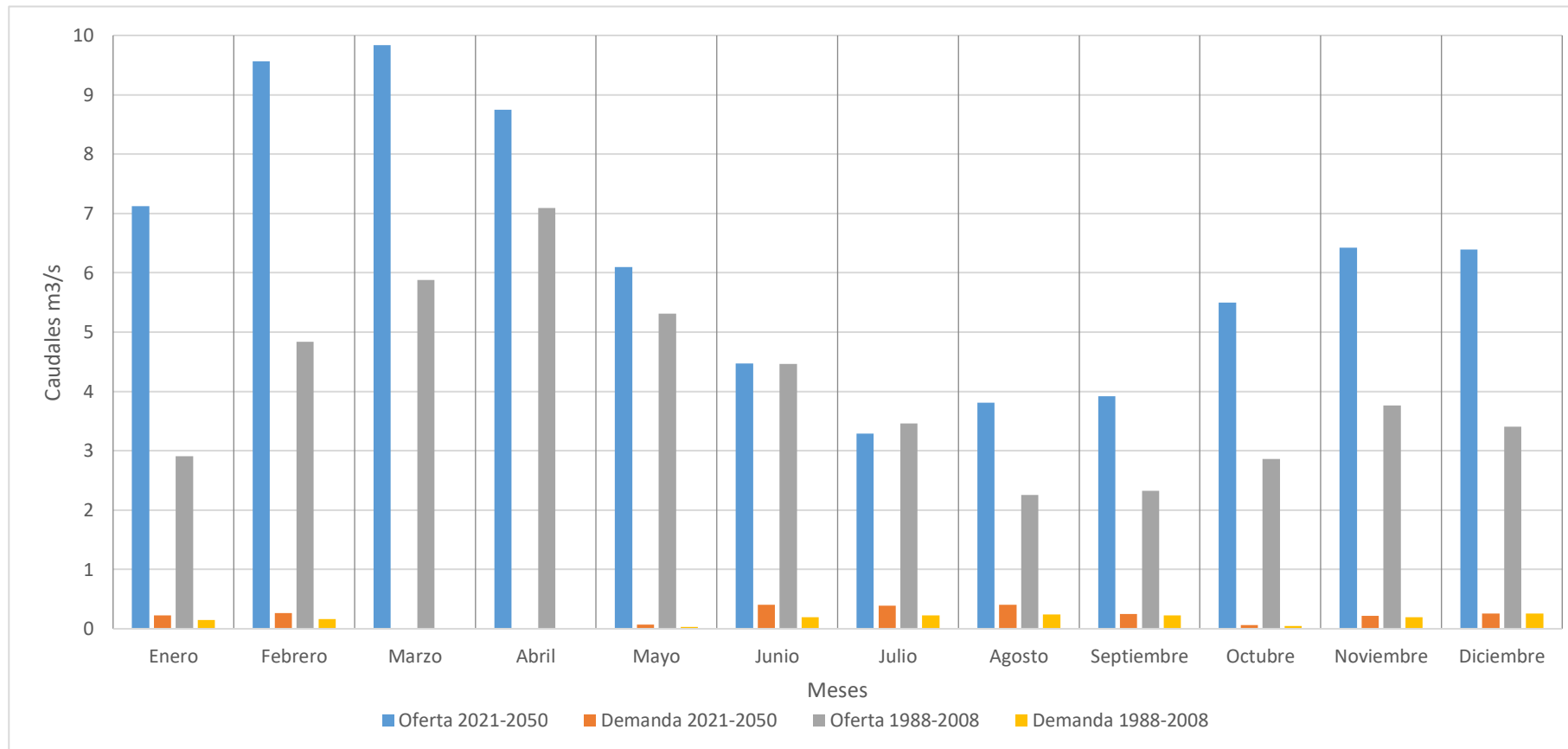
En las figuras 41 y 42 se observa como varia la demanda producida por los canales de riego Machángara y la Dolorosa respectivamente. En relación a ambos escenarios se logra observar que la oferta será suficiente para abastecer las demandas, tomando en cuenta también que en los meses de lluvia como son marzo y abril especialmente no se requerirá del suministro extra del recurso.

Figura 41. Balance Hídrico entre oferta y demanda por canal Agrícola Machángara y La Dolorosa del periodo observado y el escenario A2



Elaborado por: Parra M, 2016

Figura 42 Balance Hídrico entre oferta y demanda por canal Agrícola Machángara y la Dolorosa en el periodo observado y el escenario B2



Elaborado por: Parra M, 2016

CAPÍTULO 6: Conclusiones y Recomendaciones.

Finalmente, después de haber realizado el estudio se puede decir que el modelo WEAP es una herramienta de modelación conveniente para representar los efectos del cambio climático gracias a que principalmente utiliza variables climáticas (precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) que van a representar el comportamiento hídrico dentro de la cuenca investigada, además de utilizar parámetros de uso del suelo que lo hacen un modelo físico muy conveniente para la simulación o proyección de escenarios. Los datos de escenarios climáticos que utiliza el modelo WEAP, son el resultado de la implementación de modelos regionales de cambio climático en este caso ECHAM A2 y B2 respectivamente.

Con este estudio lo que se quiso es aportar con una metodología para el uso de una nueva herramienta para la planificación de recursos hídricos como es el modelo WEAP, y evaluar los cambios del clima para un escenario 2021 al 2050 tomando en cuenta este periodo de proyección por encontrarnos en el año 2016 siendo solo una diferencia mínima de 4 años.

Gracias a esta herramienta se podrá manejar ejes de planificación que se requieran para el uso del recurso en este caso que pueda abastecer a todas sus demandas.

6.1. Conclusiones Modelo WEAP.

- La calidad y precisión de los resultados que se obtuvieron en la calibración y validación dependieron principalmente de la información de caudales, temperatura y precipitación de las estaciones meteorológicas de control.
- Se obtuvieron un buen ajuste para los caudales medios mensuales en ambas microcuencas estudiadas, obteniendo un coeficiente de Nash – Sutcliffe de 0,6 en el período de calibración y de 0,8 en el período de validación en la microcuenca del Machángara alto. En la microcuenca del

rio Chulco los coeficientes de Nash –Sutcliffe logrados fueron de 0,6 y 0,65 en calibración y validación respectivamente.

- En el caso de los escenarios de clima elegidos para la zona, la precipitación mantuvo la tendencia histórica y fue superior provocando un aumento en los caudales en la microcuenca alta del Machángara, sin embargo, para la microcuenca del rio chulco para el periodo de meses desde abril a junio existirá un déficit de caudal. Esto vendría a tener repercusiones aumentando el riesgo de inundaciones en el caso de aumento de caudal, pero por otro lado se tendría una buena disponibilidad de agua para los distintos usos. Y en el caso de disminución, entender cómo manejar el recurso de forma que se pueda abastecer de manera correcta a las demandas. Por otra parte, la temperatura presenta un aumento entre 5°C a 7°C. según lo cual se puede esperar cambios de incidencia extremos como por ejemplo menor cantidad de días fríos existiendo una menor variación diaria entre las temperaturas mínimas y máximas.
- Es importante analizar el cruce entre la oferta y demanda de agua, observando que la población proyectada de la ciudad de Cuenca para el año 2050 alcanza una cifra de 840000 habitantes, consecuencia de este crecimiento la demanda de agua se elevará hasta un caudal promedio mensual estimado de 6.33 m³/s, tomando en cuenta que la oferta hídrica alcanza solo un 6.87 m³/s por lo que será un reto resguardar este recurso de forma que pueda abastecer todas las demandas para las que representa una gran importancia esta microcuenca.
- En el caso del análisis por demanda en el caso del consumo humano existirán meses que requerirán de un mejor manejo de caudales para que logre abastecerse, sin embargo, para el caso de los canales de riego se mantendría un nivel adecuado para el uso del mismo

6.3. Recomendaciones

- Para obtener resultados más favorables es recomendable utilizar escenarios climáticos con menor escala de forma que los datos obtenidos sean más específicos para la zona de estudio, en este caso se usó los datos del modelo regional PRECIS ECHAM con una escala de la grilla de salida de 25 km.
- La información utilizada en el proceso de modelación como es el caso de caudales y parámetros de uso del suelo fueron estimados debido a la falta de datos medidos, por lo que se recomienda para futuros trabajos caracterizar y monitorear algunas variables de interés en la modelación de tal forma que los resultados obtenidos sean de mayor precisión.
- Cuando se posee gran cantidad de datos es recomendable el uso de supuestos claves que facilita el manejo del software WEAP, en este caso no fue necesario.
- Se aconseja adicionar los nuevos proyectos previstos para la ciudad de Cuenca y destinados para cubrir las demandas rurales, con lo cual se mejora la planificación de este recurso para escenarios futuros.
- En este caso de estudio no se consideró un cambio entre las demandas aplicadas al modelo, por lo que se recomienda para futuras investigaciones proyectar como afectaría el cambio de estas como el cambio en el uso del suelo que podría abarcar mayores áreas.

En conclusión, el cambio climático afectará la disponibilidad de agua en la cuenca del Machángara por lo que se deberán acoger medidas de adaptación para minimizar los efectos sobre los consumidores y, en especial, aquellos sectores que dependen de este vital recurso para subsistir.

Referencias Bibliográficas

- Avilés A., A., Solera S., A., Cuenca, U. de, Cuenca, D. de I. de la U. de, & DIUC. (2012). Estimación del riesgo de fallo en el suministro de agua como ayuda a la planificación y gestión de recursos hídricos. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/5419>.
- Cabrera, J. (2008). Calibración de Modelos Hidrológicos (Vol. 1).
- Cárdenas, N. (2012). ANÁLISIS A LA GESTIÓN DEL PLAN DE SANEAMIENTO HÍDRICO DE PEREIRA DESDE LA PERSPECTIVA INTEGRAL DEL RECURSO, HACIENDO USO DE WEAP COMO SISTEMA SOPORTE DE DECISIÓN (Trabajo de Grado, no publicado). UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, PEREIRA. Retrieved from <http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesisd/textoyanexos/36361C266.pdf>.
- Carter, T.R., Hulme, M., Lal M. (1999). Guidelines on the use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment, IPCC.
- Castro, G., & Norma, L. (2014). Implementación del sistema de modelación WEAP como herramienta para la gestión integral del recurso hídrico en la vereda La Bella (Trabajo de Grado). Universidad Tecnológica de Pereira, PEREIRA. Retrieved from <http://hdl.handle.net/11059/4468>.
- Centro de Cambio Global, (2009). Informe: modelación hidrológica y de recursos hídricos de la cuenca del río paute. Santiago de Chile
- Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009. Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP. Desarrollada con contribuciones del PACC (Proyecto de Adaptación al Cambio Climático a través de una efectiva gobernabilidad del agua en Ecuador), Ministerio del Ambiente de Ecuador, y PROMAS (Programa para el Manejo del Agua y del Suelo) de la Universidad de Cuenca, Ecuador.
- CEPAL. (2009). Cambio climático y desarrollo en América Latina y el caribe. . Santiago de Chile. Publicación de las Naciones Unidas Eclac.[En



- Línea] <http://www.cepal.org/es/publicaciones/3640-cambio-climatico-y-desarrollo-en-america-latina-y-el-caribe-una-resena>.
- Espíldora, B., E. Brown, G. Cabrera & P. Isensee. 1975. Elementos de hidrología. Centro de Recursos Hidráulicos, Universidad de Chile, Santiago, Chile, p.irr.
 - FAO. (n.d.). Chapter 6 - ETc - Single crop coefficient (Kc). Retrieved July 20, 2016, from <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e0b.htm>
 - García-González, M., & Carvajal-Escobar, Y. (2007). La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos como estrategia de adaptación al cambio climático. *Ingeniería y Competitividad*, 9(1), 19–29.
 - Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. (2000). Informe especial del IPCC. Escenarios de emisiones. Nairobi. Informe Técnico. [En Línea]. <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-sp.pdf>.
 - Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC). Introducción a modelos climáticos, 1997.
 - GWP (Global Water Partnership). (2002). Agua para el siglo XXI: de la visión a la acción. Global Water Partnership, Estocolmo, Suecia; Buenos Aires, Argentina.
 - Höllermann, B., Giertz, S., & Diekkrüger, B. (2010). Benin 2025—Balancing Future Water Availability and Demand Using the WEAP “Water Evaluation and Planning” System. *Water Resources Management*, 24(13), 3591–3613. <http://doi.org/10.1007/s11269-010-9622-z>.
 - Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), Junio 2015. <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/>.
 - Mena, D. (2009). ANÁLISIS DE IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA ANDINA DEL RÍO TENO, USANDO EL MODELO WEAP (Tesis de Grado). UNIVERSIDAD DE CHILE, Chile. Retrieved from http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2009/mena_d/sources/mena_d.pdf.
 - Molnar, P. (2011). "Calibration". *Watershed Modelling*, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland

- Noreña, O., E, J., Gay García, C., Conde, A. C., Magaña, V., & Sánchez Torres Esqueda, G. (2009). Vulnerability of water resources in the face of potential climate change: generation of hydroelectric power in Colombia. *Atmósfera*, 22(3), 229–252.
- Proyecto de Adaptación al Cambio Climático (PACC) a través de una efectiva Gobernabilidad del Agua en Ecuador, 2008, Estudio de vulnerabilidad actual a los riesgos climáticos en los recursos hídricos en la cuenca del Paute.
- Riquelme Serey, J. P. (2010). INCERTIDUMBRE DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS EN LA ESTIMACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS FUTUROS EN LA CUENCA DEL RÍO PANGAL. Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Roffe, T. G., Toruño, P. J., Orantes, E. A. M., & Espinoza, E. I. G. (2015). Servicios ambientales y gestión de los recursos hídricos utilizando el modelo WEAP: casos de estudio en Iberoamérica. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático.*, 1(1), 72–87.
- Salinas Villafañe, A. A., & Paz Rada, O. (2011). Aplicación del Modelo de Planificación Hídrica de Cuencas Weap al Proyecto: Aducción de Recursos Hídricos Mururata. *Revista Tecnología, Investigación Y Docencia*, 27.
- Sanchez, I., Esquivel, G., Bueno, P., López, R., & Rivera, M. (2012). Uso del Modelo WEAP para modelación de procesos como fundamento para la toma de decisiones en Cuencas Hidrológicas. *Agrofaz*, 12(3). Retrieved from http://www.agrofaz.mx/wp-content/uploads/articulos/2012123IX_3.pdf.
- SECRETARÍA GENERAL DE PLANIFICACIÓN YDESARROLLO - SENPLADES- Zona de Planificación 6, “Agenda Zonal para el Buen Vivir, Propuestas de Desarrollo y Lineamientos para el Ordenamiento Territorial”, Quito Ecuador, Año 2010
- Serrano Bustos, R. (2014). Proyecciones de disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca alta del Maipo, bajo escenarios recientes de cambio climático. Retrieved from <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/117011>.

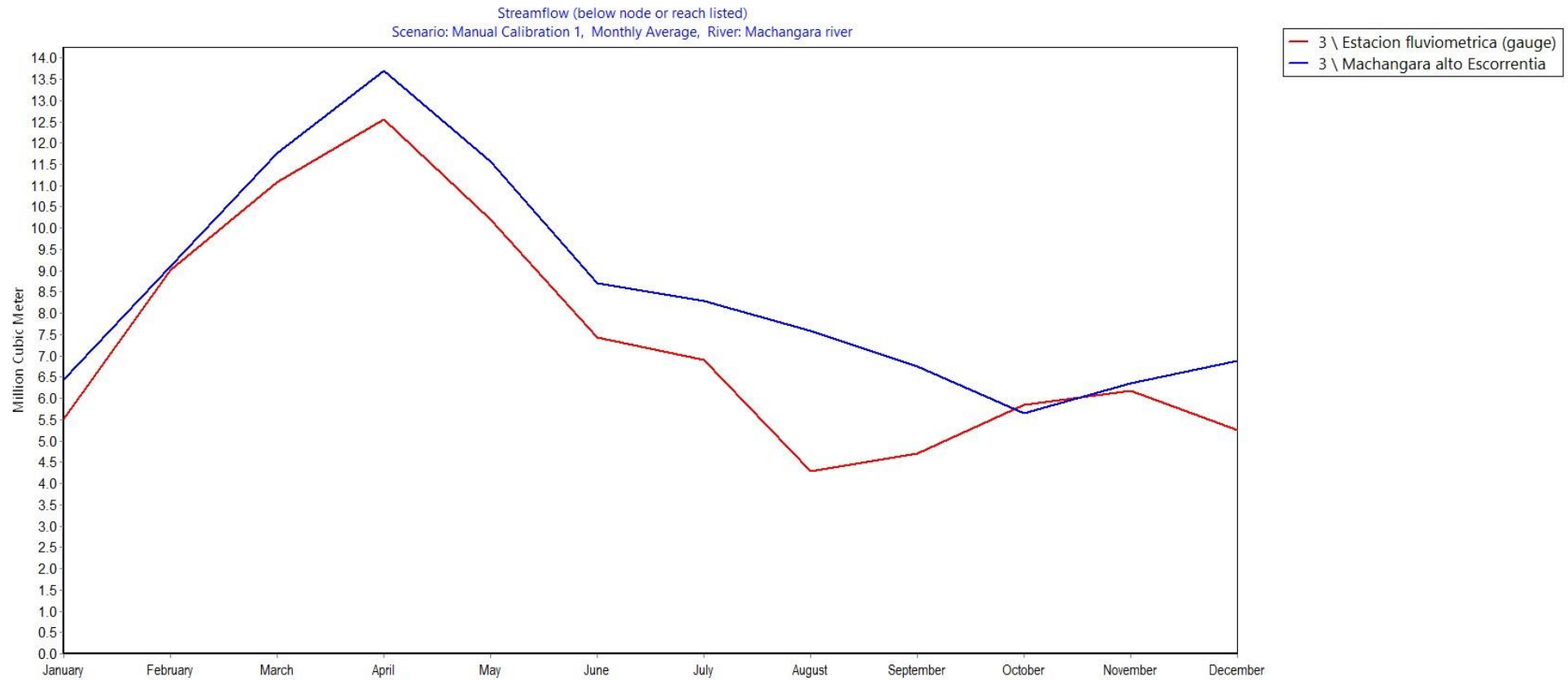


- Stockholm Environment Institute (2008). WEAP Evaluation and Planning system, Tutorial. <<http://www.weap21.org/>>.
- Villa Olivares, E. D. L. Á. (2013). IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA Y SUS EFECTOS SOBRE LOS USOS DE AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO ELQUI. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas Y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, Santiago de Chile.



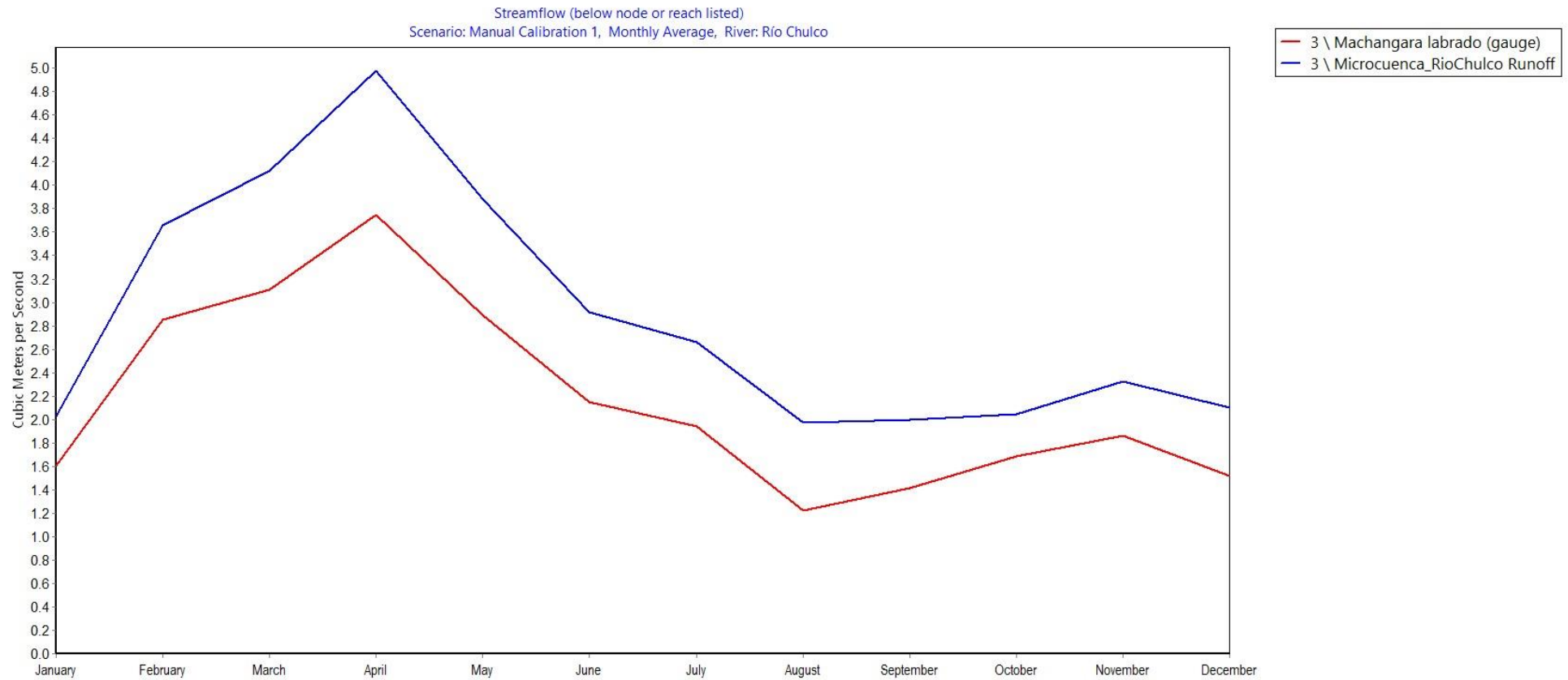
ANEXOS

Anexo 1. En la siguiente figura se muestra que el ajuste logra generar el régimen de la microcuenca Machángara alto entre el caudal simulado y el observado.

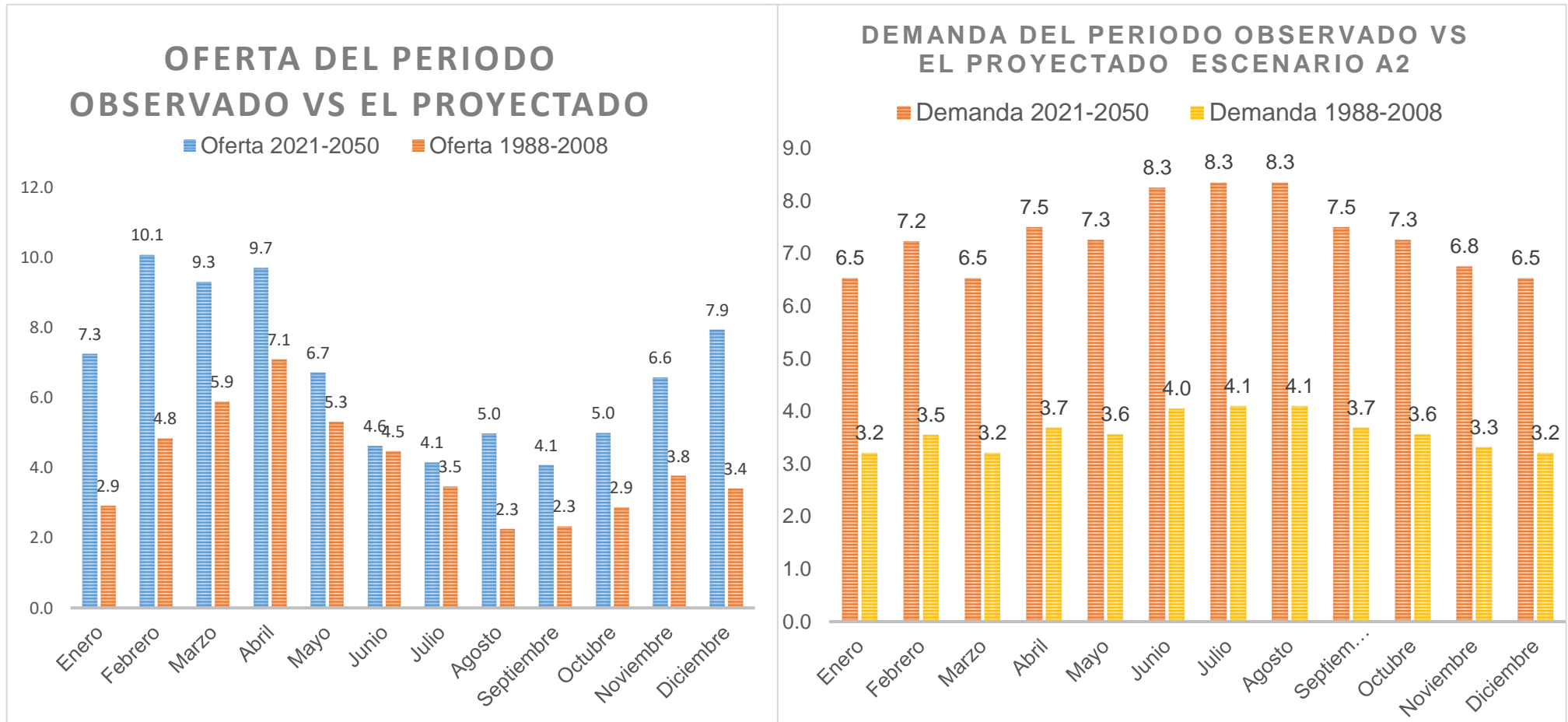




Anexo 2. En la Figura se muestra que el ajuste logra generar el régimen de la microcuenca del Río Chulco entre el caudal simulado y el observado.



Anexo 3. Diferencia entre ofertas y demandas. Escenario A2 para consumo humano.



Anexo 4. Diferencia entre ofertas y demandas. Escenario B2 para consumo humano

