

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
ESCUELA DE POSGRADO
Programa de Doctorado en Matemática



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

“Pronóstico del caudal de la cuenca del Río Huaura mediante un sistema de inferencia difuso, basado en precipitaciones”

Tesis para optar el grado académico de
Doctor en Matemática

Autor:

Mg. Cipriano Bautista, Johnny Gregorio

Asesor:

Dr. Morales Marchena, Herón Juan
Código ORCID: 0000-0002-5394-0958
DNI. N° 32837715

Línea de Investigación
Modelado Matemático de Fenómenos Naturales,
Sociales y de Procesos Industriales

Nuevo Chimbote - PERÚ
2024



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

CERTIFICACIÓN DE ASESORAMIENTO DE TESIS

Yo, **Dr. Morales Marchena, Herón Juan**, mediante la presente certifico mi asesoramiento de la Tesis Doctoral titulada: **Pronóstico del caudal de la cuenca del Río Huaura mediante un sistema de inferencia difuso, basado en precipitaciones**, elaborada por el magister **Cipriano Bautista, Johnny Gregorio** para obtener el Grado Académico de **Doctor en MATEMÁTICA** en la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Santa.

Nuevo Chimbote, Junio del 2024

.....
Dr. Morales Marchena Herón Juan
ASESOR
CODIGO ORCID: 0000-0002-5394-0958
DNI N° 32837715



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

AVAL DEL JURADO EVALUADOR

Pronóstico del caudal de la cuenca del Río Huaura mediante un sistema de inferencia difuso, basado en precipitaciones.

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE DOCTOR EN MATEMÁTICA

Revisado y Aprobado por el Jurado Evaluador:

Dr. Teodoro Moore Flores
PRESIDENTE

CODIGO ORCID 0000-0002-1755-3459
DNI N° 32763522

Dr. Ernesto Antonio Cedrón León
SECRETARIO

CODIGO ORCID 0000-0002-3198-831X
DNI N° 32966495

Dr. Herón Juan Morales Marchena
VOCAL

CODIGO ORCID 0000-0002-5394-0958
DNI N° 32837715



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

A los tres días del mes de junio del año 2024, siendo las 11:30 horas, en el aula P-01 de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Santa, se reunieron los miembros del Jurado Evaluador, designados mediante Resolución Directoral N° 175-2024-EPG-UNS de fecha 10.04.2024, conformado por los docentes: Dr. Teodoro Moore Flores (Presidente), Dr. Ernesto Antonio Cedrón León (Secretario) y Dr. Herón Juan Morales Marchena (Vocal); con la finalidad de evaluar la tesis titulada "**PRONÓSTICO DEL CAUDAL DE LA CUENCA DEL RÍO HUAURA MEDIANTE UN SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSO, BASADO EN PRECIPITACIONES**"; presentado por el tesista Johnny Gregorio Cipriano Bautista, egresado del programa de **Doctorado en Matemática**.

Sustentación autorizada mediante Resolución Directoral N° 305-2024-EPG-UNS de fecha 30 de mayo de 2024.

El presidente del jurado autorizó el inicio del acto académico; producido y concluido el acto de sustentación de tesis, los miembros del jurado procedieron a la evaluación respectiva, haciendo una serie de preguntas y recomendaciones al tesista, quien dio respuestas a las interrogantes y observaciones.

El jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, declara la sustentación como APROBADO, asignándole la calificación de DIECINUEVE.

Siendo las 12:45 horas del mismo día se da por finalizado el acto académico, firmando la presente acta en señal de conformidad.

Dr. Teodoro Moore Flores
Presidente

Dr. Ernesto Antonio Cedrón León
Secretario

Dr. Herón Juan Morales Marchena
Vocal

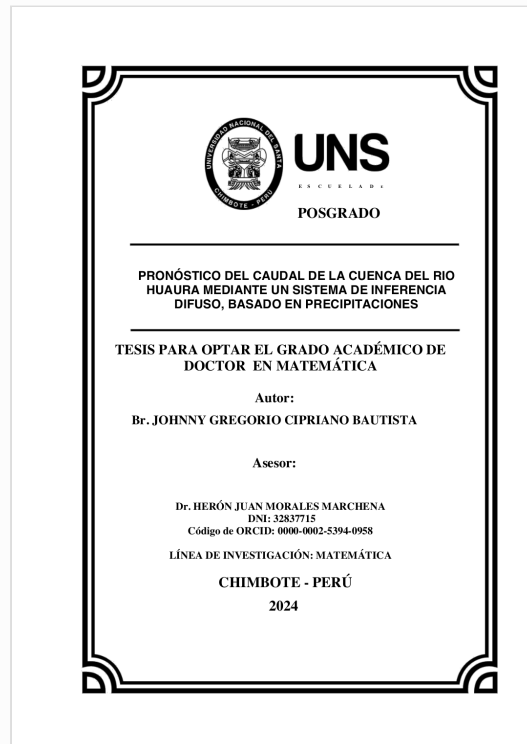


Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Heron Morales
Título del ejercicio: Tesis corregida Johnny
Título de la entrega: BORRADOR DE TESIS UNS JOHNNY GREGORIO CIPRIANO BA...
Nombre del archivo: BORRADOR_DE_TESIS_UNJ_OHNNY_GREGORIO_CIPRIANO_...
Tamaño del archivo: 7.14M
Total páginas: 80
Total de palabras: 15,190
Total de caracteres: 77,784
Fecha de entrega: 01-abr.-2024 06:25p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega... 2337306615



BORRADOR DE TESIS UNS JOHNNY GREGORIO CIPRIANO BAUTISTA 02.docx

INFORME DE ORIGINALIDAD

15%

INDICE DE SIMILITUD

13%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

9%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	piragua.corantioquia.gov.co Fuente de Internet	3%
2	vsip.info Fuente de Internet	2%
3	Submitted to Universidad Nacional del Santa Trabajo del estudiante	1%
4	Submitted to Universidad Ricardo Palma Trabajo del estudiante	1%
5	www.scribd.com Fuente de Internet	1%
6	dspace.esPOCH.edu.ec Fuente de Internet	1%
7	upo.es Fuente de Internet	1%
8	Submitted to Universidad Cooperativa de Colombia Trabajo del estudiante	1%

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis hijos y esposa por su apoyo incondicional. A mis padres por enseñarme a que en la vida los objetivos se logran con dedicación y esfuerzo. A mi jurado y asesor por la sugerencia y apoyo en la culminación de mi tesis.

Índice

Certificación del asesor	ii
Aval del Jurado evaluador	iii
Resumen	v
Abstract	vi
CAPÍTULO I	
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	
1.1. Planteamiento y fundamentación del problema de investigación	09
1.2. Antecedentes de la investigación	11
1.3. Formulación del problema de investigación	13
1.4. Delimitación del estudio	14
1.5. Justificación e importancia de la investigación	14
1.6. Objetivos de la investigación: General y específicos	14
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO	
2.1. Fundamentos teóricos de la investigación	15
2.2. Marco conceptual	51
CAPÍTULO III	
MARCO METODOLÓGICO	
3.1. Hipótesis central de la investigación	54
3.2. Variables e indicadores de la investigación	54
3.3. Métodos de la investigación	55
3.4. Diseño o esquema de la investigación	55
3.5. Población y muestra	56
3.6. Actividades del proceso investigativo	57
3.7. Técnicas e instrumentos de la investigación	57
3.8. Procedimiento para la recolección de datos	57
3.9. Técnicas de procesamiento y análisis de los datos	58
CAPÍTULO IV	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
4.1. Resultados	59
4.2. Discusiones	74

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones 76

5.2. Recomendaciones 76

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 77

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo: Pronosticar el caudal de la cuenca del río Huaura mediante un Sistema de Inferencia Difuso Basado en Precipitaciones. El Método de Investigación es Descriptivo – proposicional. El diseño de investigación es de tipo no experimental. La población en estudio estuvo constituido por todos los factores (Lluvia, llovizna, granizo y nieve) que pronostican el caudal de la cuenca del río Huaura. En las precipitaciones pluviales se han considerado cuatro variables de entrada: Lluvias (muy ligero, ligero, moderada baja, moderada media, moderada, fuerte y muy fuerte), Llovizna (muy ligeras, ligero, moderada baja, moderada media, moderada, fuerte y muy fuerte), granizo (pequeño, mediano A, mediano B, mediano, grande y muy grande) y nieve (ligera, moderada baja, moderada medio, moderada, fuerte y muy fuerte). En la variable de salida se consideró la descarga de agua (mínimo, medio y máximo). El número de reglas del sistema ha sido dado por todas las posibles combinaciones de calificadores en los antecedentes, dado que hay 4 variables de entrada con tres calificadores este número de combinaciones es 82 reglas lógicas. Para el análisis de datos se utilizó el sistema de inferencia difuso (fuzzy) procesado por el software matlab. Se utilizó la regla difusa de Mamdani: IF x_1 is A AND x_2 IS B AND x_3 IS C AND x_4 D THEN u_1 E. Analizando esta regla encontramos que si lluvia es muy ligera de 0.219mm/h, llovizna es muy ligero de 0.0296mm/h, el granizo es pequeño de 0.0mm y la nieve ligera es 0.0mm/h entonces al caudal es mínimo de 19.98m³/s y si la lluvia es muy fuerte de 10.00mm/h, llovizna es muy fuerte de 0.6mm/h, el granizo es muy grande de 60.00mm y la nieve es muy fuerte de 6.00mm/h entonces al caudal es máximo de 59.6m³/s.

Palabras clave: Pronostico del caudal, inferencia difusa, precipitaciones pluviales.

ABSTRACT

The objective of this research work is: To forecast the flow of the Huaura river basin by means of a fuzzy inference system based on rainfall. The research method is descriptive - propositional. The research design is non-experimental. The study population consisted of all the factors (rain, drizzle, hail and snow) that predict the flow of the Huaura river basin. Four input variables were considered for rainfall: rain (very light, light, moderate low, moderate medium, moderate medium, moderate, strong and very strong), drizzle (very light, light, moderate low, moderate medium, moderate, moderate, strong and very strong), hail (small, medium A, medium B, medium, large and very large) and snow (light, moderate low, moderate medium, moderate, moderate, strong and very strong). In the output variable, water discharge (minimum, medium and maximum) was considered. The number of rules of the system has been given by all possible combinations of qualifiers in the antecedents, since there are 4 input variables with three qualifiers this number of combinations is 82 logical rules. The fuzzy inference system (fuzzy) processed by matlab software was used for data analysis. Mamdani's fuzzy rule was used: IF x_1 is A AND x_2 IS B AND x_3 IS C AND x_4 D THEN u_1 E. Analyzing this rule we found that if rain is very light 0.219mm/h, drizzle is very light 0.0296mm/h, hail is small 0.0mm and light snow is 0.0mm/h then the minimum flow rate is 19.9.8m³/s and if rain is very heavy 10.00, drizzle is very heavy 0.6, hail is very large 60.00mm and snow is very heavy 6.00 then the maximum flow rate is 59.6 m³/s.

Key words: flow forecasting, fuzzy inference, rainfall precipitation

INTRODUCCIÓN

Es necesario plantearse cómo proteger los recursos hídricos, sobre todo porque es probable que la escasez de agua se convierta en una realidad con el paso del tiempo y el aumento de la contaminación. La falta de agua puede producirse tanto físicamente cuando no hay agua suficiente para abastecer a la población, como económicamente cuando los recursos hídricos no se gestionan bien.

El Perú la demanda total estimada del agua es de 49 717.97 hectómetro cubico por año de los que 26 080.71 hectómetro cubico por año equivale a un 52 por ciento corresponden a usos consuntivos y 23 637.26 hectómetro cubico por año equivale a un 48 por ciento a usos no consuntivos. La mayor cantidad de agua se destina a la agricultura en el sector de consumo y en el energético. La Autoridad Administrativa del Agua con mayor demanda de agua total es la Autoridad Administrativa del Agua Cañete Fortaleza con 9533.38 hectómetro cubico por año por el peso de la energética, seguida de Jequetepeque y Zarumilla con 9418.02 hectómetro cubico por año por el componente agrícola y Mantaro, con 7460.78 hectómetro cubico por año por la energética(ANA, 2013, p.91).

La lógica difusa o borrosa, es una lógica multivaluada y permite por medio de conjuntos de pertenencia una forma práctica de enfocar los problemas tal como se visualiza en el mundo real(Acosta, 2006, p.13), Su algoritmo permite modelizar situaciones de incertidumbre entre la verdad y la falsedad de sus proposiciones; y expresa el grado de pertenencia mediante un valor en un intervalo cerrado de 0 a 1 (Zadeh, L., 1965), combinando variables de entrada definidas en términos difusos por medio de reglas que producen uno o varios valores de salida (Martínez y Andrade, 2016, p. 152). Una función de membresía, permite asignar a cada elemento un valor real que indica en qué medida pertenece al conjunto en un intervalo de 0 y 1, el valor más grandes indica un mayor grado de pertenencia al conjunto; en cambio los valores pequeños indican una baja pertenencia. En casos extremos, un valor de 0 indica ningún cumplimiento, mientras que un valor de 1 indica cumplimiento total (Reyna, 2008).

Las inundaciones y la escasez de agua en el valle de Huaura Sayán están causando problemas que afectan a la población de Huaura y sus alrededores, debido a las pérdidas de cultivos y la escasez de agua. Esta investigación permitirá conocer el pronóstico de caudales de la cuenca del río Huaura para prevenir inundaciones en la cuenca y planificar la distribución de agua al sector agrícola y el abastecimiento a la población de zona. En conclusión este sistema de inferencia difuso nos ayuda a pronosticar el caudal del río Huaura.

CAPITULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento y fundamentación del problema de investigación

Objeto de la Investigación

El objeto de investigación es el caudal de la cuenca del río Huaura

Realidad genérica del problema

La falta del estado líquido es a consecuencia del cambio climático y el calentamiento global. Es necesario considerar la protección de este recurso, especialmente porque es probable que la escasez de agua se convierta en una realidad con el paso del tiempo y una contaminación grave.

La escases de este líquido elemento pueden ocurrir físicamente cuando no hay suficiente agua para abastecer a la población, y económicamente por una mala gestión de los recursos hídricos. En este trabajo de investigación buscamos conocer el caudal de río Huaura en diferentes estaciones.

La demanda de agua total estimada para todo el Perú es de 49 717.97 hectómetro cubico por año de los que 26 080.71 hectómetro cubico por año equivale a un 52 por ciento corresponden a usos consuntivos y 23 637.26 hectómetro cubico por año equivale a un 48 por ciento a usos no consuntivos. Los usos que mayor volumen de agua demandan son el agrícola en el consuntivo y el energético en el no consuntivo. La Autoridad Administrativa del Agua con mayor demanda de agua total es la Autoridad Administrativa del Agua Cañete Fortaleza con 9533.38 hectómetro cubico por año por el peso de la energética, seguida de Jequetepeque y Zarumilla con 9418.02 hectómetro cubico por año por el componente agrícola y Mantaro, con 7460.78 hectómetro cubico por año por la energética (ANA, 2013, p.91).

Como se observa, el mayor volumen de agua que demandan es para uso agrícola, es por ello que es necesario conocer el pronóstico el caudal por anticipado. Este pronóstico nos permitirá realizar actividades de planeación en los aspectos económicos.

Conocer las precipitaciones de cada zona es muy importante porque de ello depende el caudal, y según el Plan anual de recursos hídricos (2013),

mencionan que: “La precipitación total anual muestra incrementos marcados sobre la costa norte del país y la disminución en la selva norte desde 1960 hasta finales del siglo pasado. La sierra central y sur muestran variabilidad interanual similar, pero con tendencias opuestas”. Además es importante conocer el proceso de las precipitaciones, porque con ello podemos analizar el caudal y tener en cuenta que la precipitación se deposita en la superficie del suelo; Luego el agua se distribuye por la superficie terrestre en forma de escorrentía superficial o mediante infiltración. En el primer caso, la concentración de agua da lugar a la formación de una corriente canalizada que puede acumularse en arroyos, ríos y finalmente llegar al océano. En este último caso, el agua infiltrada se filtra por gravedad (infiltración) hasta llegar a un depósito subterráneo o regresar a la atmósfera (evaporación)(Villacorta, y otros, 2010, P.82).

Según los estudios realizados en el Plan Nacional de Recursos Hídricos en el Perú menciona que: “en la costa las variaciones para el año 2030 presentarían deficiencias del orden del 10 al 30% entre la libertad y Tacna, e incrementos de hasta un 20% en los departamentos de Tumbes y Piura”.

Características de la realidad específica

La cuenca del río Huaura se ubica en la región Lima. En ella encontramos la subcuenca del río Oyon, subcuenca del río Checras y subcuenca del río Chico.

El problema principal que se presenta en esta jurisdicción es que en época de avenida se presenta continuamente inundaciones a los terrenos de cultivos, y en la época de estiaje se tiene la escases de agua ocasionando daños a la agricultura, ya que a los agricultores se les hace difícil seguir cultivando sus productos. Es por ello que es necesario conocer el pronóstico el caudal.

“El río Huaura tiene una longitud de aproximadamente 158.3 kilómetros presentando una pendiente promedio de 3 por ciento, y la capacidad máxima de captación del valle se estima en 40,68 m³/s, el caudal medio mensual del río Huaura es de 25,3 m³/s, mientras que para el río Chico de 1,8 m³/s y algunas mas importantes son: Laguna Surasaca 21.7 millones de metros cúbicos útil, Laguna de Cochaquillo 25.7 millones metros cúbicos y Laguna Paton 5.7 millones metros cúbicos” (Musayón, 2013, p.18).

Además podemos mencionar que la cuenca del río Huaura, riega todo el valle de Huaura - Sayán y en ella encontramos que tiene un comportamiento estacional. Las variaciones estacionales en el régimen de drenaje están directamente relacionadas con el comportamiento de las precipitaciones que ocurren en la cuenca húmeda. Al analizar los hidrogramas de caudal diario para el período de

1911 a 1999, identificamos tres períodos: un período de inundación entre enero y abril; un período de estiaje entre junio y septiembre y un período de transición de estiaje entre septiembre y diciembre. También existe un período de transición entre mayo y junio, que corresponde al período o curva de agotamiento del río Huaura (Villacorta, 2010, p.36).

El problema del agua es constante en la provincia de Huaura, ya que en los meses de verano el caudal aumenta, ocasionando daños y perjuicios a la población y a los terrenos de cultivo. En los otros meses cuando el caudal disminuye, éstos también se ven afectados por la falta de agua. Es por ello que es necesario conocer el pronóstico del caudal para prevenir daños a la población.

1.2. Antecedentes de la investigación

Respecto a los antecedentes para este tema, existen investigaciones nacionales e internacionales; en las investigaciones nacionales tenemos los trabajos de campo que realiza la Autoridad Nacional del agua (ANA).

Investigaciones Internacionales

En cuanto al pronóstico de caudales utilizado la lógica difusa encontramos investigaciones realizadas en Colombia y México.

Niño, E. (2013), en su tesis “Pronostico de recursos hídricos, por medio de la lógica difusa”, planteo como objetivo general, utilizar un sistema de lógica difusa para el pronóstico de caudales de río y se utilizó el software UNFUZZY para la implantación del sistema de pronóstico. Concluye que para obtener predicciones más precisas en universos fijos con tablas de entrenamiento, es necesario que nuestras entradas y salidas se superpongan en sus conjuntos difusos.

Mason de la Fuente.(2023), en su investigación “Desarrollo de un modelo para la predicción de caudales y volúmenes de embalse en el trasvase Tajo-Segura empleando lógica difusa” propone el desarrollo de modelos matemáticos capaces de predecir los volúmenes mensuales desembalsados, tanto a la cuenca del Segura (a través del trasvase) como a la del Tajo. Estos modelos utilizan como datos de entrada parámetros que caracterizan la disponibilidad hídrica de la región, y se calibran y validan empleando las decisiones que han sido tomadas históricamente. La elaboración de estos modelos se ha realizado

mediante técnicas de lógica difusa, que no requieren, necesariamente, el conocimiento de valores numéricos concretos para su ejecución, sino que incorporan expresiones del lenguaje cotidiano como “muy bajo” o “muy alto”, facilitando en gran medida el entendimiento y manipulación por parte de los usuarios y operadores. Una vez definidos, estos modelos se emplearán para realizar predicciones de los caudales trasvasados y desembalsados hacia el Tajo, así como de volúmenes almacenados en los embalses de cabecera del Tajo mediante balance hídrico, comparándose sus resultados con los valores observados durante el período histórico, con el fin de establecer la fiabilidad de dichos sistemas y su potencial aplicación para la obtención de predicciones estacionales de caudales trasvasados, lo cual puede resultar de gran utilidad para la planificación de los productores de la región.

Zuñiga A. (2009) en su artículo “Pronóstico de Caudales Afluentes para la Planificación de la Operación de Sistemas Hidrotérmicos de Potencia aplicando el modelo ANFIS”. Este trabajo presenta la predicción de los caudales de entrada promedio mensuales para dos plantas hidroeléctricas en Ecuador (Daule – Peripa y Paute – Molino) utilizando uno de los modelos de redes neuro-difusas más populares llamado ANFIS (Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System). Se comparó el desempeño de ANFIS con el pronóstico obtenido aplicando un modelo de series de tiempo de promedio móvil autorregresivo periódico PARMA y con flujos reales para un período de 5 años (2009 – 2013) mediante la aplicación de las métricas de error utilizadas. A menudo se utiliza en predicciones utilizando técnicas de redes neurodifusas. Los resultados obtenidos con el modelo ANFIS fueron superiores en todas las métricas de error consideradas; Estos resultados son de gran importancia para el sector eléctrico, ya que una buena previsión de los caudales mensuales garantiza una planificación óptima del funcionamiento de las centrales hidroeléctricas.

Además, se presenta la aplicación de ambos modelos de predicción para evaluar su influencia en los modelos de planificación operativa de un sistema de pruebas hidrotermales.

Investigaciones nacionales

Entre las investigaciones nacionales tenemos los siguientes:

La Administración local de Agua Huaura (2010), realizó un estudio “Evaluación de recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Huaura. Planteo como objetivo general evaluar, cuantificar y simular el comportamiento de los recursos hídricos en la cuenca del río Huaura en términos de cantidad y posibilidades,

establecer el balance hídrico y servir de base para la planificación hidrológica. De esta forma, liderará y controlará las políticas de desarrollo en todos los sectores directa o indirectamente relacionados con el uso y explotación y, a su vez, mejorará la gestión de la gobernanza local del agua. Para generar la esorrentía superficial se utilizó el método WEAP "Soil Moisture Model", el cual representa cada subcuenca en dos capas. En la capa superior se simula la evapotranspiración teniendo en cuenta la precipitación, la cobertura vegetal y el uso del suelo. En la capa más baja se simulan los caudales base en los canales de los ríos y los cambios en la humedad del suelo. Se concluye que la climatología en la cuenca del río Huaura fue evaluada en función de variables meteorológicas; Temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, a nivel de la cuenca y subcuencas objeto de estudio, también se crearon las isolíneas anuales correspondientes.

Aguirre, M. (1998), en su estudio de "balance hídrico de la cuenca del río Huaura" planteo como objetivo general desarrollar un estudio del balance hídrico para el ordenamiento del uso de los recursos hídricos en la cuenca del río Huaura. Concluye que el balance hídrico con los cuales medios mensuales presenta un déficit en los meses de setiembre y octubre que corresponde a 4.11 millones metros cúbicos. En los meses restantes el balance es positivo, presentándose superávit importantes sobre todos los meses de enero abril.

Villacorta, S. (2010), realizó un estudio " Geoambiental de la Cuenca del río Huaura" planteó como objetivo general contribuir al desarrollo sostenible de la cuenca del río Huaura y mejorar las condiciones de vida de sus habitantes, brindando a las autoridades y a la población información básica y temática sobre su estado ambiental. Para ello se estudiaron los aspectos geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos, geoquímicos y geodinámicos, así como la influencia de las actividades humanas en la cuenca. Esta información fue procesada para crear mapas temáticos y un conjunto de propuestas para gestionar los problemas presentados. Además, se desarrollaron actividades de comunicación con las comunidades para crear una cultura de prevención de desastres y protección de los recursos hídricos subterráneos. Se concluye que el agua del río Huaura está compuesta generalmente de calcio sulfatado que contiene bicarbonato y que sólo el pH excede los límites de calidad del agua establecidos por la normativa peruana.

1.3. Formulación del problema de investigación.

En base a lo mencionado, nos planteamos la siguiente pregunta de investigación: ¿Es posible pronosticar el caudal de la cuenca del río Huaura mediante un sistema de inferencia difuso, basado en precipitaciones?

1.4. Delimitación del estudio

Para lograr los resultados mencionados en la investigación es necesario solicitar información a las entidades como el ALA Huaura y el ANA, en lo que compete al ámbito a la cuenca del río Huaura.

1.5. Justificación e importancia de la investigación

Dado la problemática que se presenta cada año en el valle de Huaura Sayán, con inundaciones y escasez del recurso hídrico que afectan a los agricultores en la pérdida de sus cultivos y la falta de agua a la población de Huaura y sus alrededores. Este trabajo de investigación se justifica porque el estudio permitirá conocer el pronóstico del caudal de la cuenca del río Huaura, para prevenir las inundaciones en la riveras del río, planificar la distribución de agua sector agrícola y abastecimiento de agua a la población del distrito de Huaura.

Es importante, porque permitirá conocer el comportamiento de las precipitaciones y así pronosticar el caudal de la cuenca del río Huaura para resolver problemas mencionados anteriormente.

1.6. Objetivos de la investigación.

Objetivo Generales

Pronosticar el caudal de la cuenca del río Huaura mediante un sistema de inferencia difuso basado en precipitaciones.

Objetivos específicos

- ✓ Sistematizar la información existente de las precipitaciones que modifican el caudal del río Huaura.
- ✓ Elaborar un sistema de inferencia difuso, para pronosticar el caudal de río Huaura basado en precipitaciones pluviales.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Fundamentos teóricos de la investigación

1. Fundamento de lógica difuso y sistema difuso

La lógica difusa: “es una lógica multivaluada y permite por medio de conjuntos de pertenencia una forma práctica de enfocar los problemas tal como se visualiza en el mundo real”. (Acosta, 2006, p.13).

Martínez y Andrade (2016) consideran que: “Los sistemas de control basados en lógica difusa combinan variables de entrada definidas en términos difusos por medio de reglas que producen uno o varios valores de salida” (Martínez y Andrade, 2016, p. 152).

2. Desarrollo Intuitivo de la Matemática Difusa.

Reina (2008) explica el desarrollo intuitivo como: “Un conjunto clásico se define como la división de personas en grupos, pero esta fraccionamiento está bien definida, es inequívoca, y puede ser suficientemente válida para algunos conceptos y conjuntos, como la pertenencia de un número a \mathbf{N} , o una letra específica al conjunto de vocales en el idioma español”. (p. 6).

Siendo de esta manera, una función de membresía para un conjunto clásico A se define como:

$$v_A = \begin{cases} 0 & \text{elemento} \notin A \\ 1 & \text{elemento} \in A \end{cases}$$

Sin embargo, muchos conceptos de clasificación tienen otra característica especial. Por ejemplo, el conjunto de personas altas o coches rápidos no tiene un umbral de clasificación claro, que se caracteriza más por imprecisiones, por lo que se puede tener en cuenta la transición gradual de la no pertenencia a la pertenencia total.

Reina (2008), menciona que: “Para definir un conjunto difuso es necesario especificar una función de membresía, o en algunos textos también llamada función de membresía, que permite asignar a cada elemento un valor real indicando en qué

medida pertenece al conjunto, generalmente en el intervalo unitario $[0, 1]$. Valores más grandes significan un mayor grado de adherencia al conjunto, mientras que valores pequeños significan un grado de adherencia bajo. En casos extremos, un valor de 0 indica ningún cumplimiento, mientras que un valor de 1 indica cumplimiento total. Normalmente, se utiliza una de las siguientes notaciones para referirse a esta función:

$$\begin{array}{l} \psi_A : X \rightarrow [0, 1] \\ A : X \rightarrow [0, 1] \end{array}$$

El símbolo A denota al conjunto como a la función de pertenencia. Se utilizó esta última notación, de la cual se puede comprobar que no genera ninguna ambigüedad.

El sistema difuso se ve como aproximaciones universales, es decir, sistemas que de alguna manera describen el comportamiento de sistemas complejos, generalmente no lineales. Esta condición del aproximador universal ha sido probada en varios trabajos [Kos94]. En ellos se encontró un isomorfismo entre el álgebra abstracta y lineal y la estructura de un sistema difuso. Este isomorfismo se basa esencialmente en que el desarrollo de sistemas difusos se basa en el teorema de aproximación de Stone-Weiers, que establece que toda función real continua cuyo dominio sea un intervalo compacto, es decir, cerrado y limitado, puede aproximarse uniformemente. ser representado por polinomios (p.7).

3. Fundamentación de la Matemática Difusa

Conjuntos Difusos y Lógica Difusa

Reina, D.(2008). Menciona que: El alfabeto utilizado en la lógica difusa es muy similar al de la lógica clásica. Por un lado, se necesitan proposiciones, conectivos y, en general, un lenguaje con el que puedan expresarse claramente. Por un lado, se demostrará más adelante que la lógica difusa puede verse en muchos sentidos como una extensión de la lógica tradicional. Como tal, toma algunos de sus elementos.

El sistema difusa se basa en una fundamentación axiomática equivalente a la teoría de probabilidades, con la cual comparte la mayoría de los axiomas. Este constructo requiere la definición de una retícula que consiste de los siguientes nodos:

1. X representa el universo del discurso.
2. T es un elemento máximo.
3. F es un elemento mínimo
4. \wedge la conjunción.

5. \vee la disyunción

La retícula se denota por $L(X, T, F, \wedge, \vee)$. donde las variables p, q, r denotan elementos de X dentro de la red.

A continuación presentamos las axiomas:

Axioma 01 (Idempotencia) si $p \in L$, se tiene que:

$$p \wedge p = p \vee p = p$$

Axioma 02 (Conmutativa) Para todo $p, q \in L$, se tiene que:

$$p \vee q = q \vee p$$

$$p \wedge q = q \wedge p$$

Axioma 03 (Asociativa) Para todo $p, q, r \in L$, se tiene que:

$$p \vee (q \vee r) = (p \vee q) \vee r$$

Axioma 04 (Absorción) Para todo $p, q \in L$, se tiene que:

$$p \vee (p \wedge q) = p$$

$$p \wedge (p \vee q) = p$$

Axioma 05 (Elemento Maximo y Minimo) si $p \in L$ se obtiene:

$$p \vee T = T \text{ y } p \wedge T = p$$

Axioma 06 (Relación de Orden) si $p, q \in L$ se tiene que:

$$p \leq q \text{ si existe } r \in L \text{ tal que } q = p \vee r$$

A cada elemento se le aplica la función de valuación, que indica su valor de verdad en el intervalo es de 0 a 1. La función de valuación se denota por:

$$p : L \rightarrow [0, 1]$$

y tiene en cuenta las siguientes condiciones:

Axioma 07 $p(F) = 0$ y $p(T) = 1$

Axioma 08 Para todo $p, q \in L$

$$\text{si } p \leq q \text{ entonces } P(p) \leq P(q)$$

Axioma 09 (Aditividad) Para todo $p, q \in L$,

$$P(p \wedge q) + P(p \vee q) = P(p) + P(q)$$

$$\text{donde } P(p \wedge q) \leq \min(P(p), P(q)) \leq \max(P(p), P(q)) \leq P(p \vee q)$$

Axioma 10 (Equivalencia) Para todo $p, q \in L$,

$$p \leftrightarrow q \text{ si } P(p \wedge q) = P(p \vee q)$$

Axioma 11 (Distancia) Para todo $p, q \in L$,

$$d(p, q) = P(p \vee q) - P(p \wedge q)$$

donde $d(p, q)$ cumple que $0 = d(p, p) \leq d(p, q) \leq 1$

Axioma 12 (Medida de Equivalencia) Para todo $p, q \in L$, se tiene:

$$P(p \leftrightarrow q) = 1 - d(p, q) = 1 - P(p \vee q) + P(p \wedge q)$$

Axioma 13 (Medida de la Fuerza de la Implicación.) Para todo $p, q \in L$, se tiene:

$$\begin{aligned} P(p \rightarrow q) &= P(p \leftrightarrow q \wedge q) \\ &= 1 - d(p, p \wedge q) \\ &= 1 - P(p) - P(p \wedge q) \\ &= 1 + P(q) - P(p \vee q) \\ &= 1 - d(p, p \vee q) \end{aligned}$$

Axioma 14 (Negación) Para todo $p \in L$, se cumple

$$P(\bar{p}) = P(p \leftrightarrow F) = 1 - P(p) = 1 - d(p, F)$$

Axioma 15 (Distributividad) Para todo $p, q, r \in L$, se tiene que

$$p \wedge (q \vee r) = (p \wedge q) \vee (p \wedge r)$$

Axioma 16 (Implicación Estricta) Para todo $p, q \in L$, se tiene que

$$\{P(p \rightarrow q) = 1 \vee P(q \rightarrow p) = 1\}$$

La versión debilitada del axioma es tomada usualmente por la lógica difusa:

$$P((p \rightarrow q) \vee P(q \rightarrow p)) = 1$$

La Función de Pertenecia

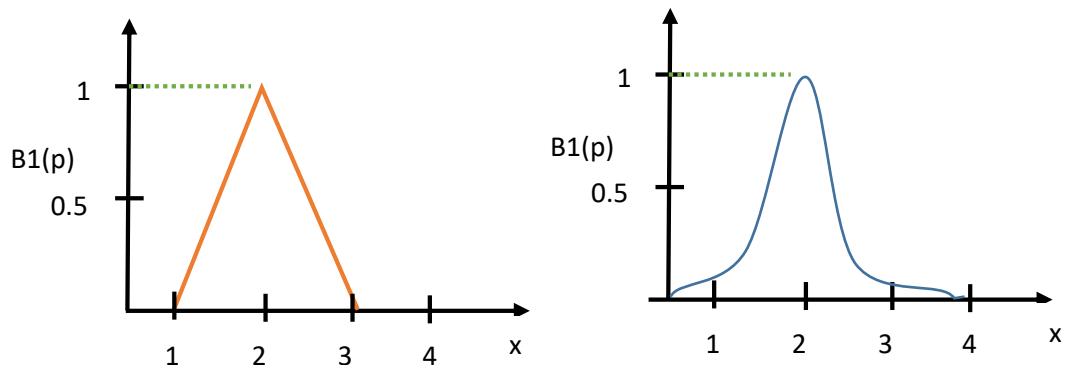
Además Reina (2008) define a la pertenencia como: “La función de membresía representa toda la información contenida en un conjunto difuso. Como se mencionó en la Sección 1.1, se espera que esta función sea continua, cerrada, acotada y que tenga algunas propiedades que la hacen interesante”(p.13).

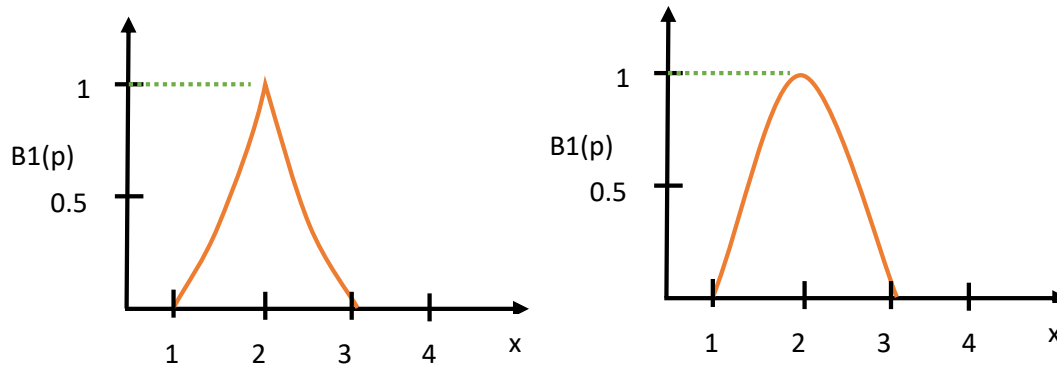
Definición 2.1

Sea un conjunto difuso B, la función de pertenencia se cumple con las siguientes propiedades:

- Normalidad: existe $p \in B$ tal que $B(p) = 1$. Se tiene que $B(p) < 1$ para todo $p \in B$, al conjunto difuso se le llama subnormal.
- Monotonía: si p_1 es más próximo a p que el valor p_2 , entonces $B(p_1) > B(p_2)$.
- Simetría: Si p_1 y p_2 son equidistantes de p , entonces $B(p_1) = B(p_2)$

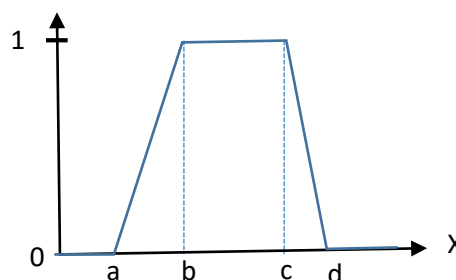
Las funciones de pertenencia es de uso frecuente, el cual cumple con las propiedades que se consideran en la figura.





Galindo, J. (2002). Define: Función Trapezoide. Definida por sus límites inferior a y superior d, y los límites de su soporte, b y c, inferior y superior respectivamente.

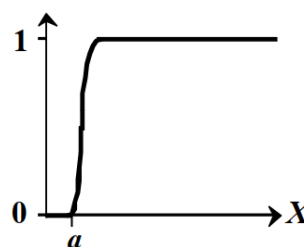
$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \text{ o } x \geq d \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{si } x \in [a, b] \\ 1 & \text{si } x \in [b, c] \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{si } x \in [c, d] \end{cases}$$



Función Γ (**gamma**): Definida por su límite inferior **a** y el valor $k > 0$.

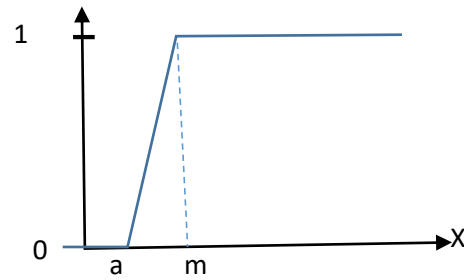
$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ 1 - e^{-k(x-a)^2} & \text{si } x > a \end{cases}$$

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ \frac{k(x-a)^2}{1+k(x-a)^2} & \text{si } x > a \end{cases}$$



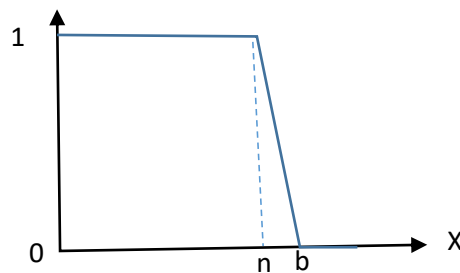
Esta curva se identifica por el rápido crecimiento de a. Cuanto mayor sea el valor de K, más rápido será el crecimiento. La primera definición tiene un crecimiento más rápido. Nunca toman el valor 1, aunque tienen una asíntota horizontal en 1.

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{si } x \in (a, m) \\ 1 & \text{si } x \geq m \end{cases}$$



Función L: puede describirse como el inverso de la función Gamma:

$$B(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \geq b \\ \frac{b-x}{b-n} & \text{si } x \in (n, b) \\ 1 & \text{si } x \leq n \end{cases}$$



Operaciones Difusas

La función de membresía es el componente fundamental de un conjunto difuso. Por lo tanto, las operaciones en dichos conjuntos están definidas por esta función. Primero veremos las operaciones elementales similares a las realizadas en conjuntos comunes. (Zadeh, 1965).

Se dice que el conjunto A es un subconjunto difuso de B, es decir, $A \subseteq B$, si $\forall x \in U$; $m_A(x) \leq m_B(x)$

y si existe, al menos, un punto $x \in U$ tal que $m_A(x) < m_B(x)$, entonces escribiremos que $A \subset B$.

Intersección (min- intersección):

La **intersección** de dos conjuntos difusos, A y B, viene dada, punto a punto, por:

$$m_{A \cap B}(x) = \min \{m_A(x), m_B(x)\}$$

Unión (max - unión):

La unión de dos conjuntos difusos, A y B, viene dada, punto a punto, por:

$$m_{A \cup B}(x) = \max \{m_A(x), m_B(x)\}$$

Complementación:

El complemento, A^c , de un conjunto difuso A, viene dado, punto a punto, por:

$$m_{A^c}(x) = 1 - m_A(x)$$

Otras operaciones.

La unión mínima y máxima no son las únicas posibilidades para ampliar las operaciones clásicas de conjuntos. Se han propuesto muchos otros operadores, ya sea por su generalidad o adaptabilidad, o porque están justificados por motivos empíricos o axiomáticos. Veamos algunas de estas operaciones y operadores que pueden resultarnos útiles más adelante.

Producto cartesiano: Sean A_1, A_2, \dots, A_n conjuntos difusos en X_1, X_2, \dots, X_n . El producto cartesiano es un conjunto difuso en el espacio producto $A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$, cuya función de pertenencia es:

$$m_{A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n}(x) = \min_i \{m_{A_i}(x_i) \mid x = (x_1, x_2, \dots, x_n), x_i \in X_i\}$$

Potencia de orden m: La potencia de orden m de un conjunto difuso A es un conjunto difuso cuya función de pertenencia es:

$$m_{A^m}(x) = [m_A(x)]^m, \quad x \in X$$

Suma algebraica: La suma algebraica o suma probabilística, $C = A + B$, se define como:

$$C = \{(x, m_{A+B}(x)) \mid x \in X\}$$

donde,

$$m_{A+B}(x) = m_A(x) + m_B(x) - m_A(x) \cdot m_B(x)$$

Suma limitada: La suma limitada, $C = A \oplus B$, se define como:

$$C = \{(x, m_{A \oplus B}(x)) \mid x \in X\}$$

donde,

$$m_{A \oplus B}(x) = \min\{1, m_A(x) + m_B(x)\}$$

Diferencia limitada: La diferencia limitada, $C = A \ominus B$, se define como:

$$C = \{(x, m_{A \ominus B}(x)) \mid x \in X\}$$

donde,

$$m_{A \ominus B}(x) = \max\{0, m_A(x) + m_B(x) - 1\}$$

Producto algebraico: El producto algebraico, $C = A \cdot B$, se define como:

$$C = \{(x, m_{A \cdot B}(x)) \mid x \in X\}$$

donde,

$$m_{A.B}(x) = m_A(x) \cdot m_B(x)$$

4. Precipitación.

A. Definición

García R. (2014) afirma que: La precipitación es la cantidad de agua que cae sobre la superficie de la tierra, que se forma a partir de la humedad atmosférica ya sea en forma líquida (llovizna y lluvia) o sólida (escarcha, nieve, granizo). La precipitación es uno de los procesos meteorológicos más importantes en hidrología y, junto con la evaporación, es la forma en que la atmósfera interactúa con el agua superficial en el ciclo hidrológico del agua.

La evaporación desde la superficie del océano es la principal fuente de humedad para la precipitación. Aproximadamente el 90% de las precipitaciones caen en el continente. Sin embargo, la mayor parte de la precipitación no cae necesariamente sobre los océanos, ya que la circulación atmosférica transporta la humedad a grandes distancias, como se observa en algunas islas deshabitadas. La ubicación de una región en relación con la circulación atmosférica, su latitud y la distancia a la fuente de humedad determinan en gran medida su clima..

B. Formación de la Precipitación

Las precipitaciones se producen debido a la humedad, pero la presencia de humedad no garantiza que se produzcan precipitaciones. La precipitación requiere algún mecanismo para enfriar el aire hasta un estado en el que se sature o se aproxime a la saturación.

Cuando el vapor de agua asciende, se enfría y el agua se condensa pasando del estado de vapor al estado líquido, formando niebla, nubes o cristales de hielo. Para que se produzca esta formación, suele ser necesario que existan núcleos de condensación a los que puedan unirse las moléculas de agua. Existen varias partículas que pueden actuar como núcleos de condensación, cuyo tamaño oscila entre 0,1 (aerosoles) y 10 μm de diámetro; entre ellas se encuentran algunos productos de combustión como los óxidos de nitrógeno y azufre, las partículas de sal que se producen por la evaporación de la espuma del mar y algunas partículas de polvo suspendidas en el aire.

Las gotas de agua pueden existir en las nubes a temperaturas bajo cero de hasta -40°C , y sólo en presencia de tales gotas sobre enfriadas se activa el núcleo helado natural.

Las gotitas o cristales de hielo crecen rápidamente debido a la nucleación, pero su crecimiento posterior es lento. Aunque las partículas que forman las nubes tienden a sedimentarse, los elementos intermedios pesan tan poco que sólo se requiere un ligero movimiento ascendente del aire para sostenerlas.

Las gotas de agua caen constantemente de las nubes, pero su velocidad de caída es tan lenta que no llegan al suelo porque a menudo se evaporan antes de alcanzarlo y vuelven a elevarse en forma de vapor. Cuando la cantidad de vapor aumenta o la velocidad de caída supera los 3 m/s, las gotas de agua aumentan su peso y provocan lluvia (Figura 2.1); al aumentar este peso, también aumenta la velocidad de caída, lo que da lugar a una lluvia más intensa que puede convertirse en tormenta.



Figura 2.1 Esquema representativo del mecanismo de formación de precipitación.

Los principales factores que provocan precipitaciones significativas son la colisión y la fusión de las partículas de las nubes y la precipitación. La colisión de las partículas de nubes y precipitación se produce debido a las diferentes velocidades de caída debidas a las diferencias de tamaño (las partículas más pesadas caen más rápido que las más pequeñas, que son elevadas por las corrientes ascendentes y se evaporan parcialmente). Las partículas que colisionan se combinan para formar partículas más grandes y este proceso puede repetirse varias veces hasta que las gotas son lo suficientemente grandes como para caer.

Las fuertes corrientes ascendentes de aire impiden que caigan inclusive las gotas de agua más grandes y transportan todos los componentes de la precipitación a las partes superiores de las nubes, donde se acumula una acumulación de agua líquida que supera con creces la cantidad de partículas de nubes ordinarias. Al final, la precipitación del agua acumulada se produce por debilitamiento de la corriente ascendente o, como suele ocurrir, por una corriente descendente, posiblemente provocada por la masa de agua acumulada.

Cuando cae repentinamente en una corriente descendente, las gotas de lluvia son grandes y el aguacero resultante dura sólo unos minutos. Una tormenta eléctrica puede producir múltiples chubascos o múltiples explosiones celulares, y la precipitación total puede ser el doble que la de un aguacero.

En grandes cúmulos donde no hay precipitaciones, la concentración máxima de agua líquida puede ser de alrededor de 4 g/m³, pero el valor medio de las nubes puede ser sólo la mitad de este valor. En concentraciones más altas, se produce precipitación que llega al suelo..

C. Clasificación de la precipitación

- **Características físicas**

La precipitación toma diferentes formas como producto de la condensación del vapor de agua atmosférico que se forma en el exterior o sobre la superficie terrestre y debido a las condiciones locales. Los más comunes son los que se enumeran:

Llovizna

(García Ruesta, 2012). En otros lugares es mejor conocido como Garúa, consiste en pequeñas gotas de agua líquida cuyo diámetro varía entre 0,1 y 0,5 mm; debido a su pequeño tamaño, se asientan lentamente y a veces parecen flotar en el aire. La llovizna generalmente cae desde capas más profundas y rara vez excede 1 mm/h.

Tabla 1

Clasificación de la llovizna según su intensidad

Intensidad	mm/h
Ligeras	Menor de 0,1
Moderada	0,1 a 0.5
Fuerte	Mayor que 0.5

Lluvia

(García Ruesta, 2012). Es la forma de lluvia más conocida. Consiste en gotas de agua líquida que suelen tener un diámetro superior a 5 mm. En algunos países, la lluvia se clasifica según su intensidad en ligera, moderada o fuerte.

Tabla 2

Clasificación de la lluvia según su intensidad.

Intensidad (mm/h)	Observaciones
	Las gotas se distinguen fácilmente unas de otras.
Ligera < 2.5	Se pueden distinguir unas de otras. Sobre una superficie seca y abierta, se humedecen completamente al cabo de más de 2 minutos.
Moderada 2.5-7.5	Las gotas individuales no son reconocibles y los charcos se forman rápidamente. Las salpicaduras de precipitación pueden observarse a distintas alturas sobre el suelo.
Fuerte > 7.5	La visibilidad disminuyó y las gotas de agua que se esparcían por el suelo aumentaron varios centímetros.

Escarcha

(García Ruesta, 2012). Se trata de un almacén opaco de gránulos de hielo blanco, formado por la rápida congelación de gotas de agua sobreenfriadas en objetos expuestos, por lo que suele indicar la dirección del viento dominante. El peso específico puede ser de hasta 0,2 o 0,3.

Nieve

(García Ruesta, 2012). Está formada por cristales de hielo hexagonales o ramificados (Fig. 2.3), que a menudo se unen para formar cristales de nieve de varios centímetros de diámetro. Se produce cuando las masas de aire saturadas de vapor de agua se encuentran con masas de aire por debajo de 0°C. La densidad relativa de la nieve recién caída varía considerablemente, pero se estima en una media de 1,0.

Los criterios para determinar la intensidad de la nieve se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 3

Clasificación de la nieve según su intensidad

Intensidad	mm/h
Ligera	Menor de 1.0
Moderada	De 1.0 a 5.0
Fuerte	Mayor que 5.0

Granizo

(García Ruesta, 2012). Es una precipitación en forma de bolas de hielo producida por nubes convectivas. El granizo está formado por partículas de hielo que “captan” las gotas de agua a medida que avanzan a través de la nube. Las gotas se depositan alrededor de las partículas de hielo, se congelan y forman capas similares a una cebolla. El granizo puede tener forma esférica, cónica o irregular, su tamaño varía entre 5 y 125 mm de diámetro y puede destruir cultivos.

Tabla 4

Clasificación de la granizo según su intensidad

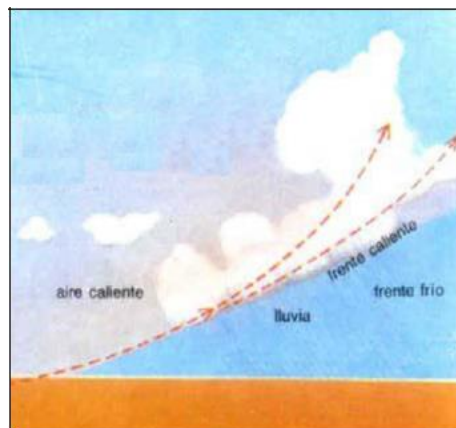
Intensidad	mm
Granizo pequeño(GS)	Menor de 5
Granizo mediano (GR)	De 5 a 50
Granizo grande	Mayor que 50

- **De acuerdo al mecanismo de formación**

(García Ruesta, 2012). Las precipitaciones pueden clasificarse en función de sus principales desencadenantes, ya que suelen estar provocadas por varios factores cuando se elevan las masas de aire que las producen. En consecuencia, las precipitaciones pueden dividirse en tres tipos:

Precipitación Ciclónica

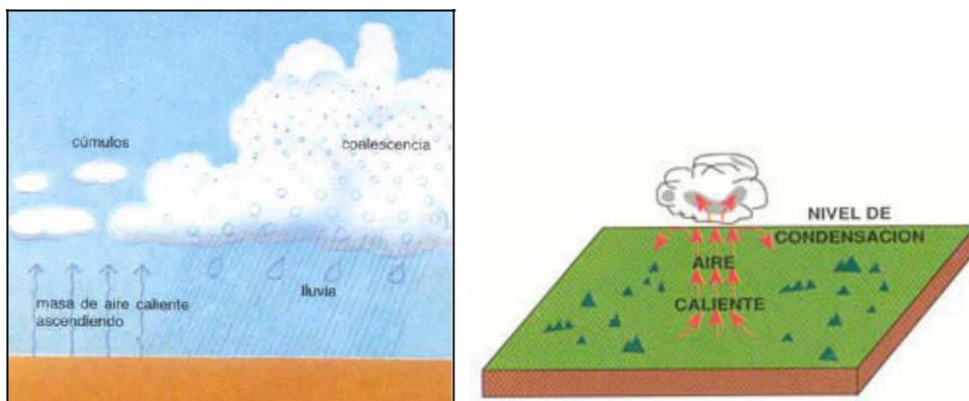
Es el resultado de la convergencia de aire que se eleva desde una zona de bajas presiones o ciclónica. Cuando dos masas de aire, cálido y frío, se encuentran sin mezclarse, se forma entre ambas una zona discontinua denominada frente. El aire frío, más pesado, se expande bajo el aire cálido, provocando el ascenso de éste y la condensación del vapor de agua, que puede producir precipitaciones. El borde del aire cálido que avanza hacia el aire frío es un frente cálido, que tiene una pendiente baja de entre 1/100 y 1/300, y el aire cálido fluye lentamente hacia arriba sobre el aire frío. El área de lluvia asociada a estos frentes puede ser muy extensa, y las precipitaciones suelen ser de ligeras a moderadas y casi continuas hasta que pasa el frente. Cuando el aire frío avanza hacia el aire cálido, el borde de la masa de aire frío se convierte en un frente frío de pendiente casi vertical, que empuja el aire cálido hacia arriba más rápidamente que un frente cálido..



Precipitación Convectiva

Este tipo de precipitación se produce principalmente en las zonas costeras de la provincia de Piura debido a la acción del anticiclón Atlántico Norte-Sur. Se produce cuando una gran cantidad de aire caliente tiende a ascender, debido a que el aire caliente es más ligero en peso que el aire de la atmósfera circundante. La diferencia de temperatura puede deberse a una diferencia de calentamiento en la superficie, a una diferencia de enfriamiento en la parte superior de la capa de aire o a una sustentación mecánica, ya que el aire es empujado por masas de aire más densas (ciclones) o por barreras montañosas. A medida que la masa de aire asciende, el aire se enfría y el punto de precipitación desciende. Esto hace que parte del vapor de agua se condense en la masa de aire y forme nubes. Durante la precipitación, estas nubes dejan caer la lluvia al aumentar el calor latente. Un ejemplo claro de este tipo de precipitación son las tormentas vespertinas que se producen en días calurosos con aire húmedo, en las que la precipitación procede de nubes en forma de yunque. La precipitación convectiva es puntual y puede variar en intensidad entre lluvia ligera y aguaceros

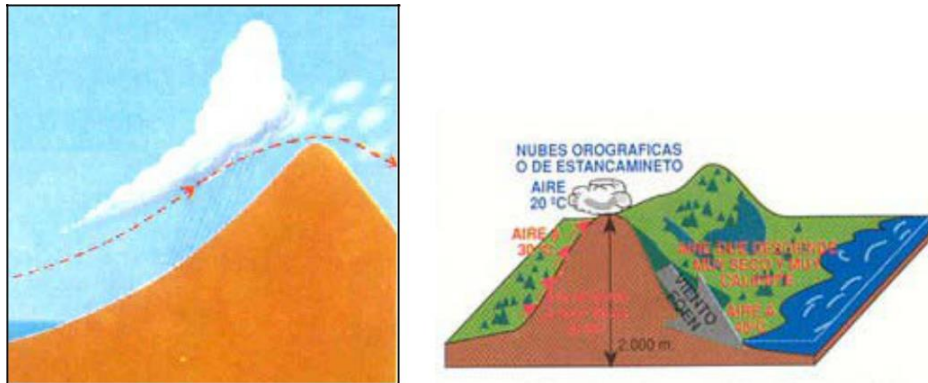
Traducción realizada con la versión gratuita del traductor DeepL.com.



Precipitación Orográfica

La causa es el choque entre las corrientes de aire oceánico que atraviesan la tierra y las barreras montañosas que elevan mecánicamente el aire y luego lo enfrían por debajo de la temperatura de saturación, liberando humedad; este tipo de precipitaciones es común en las regiones montañosas del departamento de Piura, por ejemplo. En las zonas accidentadas, la influencia orográfica es tan pronunciada que los patrones de precipitación durante las tormentas eléctricas tienden a

parecerse a los de la precipitación media anual. La mayor parte de la precipitación orográfica se deposita en las laderas orientadas hacia el viento..



En la naturaleza, los efectos de estos distintos tipos de enfriamiento del aire suelen estar interrelacionados, por lo que la precipitación no puede definirse estrictamente como perteneciente a uno de estos tipos de precipitación, sino más bien como una interacción entre ellos

D. PLUVIOMETRÍA

(García Ruesta, 2012). A efectos prácticos, es importante medir la cantidad de precipitación que llega a la superficie del suelo utilizando una regla graduada en milímetros, es decir, la altura a la que el agua habría llegado a la superficie del suelo si no se hubiera empapado o escurrido. En América Latina, las precipitaciones se miden en milímetros y décimas, mientras que en Estados Unidos se miden en pulgadas y centésimas..

En Perú, las precipitaciones son registradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) a través de una red de estaciones meteorológicas ubicadas en todo el territorio peruano. Además, se han instalado varias estaciones meteorológicas en el norte del país, en las cuencas de los ríos Piura y Chira, que son operadas por el Sistema de Alerta Temprana (SIAT).

El clima de Piura es seco en las zonas costeras y templado en la sierra, por lo que la lluvia es la principal forma de precipitación, aunque en otras zonas las precipitaciones pueden ser casi exclusivamente de nieve o rocío en las zonas más secas.

I. Instrumentos de medición

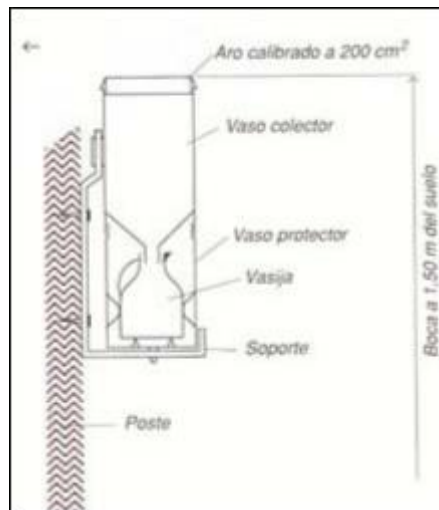
Se han desarrollado diversas herramientas para obtener información sobre las precipitaciones. La información obtenida puede ser de varios tipos: la distribución del tamaño de las gotas de lluvia, la hora de inicio y fin de la precipitación, y la cantidad e intensidad de la precipitación, siendo esta última la de mayor interés a la hora de determinar las tormentas de diseño. Existen básicamente dos tipos de pluviómetros que registran la cantidad y la intensidad de las precipitaciones:

✓ **Medidores sin registro o pluviómetros**

Cualquier recipiente abierto con paredes verticales es adecuado para medir la precipitación, pero debido a la variabilidad del viento y a los efectos de las salpicaduras, las mediciones no son comparables a menos que los recipientes tengan el mismo tamaño, forma y exposición similares. Por este motivo, existen normas establecidas para los contadores normalizados, su instalación y funcionamiento.

Nivel promedio del Servicio Meteorológico Nacional del Estado lo une a un colector de 20,3 cm de diámetro. La lluvia pasa desde el colector dentro de un tubo cilíndrico médico hasta el interior de un jarrón para el picor. El tubo se encuentra médicamente en una sección transversal igual a una décima parte del colector, quedando 0,1 mm de precipitación en el tubo a una altura de 1 mm. Como varía según la calificación médica, la prueba se puede medir con una precisión de 0,1 mm. Este tipo de medida se utiliza generalmente en la medición de precipitación.

Otro tipo de aparatos no registradores son los contadores de almacenamiento, que se utilizan para medir las precipitaciones durante un periodo de tiempo completo, por ejemplo un mes o una temporada, por lo que deben estar equipados con un mayor volumen de almacenamiento. Estos están ubicados en lugares remotos y de difícil acceso, donde los levantamientos diarios son una tarea muy complicada.



✓ Medidores con registro o pluviógrafos

Se trata de dispositivos que registran de forma automática y continua las precipitaciones en intervalos de hasta una semana. Estos medidores son más caros y más propensos a errores, pero pueden ser la única solución para algunas áreas remotas y de difícil acceso. Estos medidores tienen una gran ventaja al mostrar la intensidad de la precipitación, que es un factor importante en muchos problemas..

Comúnmente se utilizan tres tipos de contadores de registro: el contador de cubo basculante, el contador de equilibrio y el contador de flotación..

En el primer caso, el agua se recoge mediante un recipiente colector que está conectado a un embudo que dirige el agua a un cubo de dos cámaras. 0,1 mm de lluvia hacen que el cubo pierda el equilibrio, provocando que se vuelque, vaciando su contenido en un recipiente y desplazando el segundo compartimento hasta el lugar debajo del embudo. Cuando se inclina el cubo, se activa un circuito y el dispositivo registrador mide la intensidad de la lluvia..

Los comparadores pesan la lluvia que cae en un cubo en la plataforma de un controlador equilibrado o con resorte. El aumento de peso del cubo y su contenido se registra gráficamente..

El medidor de flotador tiene un compartimento que alberga un flotador que se eleva verticalmente cuando se acumula la lluvia. Este contador está equipado con un sifón que libera de vez en cuando el agua almacenada. Estos pluviómetros funcionan porque tienen un tambor de papel que gira bajo la acción de una máquina de relojería,

en el que una pluma registra en un sentido y en el otro el movimiento de inclinación, la fluctuación del peso o los cambios de flotación..



En la década de 1980, se llevaron a cabo investigaciones sobre los efectos de la comparación con pluviómetros y se concluyó que se podrían obtener resultados más precisos si el borde del pluviómetro se colocara en el suelo en lugar de al nivel del suelo. Esto requiere una instalación especial en superficie, donde se hace un agujero para acomodar el medidor y se cubre con un protector contra salpicaduras. Por tanto, la instalación y mantenimiento de los contadores de suelo son más caros y no se utilizan..

II. Redes de medición

Al intentar establecer las redes de estaciones de medición de la precipitación, nos preguntamos a menudo cuántos pluviómetros se necesitan para proporcionar la estimación más aproximada de la precipitación. En conclusión, cabe mencionar que

para establecer la densidad de la red de trabajo se deben tener en cuenta los siguientes factores:

- El uso previsto de la información, ya que una red de estaciones respectivamente espaciadas podría ser suficiente para estudiar grandes tormentas generales o para determinar promedios anuales en grandes áreas planas, mientras que determinar los patrones de lluvia durante las tormentas requiere una red muy densa.
- El tipo de precipitación en la zona influye en la densidad de la red, pues si la precipitación es de origen frontal, la red puede ser menos densa en comparación con la de tipo convectivo, que generalmente es más puntual.
- Efectos orográficos que producen sesgos de precipitación mayores que los que pueden ocurrir en zonas planas y por lo tanto requieren de una red mucho más densa para ser evaluados adecuadamente.

La posibilidad de que un dispositivo de medición detecte el centro de una tormenta varía con la densidad de la red de estaciones. Para producir una imagen representativa de la distribución de la precipitación en el área, se debe planificar una cuadrícula. Por otro lado, existen consideraciones importantes relacionadas con los costos de instalación y mantenimiento de la red, así como la accesibilidad del sitio donde se ubica el medidor para el observador.

La Organización Meteorológica Mundial ha recomendado las siguientes densidades mínimas de red de precipitación para fines hidrometeorológicos generales:

- Para territorios planas en zonas templadas, mediterráneas y tropicales, 600 a 900 Km² por estación.
- Para tierras montañosas en zonas templadas, mediterráneas y tropicales, 100 a 250 Km² por estación.
- Para pequeñas islas rocosas con precipitación irregular, 25 Km² por estación.
- Para zonas áridas y polares, 1 500 a 10 000 Km² por estación.

III. Precisión en su estimación

La información sobre la diferencia entre la precipitación registrada y la real es de interés climatológico y la precisión de su medición y evaluación es crucial para el análisis de las tormentas que ocurren en un área determinada.

Al medir la precipitación se producen dos tipos de errores, cuya evaluación es muy importante para obtener valores representativos para la zona de estudio. Estos errores se pueden dividir en dos grupos, a saber:

✓ **Error en la medida puntual**

La acción del viento altera la trayectoria de las gotas de lluvia, lo que hace que los valores registrados en los pluviómetros sean relativamente menores, por lo que la precipitación medida específicamente con pluviómetros es inferior a la precipitación real.

Para estimar el error al medir la precipitación local, se debe tener en cuenta esto:

- Algunos sitios se toman valores 100% representativos.
- No se deben tomar medidas si tenemos dudas sobre la precisión.
- El conjunto de precipitación es considerablemente grande en comparación con la muestra obtenida del instrumento.

✓ **Error en la evaluación espacial**

Los errores de muestreo relacionados con la elevación aumentan al aumentar la precipitación promedio del área y disminuyen al aumentar la densidad de la red, la duración de la precipitación y el tamaño del área. Por lo tanto, cada red tendería a producir errores medios más pequeños para las precipitaciones mensuales que para las tormentas.

Por otro lado, los errores medios tienden a ser mayores que para la precipitación invernal porque la precipitación estival tiene una gran variación espacial.

La base para evaluar la precipitación en una zona son las mediciones específicas registradas en los distintos instrumentos de la red..

E. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL

Las precipitaciones no son uniformes, ya que varían espacial y temporalmente dependiendo del esquema general de circulación atmosférica y de factores locales específicos de la región. En general, se puede decir que las mayores precipitaciones se producen cerca del ecuador y tienden a disminuir a medida que aumenta la latitud.

Uno de estos factores locales puede ser las barreras orográficas, que a menudo tienen una mayor influencia en el clima de una región que la proximidad de una fuente de humedad. Estos factores climáticos y geográficos determinan el nivel de humedad de una región, la frecuencia y el tipo de tormentas que se producen sobre ella y, por tanto, las precipitaciones.

Un caso especial a analizar es el fenómeno de El Niño, que afecta grandes áreas continentales de Asia, Oceanía, Europa y América, en particular la costa norte del Perú, incluidos los departamentos de Piura y Tumbes, así como la costa ecuatoriana. Esta anomalía se debe fundamentalmente a causas meteorológicas, como el debilitamiento del anticiclón del Pacífico Sur, que provoca el flujo de agua cálida de norte a sur hacia la zona normalmente cubierta por agua fría, y el desplazamiento de la zona de convergencia hacia el sur. Intertropicales. formado por los vientos alisios del sureste y los que soplan del noreste; Si a todo esto le sumamos actividad convectiva, tendremos condiciones de lluvias torrenciales en todas las zonas directamente afectadas.

En Perú, la intensidad de las precipitaciones tiende a ser mayor en las montañas del norte (partes más altas de Piura), las selvas del norte y el Amazonas, y disminuye a medida que llega a la costa en condiciones normales, no relacionadas con El Niño.

Respecto a las fluctuaciones en el tiempo, podemos mencionar que si bien algunos registros de precipitación en ocasiones dan la impresión de que la tendencia en los patrones de precipitación va aumentando o disminuyendo, lo cierto es que tienden a regresar al mismo nivel. promedio, ya que los períodos excepcionalmente húmedos tienden a equilibrar los períodos secos. Por otro lado, suele haber periodos estacionales a lo largo del año en los que llueve más; En el caso de Piura se puede observar que las lluvias ocurren más en los meses de verano..

Las variaciones en las precipitaciones dentro de una tormenta son grandes y dependen de varios factores, como la fuerza, la duración y el tipo de tormenta, por lo que no se puede aplicar un patrón único a todos los casos..

F. PRECIPITACIÓN PROMEDIO SOBRE UN ÁREA

Para valorar la cantidad promedio de precipitación en una zona en un intervalo de tiempo determinado, es necesario basarse en los valores específicos registrados en cada dispositivo de medición que compone la red. Sin embargo, dado que se

desconoce la contribución de cada instrumento a la tormenta global, han surgido varios métodos que intentan darnos una aproximación de la distribución de la precipitación dentro del área considerada. tenemos:

- **Método de la media aritmética**

Es una manera fácil de determinar la precipitación promedio en un área. Consiste en encontrar la media aritmética de las cantidades conocidas para todos los puntos del área (Figura 2.9). Este método da buenos resultados si la distribución de dichos puntos en el área es uniforme y la fluctuación de las cantidades de los contadores individuales no es demasiado grande..

- **Método de Thiessen**

Se utiliza cuando la distribución de pluviómetros en la zona considerada no es uniforme. Para el cálculo se define el área de influencia de cada estación trazando líneas entre estaciones cercanas. Estas líneas están cortadas por perpendiculares y se supone que toda el área delimitada por los límites de la estación formada por la intersección de estas perpendiculares ya recibe precipitación en la misma cantidad que en la estación (Figura 2.9). En ocasiones es necesario realizar una pequeña variación de esta técnica para corregir posibles efectos orográficos. En lugar de trazarse perpendiculares al punto medio de la distancia entre estaciones, las líneas que conectan las estaciones se trazan desde puntos de elevación media..

Calculando el área delimitada por cada estación y relacionándola con el área total, se determinan los pesos relativos de cada pluviómetro y luego se determina el valor promedio de precipitación a partir de un promedio ponderado.

- **Método de las isoyetas**

Son vecindades de igual altura de precipitación (ver Figura 2.9) que se calculan por interpolación entre pluviómetros vecinos. Las áreas entre isoyetas consecutivas se miden y se multiplican por la precipitación promedio entre isoyetas vecinas. El promedio global del área es entonces la suma de este producto del área total considerada. Este método tiene la ventaja de poder registrar isoyetas para tener en cuenta los efectos locales y, por lo tanto, puede aproximarse mejor a la precipitación promedio real del área..

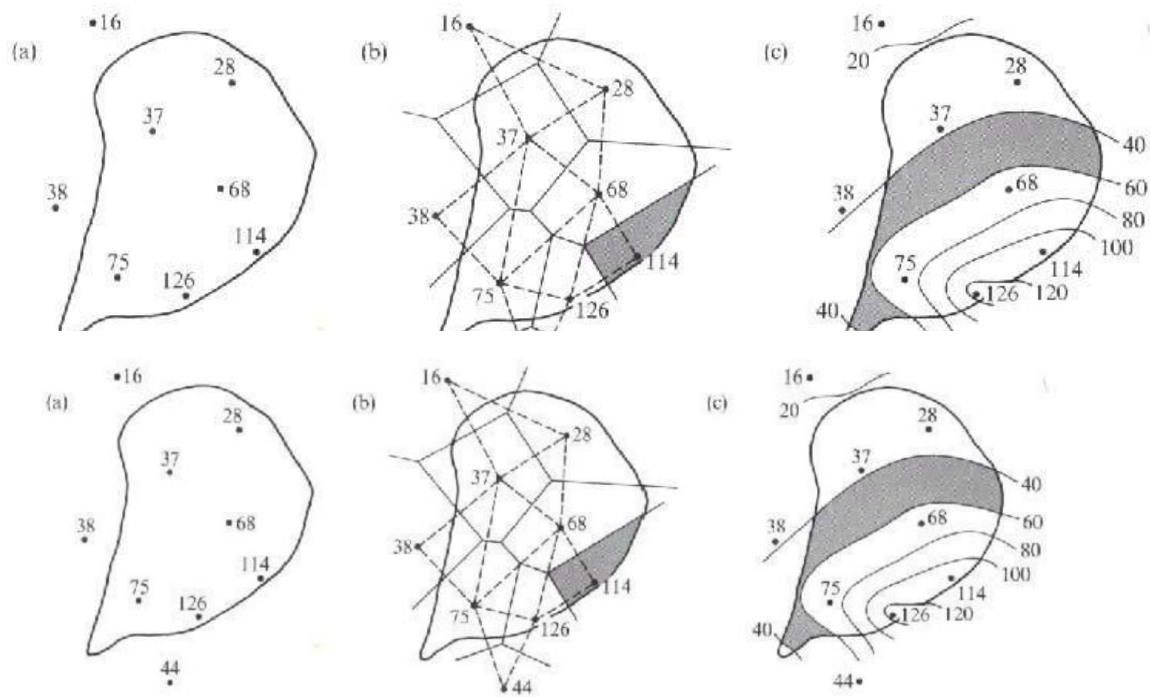


Figura 2.9. Distintos métodos para estimar la precipitación:

- (a) La media aritmética.
- (b) Los polígonos de Thiessen.
- (c) Las isoyetas.

G. ANÁLISIS DE TORMENTAS

Es una serie de eventos de lluvia resultantes de una misma perturbación meteorológica y con características bien definidas. Según esta definición, una tormenta puede durar desde unos pocos minutos hasta varias horas e incluso días; Pueden cubrir áreas terrestres muy diferentes, desde áreas pequeñas hasta grandes regiones.

La tormentas está estrechamente relacionado con los cálculos o estudios previos al diseño de estructuras de ingeniería. De hecho, la extensión de estas obras depende principalmente de las tormentas que se produzcan y de la frecuencia con la que se produzcan en el lugar para el que se planifican las obras. Esto significa entonces que necesitamos conocer su intensidad por unidad de tiempo y duración, lo que determina las dimensiones de la obra, así como la frecuencia con la que se produce una determinada tormenta, definida precisamente en sus características de intensidad y duración, que a su vez determinan el coeficiente de seguridad para el trabajo o la vida útil.

- **Elementos fundamentales**

Intensidad

Es la cantidad de agua que cae por unidad de tiempo. Lo que resulta particularmente interesante de cada tormenta es la intensidad máxima que se produjo. Es decir, la altura máxima de caída del agua por unidad de tiempo. Así, la intensidad se expresa de la siguiente manera.:

$$i_m = P/t$$

donde :

i_m = Intensidad máxima en mm/h;

t = Tiempo en horas;

P = Precipitación en altura de agua en mm.

Duración

Es el tiempo que ocurre entre el inicio y el final de la tempestad, dentro de la duración total de la tormenta. Esto es muy importante para determinar las intensidades máximas.

La intensidad y duración se determinan a partir de un diagrama de precipitación o banda de precipitación.

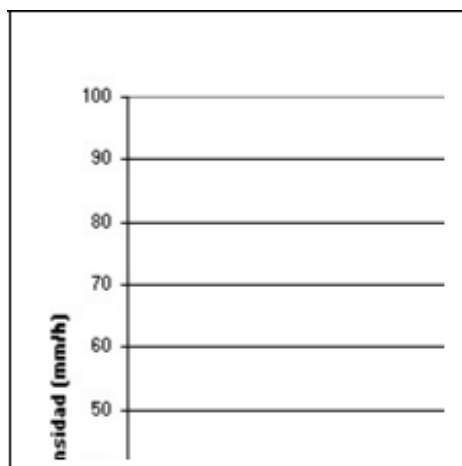
Frecuencia

Es la frecuencia con la que una tormenta de intensidad y duración definidas se repite durante un período de tiempo más o menos largo, normalmente de años..

- **Hietogramas**

La intensidad de las precipitaciones varía en cualquier punto del transcurso de una misma tormenta, en función de sus características. Al analizar las tormentas, es importante identificar estas oscilaciones, ya que de ellas dependen muchas de las condiciones que deben crearse para las obras de ingeniería. Esto se logra a través del hietograma o histograma de precipitación, que es un gráfico a escala que representa la variación de intensidad (en mm/h) de la tormenta a lo largo de la

tormenta (en minutos u horas). Con este hietógrafo es muy fácil determinar cuándo la precipitación alcanzó su máxima intensidad y cuál fue su valor.



H. TORMENTAS DE DISEÑO

Una tormenta de diseño se define como un patrón de lluvia que se utilizará en el diseño de un sistema de agua. Generalmente se utilizan como datos de entrada en el análisis de modelos de precipitación-escorrentía para estimar hidrogramas de inundaciones en cuencas.

Para una zona determinada, elegir el diseño de la tormenta no es tarea fácil porque la intensidad de la lluvia no es constante en el tiempo ni en el espacio. En este contexto, el hidrólogo debe seleccionar una tormenta prevista. Si a esto le sumamos la limitada disponibilidad de registros de lluvias, como es común en el Perú, entenderemos la complejidad de esta fase..

El momento de la lluvia durante una tormenta tiene una influencia importante en la forma del maremoto. Por este motivo, se debe tener en cuenta el hietograma de tormenta a la hora de definir una tormenta de diseño. Varios autores han estudiado tormentas de diseño, incluidos Huff, Varas y SCS.

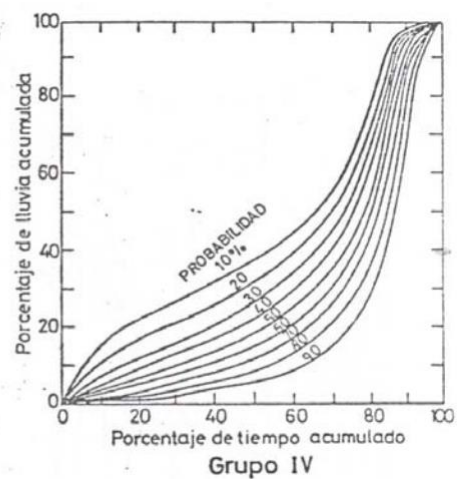
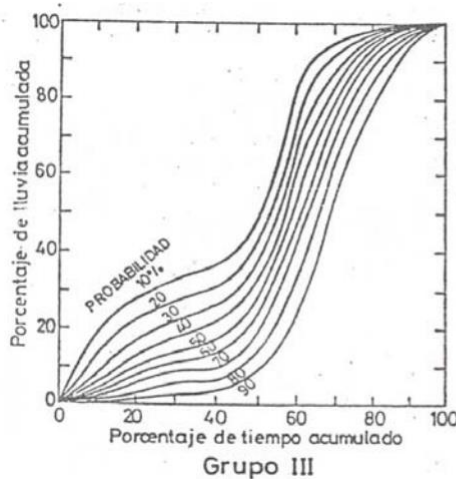
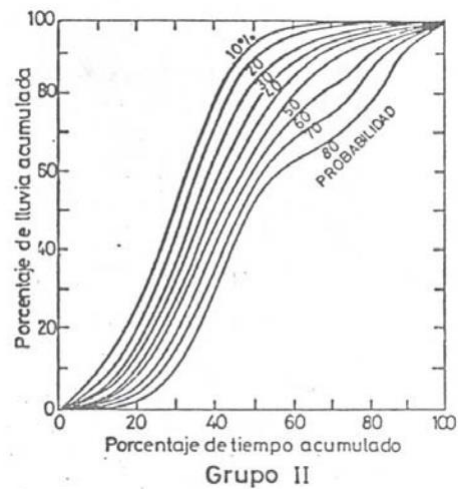
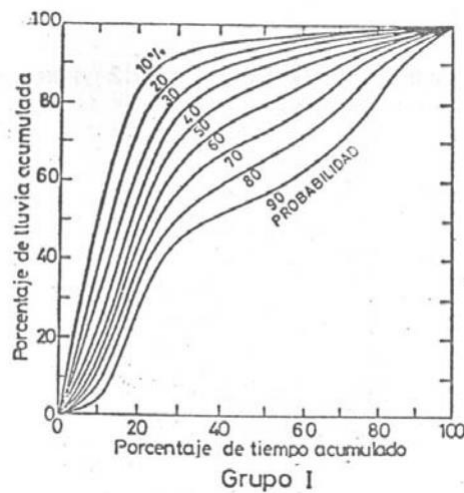
▪ Modelo de Huff

En 1967, Huff examinó la distribución temporal de 261 tormentas severas en un área de 400 millas cuadradas en el estado estadounidense de Illinois. Dividió las tormentas en cuatro grupos dependiendo del intervalo de tiempo en el que se produjeron las precipitaciones más intensas, ya sea en el primer, segundo, tercer o

último cuarto de la duración total de la tormenta. Para cada grupo se realizó un análisis de frecuencia de todas las tormentas registradas para asignar una probabilidad de ocurrencia a cada curva de distribución.

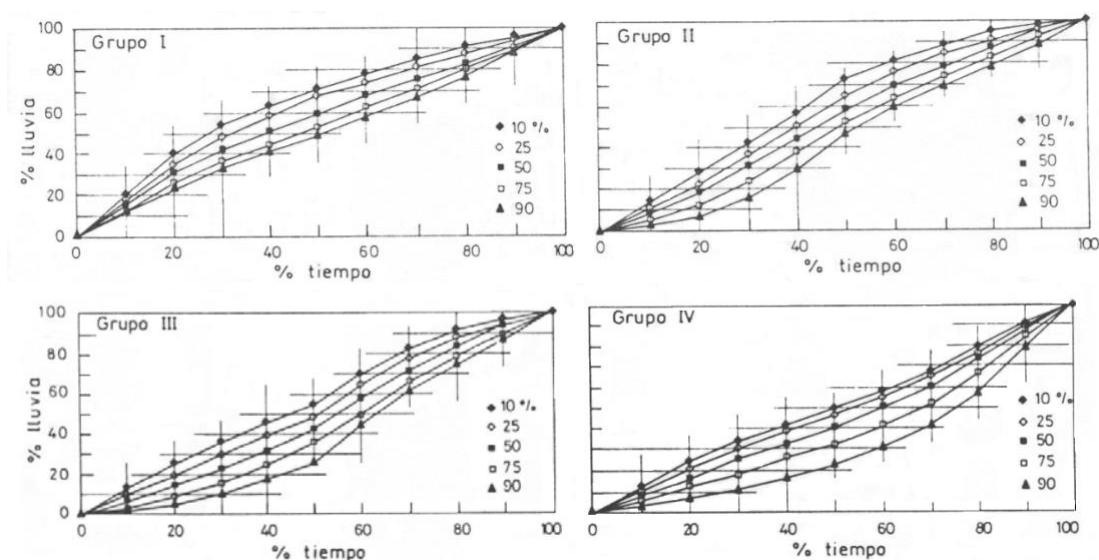
Reconoció la necesidad de clasificar las tormentas según el momento en que ocurren las precipitaciones más intensas, ya que éstas generalmente se concentran en un período de tiempo relativamente corto en comparación con la duración total de la tormenta.

En las figuras se pueden ver los resultados del estudio de Huff y nos permite propagar una tormenta, cuya duración y fuerza total se conocen, en intervalos de tiempo más cortos y al mismo tiempo hacernos una idea de la posibilidad de que se produzca esta hietograma..



▪ Modelo de Varas

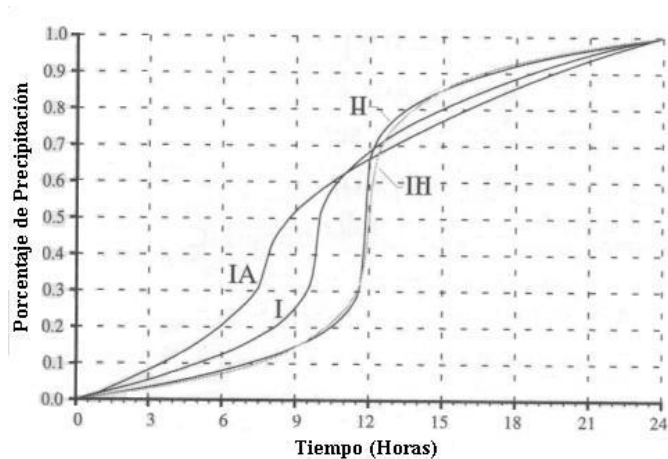
En 1985, Varas examinó la distribución de 296 tormentas registradas en varias temporadas de precipitación en Chile. A diferencia de Huff, Varas trabajó con una muestra formada seleccionando los intervalos más lluviosos dentro de cada tormenta para luego clasificarlos en uno de cuatro grupos, similares a los definidos por Huff. Razón por la cual los perfiles obtenidos muestran menos fluctuaciones en el tiempo.



Varas no encontró dependencia geográfica significativa para las curvas de distribución, por lo que las curvas promedio encontradas son aplicables a otras localidades de Chile.

▪ Método del SCS

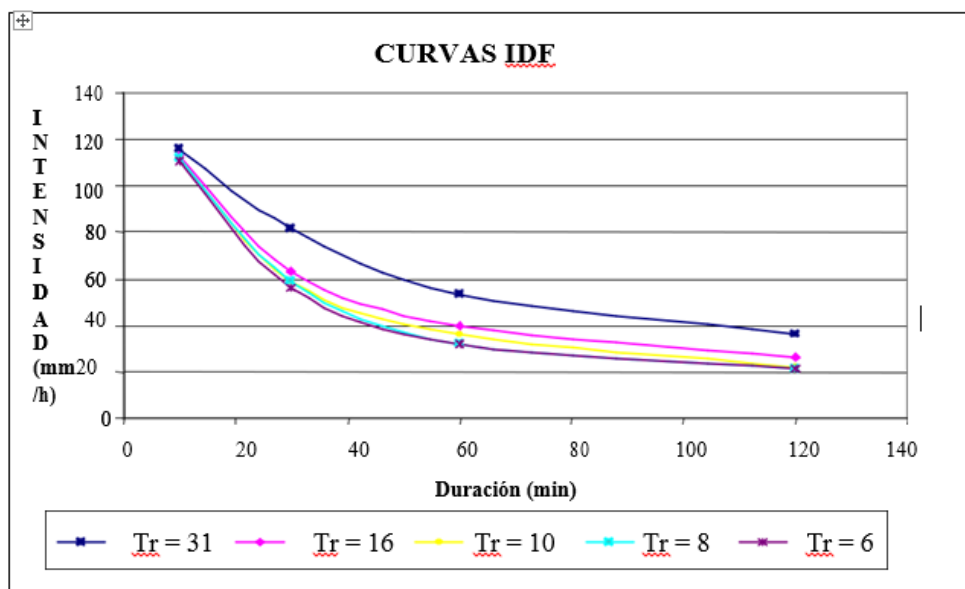
El Servicio de Conservación de Suelos de EE. UU. (USSCS) desarrolló hietogramas sintéticos utilizando información proporcionada por Hershfield en 1961 y Miller et al. en 1973. fueron presentados. Estos hietogramas se aplican a precipitación de 24 horas y proponen 4 distribuciones: Tipo I, IA, II y Las distribuciones se proponen en base al patrón de precipitación para 4 zonas de USA, por lo que es el método más utilizado en USA..



I. RELACIONES INTENSIDAD - DURACIÓN - FRECUENCIA

Los valores de frecuencia nos proporcionan los elementos básicos de evaluación para realizar cálculos antes de planificar estructuras de ingeniería. Por este motivo tiene sentido presentar estos valores en otras formas más manejables y fáciles de leer para poder interpolar valores que no están incluidos en la tabla.

La familia de curvas de duración, intensidad y frecuencia nos permiten conocer cuál será el valor máximo de intensidad para una región determinada y para un tiempo de referencia que se produce con la frecuencia de un periodo determinado..



Se debe tener en cuenta que las líneas IDF se calculan en base a valores de precipitación que normalmente se presentan en diferentes tormentas a lo largo del

tiempo, y no en un solo fenómeno meteorológico, por lo que representan una situación ligeramente diferente a la que se pretende. representar.

5. CAUDALES

Definición.

Gonzales, A. (2014). El flujo de agua es el volumen, como la cantidad de galones, que fluye a través de un tramo determinado de arroyo, río o arroyo en un tiempo determinado, como segundos.



Métodos para medir en caudal

Se puede realizar de diferentes formas y su elección depende del objetivo de monitoreo, de la facilidad de accesibilidad o del tiempo disponible y, por supuesto, de las características de la fuente superficial a la que se destina la medición. sus formas y movimientos. Las características del sitio y las condiciones ambientales al momento de la implementación también son críticas para determinar cómo se realizará la medición del flujo en ese momento específico. Los diferentes métodos o tipos de capacidad incluyen los siguientes::

Medición de caudal por el método volumétrico

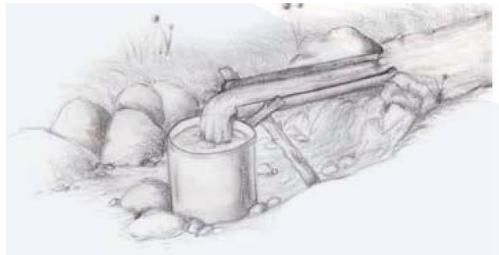
Se emplea cuando la corriente presenta una caída de agua, en la cual se pueda poner un recipiente.

Los materiales a utilizarse son:

1. Reloj o cronómetro.
2. Un recipiente del cual se conoce su capacidad.
3. Bolsas, tubos, o láminas de zinc.



Medición del caudal por el método volumétrico.



El recipiente se coloca debajo del arroyo para que reciba todo el caudal de agua; al mismo tiempo, se activa el temporizador. El cronómetro comienza en el momento en que se inserta el recipiente en el chorro y se detiene en el momento en que se retira del chorro o se llena el balde. Es importante medir varios tiempos de llenado para estimar un valor promedio..

Q = Es el caudal en litros por segundo

V = Volumen en litros, l

t = Tiempo en segundos, s

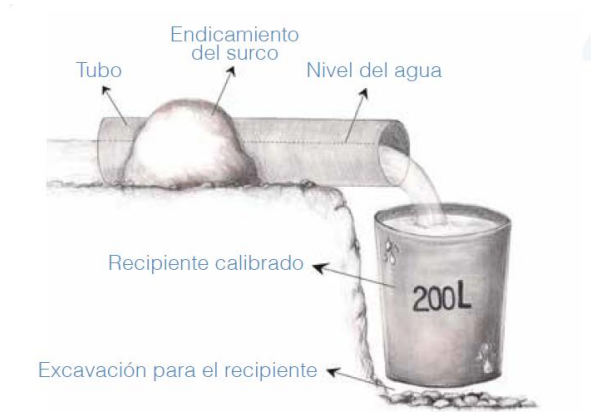
Para calcular el caudal se utiliza la fórmula:

$$\text{Caudal} = \frac{\text{Volumen de agua capturados (en litros)}}{\text{Tiempo de llenado del balde (en segundos)}} = \frac{\text{L}}{\text{S}}$$

$$Q = \frac{V}{t}$$

Este procedimiento tiene la ventaja de ser el más sencillo y confiable, siempre y cuando el lugar donde se realiza la medición garantice que toda la cantidad de agua que fluye por el arroyo llegue al recipiente. Se debe evitar la pérdida de agua en el momento de la medición.

El método volumétrico es más fácil de utilizar siempre que el suelo sobre el que se coloca el contenedor sea sólido y no pueda hundirse ni moverse. Entre los principales problemas que pueden surgir está la manipulación de los contenedores por su excesivo peso..



Medición de caudal por el método área, velocidad o flotadores.

Aquí se mide la velocidad del agua en una sección del río o quebrada.

El método de flotadores es fácil, pero no es confiable

Los materiales que se utilizan son:

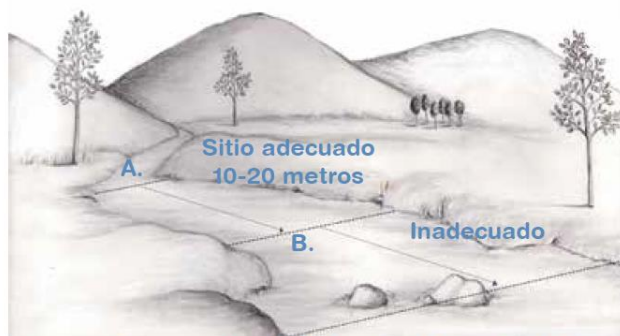
1. Un objeto que flota
2. Un cronómetro.
3. Una cinta métrica.
4. Una tabla de madera graduada.
5. Una soga, estaca de palos y un machete.



¿Cómo se realiza la medida?

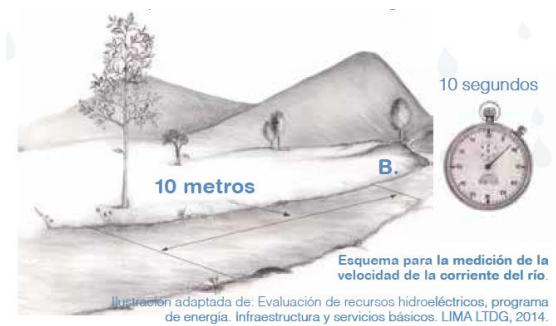
Paso 1: elegir el lugar apropiado

Se elige un río o quebrada donde el agua fluya libremente.



Esquema para la medición de la velocidad de la corriente del río.

Paso 2: se mide la velocidad del agua



Esquema para la medición de la velocidad de la corriente del río.

Ilustración adaptada de: Evaluación de recursos hidroeléctricos, programa de energía. Infraestructura y servicios básicos. LIMA LTDG, 2014.

La velocidad de la corriente de agua del río o quebrada se calcula con la formula

$$V = \frac{\text{Distancia(en metros, m)}}{\text{Tiempo (en segundos, s)}} = \frac{n}{s}$$

Paso 3: medición del área de la sección

Se considera el siguiente procedimiento:

- Se ubica los extremos en ambas orillas.
- Se amarra una cuerda.
- medimos el ancho de la superficie.
- dividimos en partes iguales.
- medimos la profundidad del agua.
- registramos los datos obtenidos.
- Calculamos el área para cada faja.
- Sumamos el área total de la faja

$$\text{Área} = \text{Área faja 1} + \text{Área faja 2} + \text{Área faja 3} \dots$$

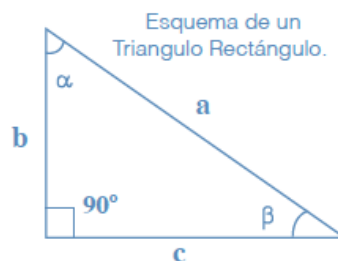


Se utiliza una fórmula para cada figura, los cuales pueden ser:

Triángulo recto: Para calcular el área, se utiliza la siguiente formula:

$$A = \frac{\text{Base} \times \text{Altura}}{2}$$

$$A = \frac{b \times c}{2}$$

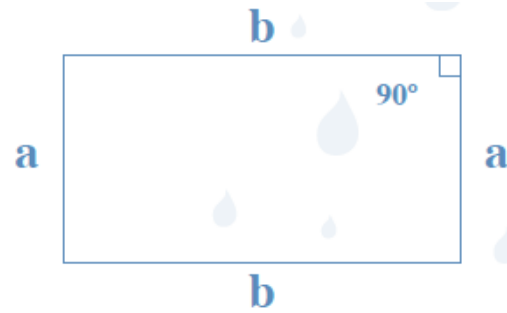


A. area en m^2
b y c. catetos en m

Rectángulo:

$$\text{Area} = \text{Base} * \text{Altura} = \text{m}^2$$

$$A = b \times a$$

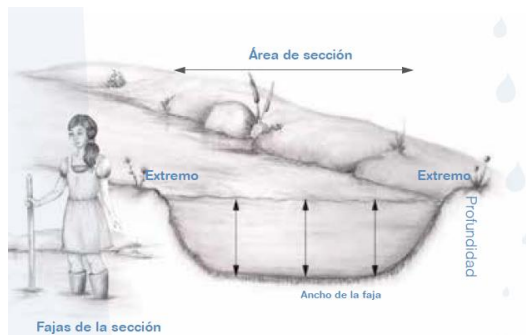
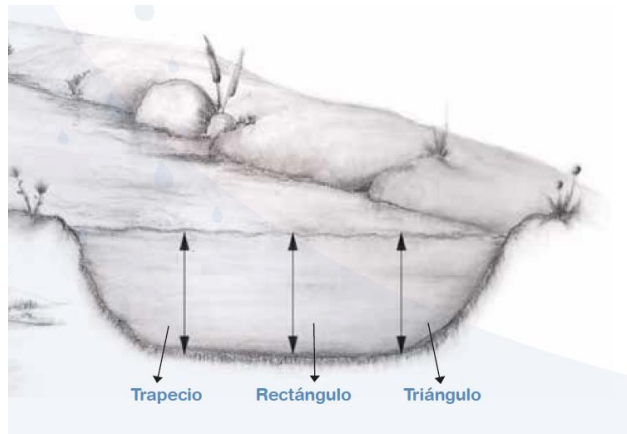
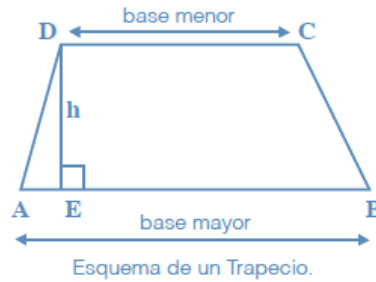


Trapezio:

$$A = \frac{(\text{Base mayor} + \text{Base menor}) * \text{Altura}}{2} = \text{m}^2$$

$$A = \frac{\overline{AE} + \overline{EB} + \overline{DC}}{2} \times h$$

- \overline{AE} Distancia punto A a E
- \overline{EB} Distancia punto E a B
- \overline{DC} Distancia punto D a C
- h Altura



NOTA: Se recomienda dividir la sección en tiras de igual tamaño. Si el tramo tiene menos de dos metros de largo, será necesario dividirlo en cuatro o más franjas iguales. Si es más grande hacemos la tira cada metro. Cuantas más tiras hagamos, más preciso será este método.

En conclusión, para encontrar el caudal, multiplique el área de la sección transversal y la velocidad promedio.:

Cauda (Q)=Área de la sección (A)*Veocidad (V)

$$\frac{m^3}{s} \quad \text{ó} \quad \frac{L}{s}$$

La unidad de medida será en m³/s (metros cúbicos por segundo).

Determinación de caudales

Caudal medio, coeficiente de caudal y módulo específico. A partir de una combinación de ecuaciones y teniendo en cuenta un balance de masa o volumen, se plantea una ecuación lógica para evaluar los parámetros hidrológicos más importantes para la planificación de los sistemas de uso del agua.

La precipitación media anual en cada zona de captación, expresada en m³/s, es:

$$V = 1000\bar{P} A$$

Donde \bar{P} es el promedio de precipitaciones anuales de la cuenca (mm);

A es el área de la cuenca en km².

El volumen escurrido para el mismo periodo es igual a:

$$V_e = 31,436Q_0 10^6$$

Donde, Q_0 es el caudal medio de la cuenca.

Las dos ecuaciones se igualan a través del coeficiente de escorrentía C,

$$\bar{P}A * C * 10^3 = 31,536 * Q_0 * 10^6$$

A partir de esta ecuación, el Modulo Especifico de escorrentía M_0 es:

$$M_0 = \frac{Q_0}{A} = \frac{31,71 C \bar{P}}{10^6} \quad , \quad \left(\frac{m^3}{s} / km^2 \right)$$

Y el coeficiente de escorrentía:

$$C = \frac{Q_0 10^6}{31,71 \bar{P} A} = \frac{M_0 10^6}{31,71 \bar{P}}$$

Así resulta que:

$$Q_0 = \frac{31,71 * C \bar{P} A}{10^6}$$

Para cuencas fluviales con glaciares o humedales, la fórmula del coeficiente de esorrentía propuesta anteriormente debería tener en cuenta la columna de agua creada por el derretimiento del hielo o la contribución de los humedales. Si no se tiene en cuenta esta columna, el valor del coeficiente de descarga podrá ser mayor que la unidad. Para calcular los caudales por el método racional se recomienda utilizar el coeficiente de caudal C, que se calcula mediante la expresión propuesta, ya que tiene en cuenta de forma integral todas las características físicas de la zona de captación.

Al realizar estudios hidrológicos, el caudal medio de una cuenca fluvial suele expresarse únicamente en función del área mediante la expresión:

$$Q_0 = aA^b$$

a y b son variables que, para la ecuación propuesta, serían:

$$a = \frac{31,71 C \bar{P}}{10^6} \text{ y } b = 1$$

Caudal Mínimo y Caudal ecológico.

El caudal mínimo de una cuenca hidrográfica se utiliza generalmente como referencia para determinar el escurrimiento ecológico. Por lo tanto, se recomienda que se considere equivalente:

$$Q_{\min} = \frac{\bar{P}A}{10^6} = Q_{\text{eco}}$$

Caudal máximo. Se supone que los flujos máximos siempre están relacionados con un determinado período de retorno en años (T), por lo que cualquier fórmula empírica debe tener en cuenta este factor. En segundo lugar, el exponente f del área varía según su tamaño..

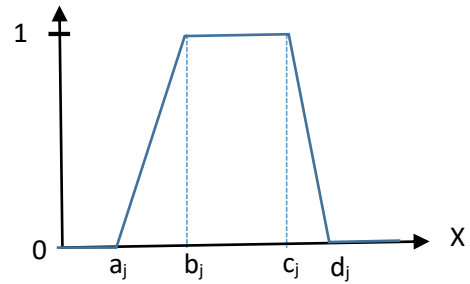
$$Q_{\max(T)} = a\bar{P}A^f F(T)$$

Voscresiensky (1956) menciona que el exponente f es igual para pequeñas y grandes cuencas, igual a 0,5, aunque puede variar entre 0,4 y 0,7.

2.2. Marco conceptual

Función Trapezoidal. Se define el límite inferior a_j y superior d_j , y los mites de su soporte, b_j y c_j , inferior y superior respectivamente.

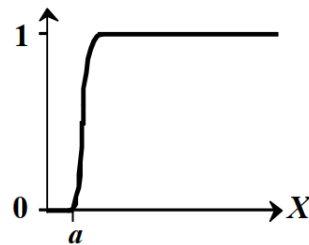
$$A(x_i) = \begin{cases} 0 & \text{si } x_i \leq a_j \text{ o } x \geq d_j \\ \frac{x_i - a_j}{b_j - a_j} & \text{si } x_i \in [a_j, b_j] \\ 1 & \text{si } x_i \in [b_j, c_j] \\ \frac{d - x_i}{d - c} & \text{si } x_i \in [c_j, d_j] \end{cases}$$



Función Γ (gamma). Definida por su límite inferior a_j y el valor $k > 0$.

$$A(x_i) = \begin{cases} 0 & \text{si } x_i \leq a_j \\ 1 - e^{-k(x_i - a_j)^2} & \text{si } x_i > a_j \end{cases}$$

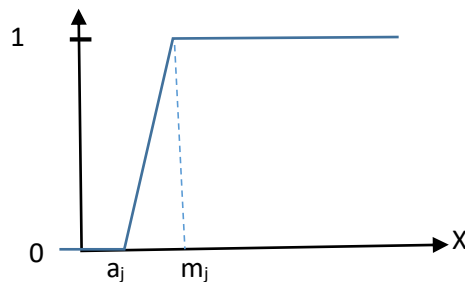
$$A(x_i) = \begin{cases} 0 & \text{si } x_i \leq a_j \\ \frac{k(x_i - a_j)^2}{1 + k(x_i - a_j)^2} & \text{si } x_i > a_j \end{cases}$$



La función se identifica por un rápido aumento a partir de a_j . Cuando más grande sea el valor K , el crecimiento es más rápido. La primera definición tiene un crecimiento más rápido. En ningún momento toma el valor 1, aunque tienen una asíntota horizontal en uno.

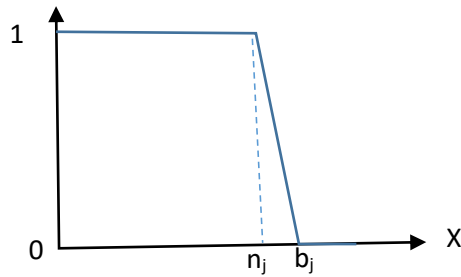
Su aproximación se da linealmente por:

$$A(x_i) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a_j \\ \frac{x_i - a_j}{m_i - a_j} & \text{si } x \in (a_j, m_j) \\ 1 & \text{si } x \geq m_j \end{cases}$$



Función L. puede describirse como el inverso de la función Gamma:

$$B(x_i) = \begin{cases} 0 & \text{si } x_i \geq b_j \\ \frac{b_j - x_i}{b_j - n_j} & \text{si } x_i \in (n_j, b_j) \\ 1 & \text{si } x_i \leq n_j \end{cases}$$



Operaciones Difusas

Se dice que un conjunto A es un subconjunto difuso de B, es decir, $A \subseteq B$, si $\forall x_i \in U$; $m_A(x_i) \leq m_B(x_i)$

y si existe, al menos, un punto $x_i \in U$ tal que $m_A(x_i) \neq m_B(x_i)$, entonces se escribe que $A \subset B$.

Intersección (min- intersección):

La **intersección** de dos conjuntos difusos, A y B, viene dada, punto a punto, por:

$$m_{A \cap B}(x_i) = \min \{m_A(x_i), m_B(x_i)\}$$

Unión (max - unión):

La unión de dos conjuntos difusos, A y B, viene dada, punto a punto, por:

$$m_{A \cup B}(x_i) = \max \{m_A(x_i), m_B(x_i)\}$$

Complementación:

El complemento, A^c , de un conjunto difuso A, viene dado, punto a punto, por:

$$m_{A^c}(x_i) = 1 - m_A(x_i)$$

Precipitaciones

Definición: La precipitación es cualquier forma de humedad que llega a la superficie de la Tierra desde las nubes. Según esta definición, la lluvia, el granizo, las garuas y la nieve son formas diferentes de un mismo fenómeno de precipitación.

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Hipótesis central de la investigación

Hipótesis de la investigación

El pronóstico del caudal de la cuenca del Rio Huaura, se avalúa con un sistema de inferencia difuso, basados en precipitaciones pluviales.

Hipótesis específicos

- ✓ Con la información de las precipitaciones se pronostica los caudales del rio Huaura.
- ✓ El funcionamiento de un sistema de inferencia difuso ayuda a pronosticar el caudal del rio Huaura mediante las precipitaciones pluviales

3.2 Variables e indicadores de la Investigación

Variables	Dimensiones	Indicadores
Precipitaciones pluviales	Lluvias	Muy Ligero: menor 1,4 mm/h
		Ligero < 1,4 mm/h a 2.5 mm/h >
		Moderada baja <2,5 mm/h a 4 mm/h >
		Moderada media <4 mm/h a 5,6 mm/h >
		Moderada < 5,6 mm/h a 7,5 mm/h >
		Fuerte <7,5 mm /h a 9 mm/h>
Llovizna	Llovizna	Muy fuerte <9,0 a mas
		Muy Ligero: menor 0,05 mm/h
		Ligero <0,05 mm/h a 0,1 mm/h >
		Moderada baja <0,1 mm/h a 0,2 mm/h >

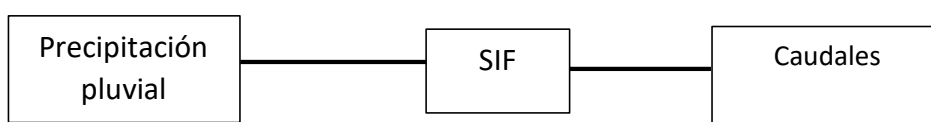
		Moderada media <0,2 mm/h a 0,3 mm/h >
		>
		Moderada <0,3 mm/h a 0,4 mm/h >
		Fuerte <0,4 mm/h a 0,5 mm/h >
		Muy Fuerte < 0,5 mm/h a mas
		pequeño: menor de 5mm
	Granizo	mediano A < 5 mm a 15 mm>
		mediano B < 15 mm a 25mm>
		Mediano < 25 mm a 35 mm >
		Grande <35 mm a 50 mm >
		Muy grande: mayor de 50mm
	Nieve	Ligera: menor 1.0 mm/h
		Moderada baja <1 mm/h a 2 mm/h >
		Moderada medio <2 mm/h a 3 mm/h >
		Moderada <3 mm/h a 4 mm/h>
		Fuerte < 4 mm/h a 5 mm/h >
		Muy Fuerte: mayor de 5 mm/h
		Mínimas: menor 40 m ³ /s
Caudal de agua	Descargas de agua	Media: <40 a 60 m ³ /s>
		Máximas:< 60 m ³ /s a 80>
		Inundación; más de 80

3.3 Métodos de la investigación

Descriptivo - proposicional

3.4 Diseño o esquema de investigación

El diseño de la investigación utilizado es de tipo No experimental y su diagrama es:



Hernández (2003) mención que:

“La investigación no experimental se refiere a la investigación realizada sin manipulación consciente de variables y en la que los fenómenos simplemente se observan en su entorno natural y luego se analizan”

Como señala Kerlinger (1979, p.116) menciona que: " La investigación no experimental o ex post facto es cualquier investigación en la que es imposible manipular variables o asignar aleatoriamente sujetos o condiciones ".(p.116).

3.5 Poblacional y muestra

1. Población

Todos los factores que determinan el caudal.

Tabla 1

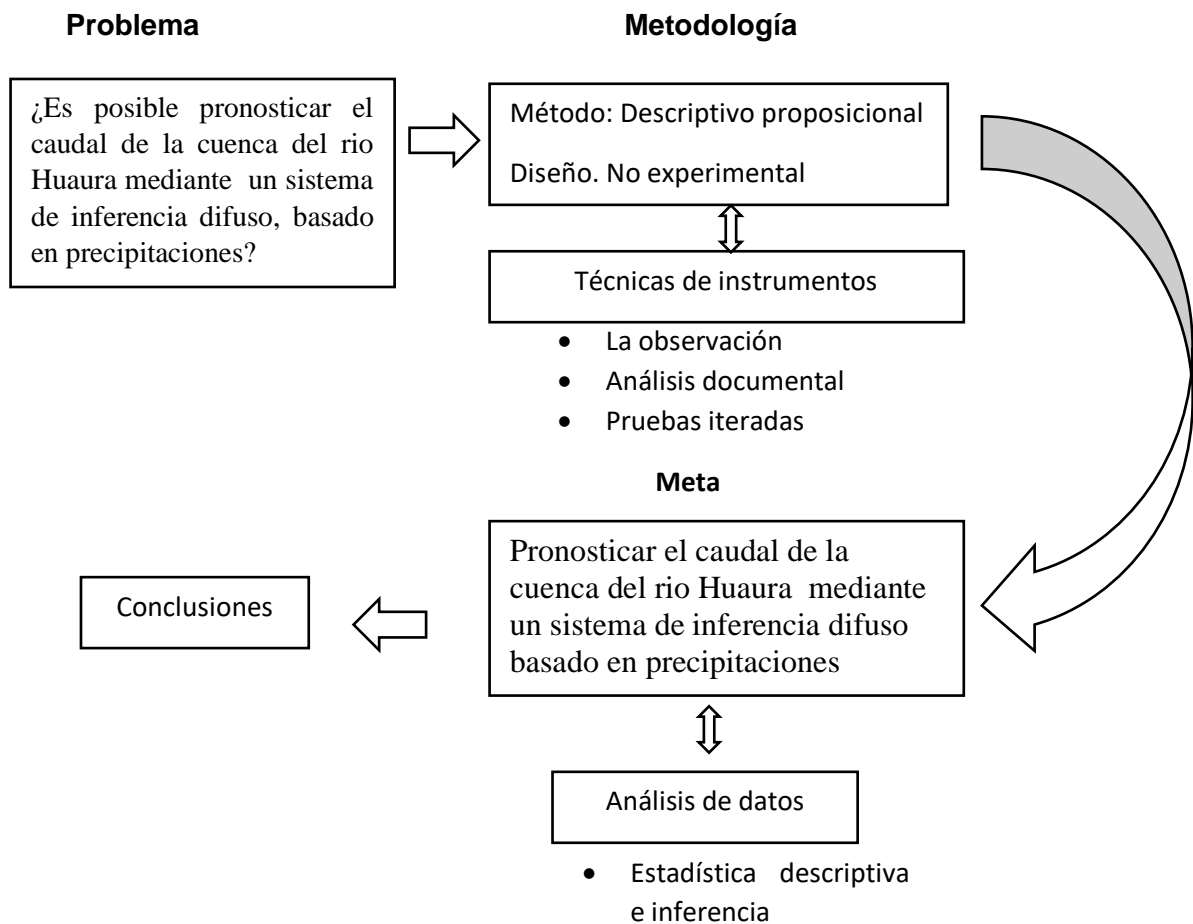
Descarga medias mensuales – Rio Huaura(m3/s.) Estacion- Alco Sayan

AÑO	ENE.	FEB	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	PROM.
1967	34.2	84.0	89.9	38.4	22.5	17.1	15.8	14.4	14.3	21.7	19.7	21.9	32.8
1968	28.9	24.4	37.5	20.2	15.4	12.8	12.2	12.8	13.2	18.0	21.2	20.9	19.8
1969	12.2	20.2	32.4	31.9	14.1	13.0	12.0	11.1	11.3	12.5	16.4	61.1	20.7
1970	62.8	42.6	40.5	35.7	25.6	20.0	14.9	13.3	17.1	17.6	19.0	28.1	28.1
1971	36.0	39.4	54.2	41.7	20.9	16.7	13.0	11.5	11.3	16.2	14.8	24.8	25.0
1972	37.6	34.0	118.3	77.1	32.5	15.6	12.7	12.3	11.3	16.3	14.1	30.3	34.4
1973	51.0	70.2	99.9	68.7	31.0	15.8	14.3	12.5	14.2	25.4	23.6	46.3	39.4
1974	59.6	81.5	86.3	48.5	27.6	17.9	14.1	13.1	14.5	13.8	16.4	17.4	34.2
1975	41.2	35.4	87.0	41.6	27.1	19.1	15.3	14.0	11.7	14.4	16.2	18.2	28.4
1976	46.9	78.3	77.8	42.5	17.7	14.8	13.2	13.2	13.2	12.6	13.4	15.2	29.9
1977	21.2	48.0	49.8	28.9	15.0	11.3	10.9	11.7	11.3	11.7	19.5	22.0	21.8
1978	24.9	45.0	36.0	27.0	16.0	15.0	15.0	13.6	13.6	14.9	21.9	20.5	21.9
1979	16.8	46.0	74.9	48.2	15.7	12.6	11.5	10.4	11.5	13.0	12.3	14.4	23.9
1980	21.9	23.0	26.0	20.8	11.2	8.3	7.7	8.6	10.1	15.8	17.4	21.0	16.0
1981	30.2	74.8	97.2	24.1	14.5	10.2	8.4	10.1	10.3	10.8	15.9	26.1	27.7
1982	27.9	60.9	37.7	39.2	16.6	11.0	8.1	8.4	11.3	13.9	29.5	36.1	25.1
1983	55.9	36.4	60.7	62.0	23.1	9.0	9.7	9.6	9.3	11.3	14.4	21.9	26.9
1984	46.5	82.9	77.5	41.5	23.7	19.1	14.1	12.8	12.2	17.3	23.4	27.7	33.2
1985	23.8	48.2	49.5	36.0	19.9	16.0	13.1	12.0	13.0	12.7	13.6	16.7	22.9
1986	37.6	57.8	49.0	36.7	18.7	14.4	11.0	11.0	12.6	13.1	12.6	17.6	24.4
1987	47.1	60.4	36.5	24.7	14.4	12.3	11.0	10.2	11.0	11.5	17.4	19.6	23.0
1988	35.1	41.3	32.0	31.5	18.3	14.2	11.7	10.5	11.9	12.9	14.3	15.7	20.8
1989	41.0	62.1	68.2	40.5	21.1	16.9	13.1	11.8	10.5	12.3	13.1	10.5	26.8
1990	15.4	23.9	24.9	16.6	11.1	10.4	8.9	8.4	8.9	18.3	28.5	30.9	17.2
1991	27.3	41.9	53.6	29.0	14.7	12.3	10.2	9.4	9.7	11.3	12.0	11.5	20.3
1992	21.9	13.4	25.3	18.2	11.2	10.8	9.0	8.0	8.7	11.4	10.4	9.5	13.2
1993	19.6	38.0	28.5	30.2	16.3	12.1	12.1	11.2	10.2	12.6	20.5	23.2	19.5
1994	37.4	66.5	65.6	36.5	34.3	20.7	16.9	13.3	13.1	13.6	16.3	15.1	30.8
1995	24.2	16.8	35.4	29.1	10.2	7.8	6.3	5.6	6.2	7.2	11.1	11.8	14.3
1996	25.4	49.0	55.9	44.9	15.5	11.1	8.1	6.6	6.7	7.3	9.5	11.8	21.0
1997	22.0	45.1	39.0	11.2	9.6	7.2	6.6	6.7	10.8	12.6	15.1	29.7	18.0
1998	56.3	93.4	97.5	78.9	22.1	14.4	12.8	10.9	10.7	13.8	12.7	12.3	36.3
1999	24.5	76.7	76.9	44.9	27.6	19.3	15.9	12.3	12.0	13.8	12.0	18.7	29.6
2000	35.9	67.3	87.6	58.0	27.4	16.0	15.6	15.4	14.1	18.5	13.5	19.8	32.4
2001	55.1	54.5	84.1	42.7	16.7	14.0	12.2	12.2	12.5	12.2	20.1	22.1	29.9
2002	20.3	41.2	64.7	48.6	19.3	15.3	14.5	13.9	13.6	16.1	19.7	25.0	26.0
2003	35.3	49.1	58.9	36.7	20.3	15.8	14.1	13.9	14.3	13.8	13.9	19.8	25.5
2004	18.1	31.9	27.8	22.4	14.4	12.1	11.9	10.7	10.7	13.7	22.4	29.1	18.8
2005	33.6	26.3	36.5	31.2	15.2	13.3	11.4	11.4	10.6	10.1	9.6	12.2	18.5
2006	17.4	44.4	64.6	38.4	15.8	13.8	12.3	11.2	11.7	11.7	14.4	22.8	24.9
2007	47.7	62.7	95.1	73.5	28.8	15.6	12.9	12.4	12.8	15.9	21.3	14.8	34.5
2008	49.8	57.8	48.8	32.4	16.4	13.7	11.8	10.8	11.1	11.8	11.6	15.0	24.2
MEDIA	34.0	49.9	59.3	39.8	19.3	14.0	12.1	11.3	11.6	13.9	16.5	21.6	25.3
D.EST.	13.4	19.8	24.8	16.1	6.2	3.3	2.6	2.2	2.0	3.3	4.7	9.6	

Fuente: ALA Huaura

3.6 Actividades del proceso investigativo

En la figura se muestra las actividades del proceso de investigación, que muestra un acercamiento a la realidad del objeto de investigación, identificando el problema; la metodología, la meta y la conclusión.



3.7 Técnica e instrumento de la investigación

3.7.1 Técnicas de recolección de datos

Análisis documentales

3.7.2 Análisis de recolección de datos

Documentos de archivos y fuentes gubernamentales

3.8 Procedimiento de la recolección de datos

Análisis documental: Se obtuvieron del Repositorio digital de Recurso hídricos de la Autoridad nacional del Agua (ANA)

3.9 Técnicas de procesamiento y análisis de los resultados

Lógica difusa

software matlab

Comparación de los resultados con otros modelos

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

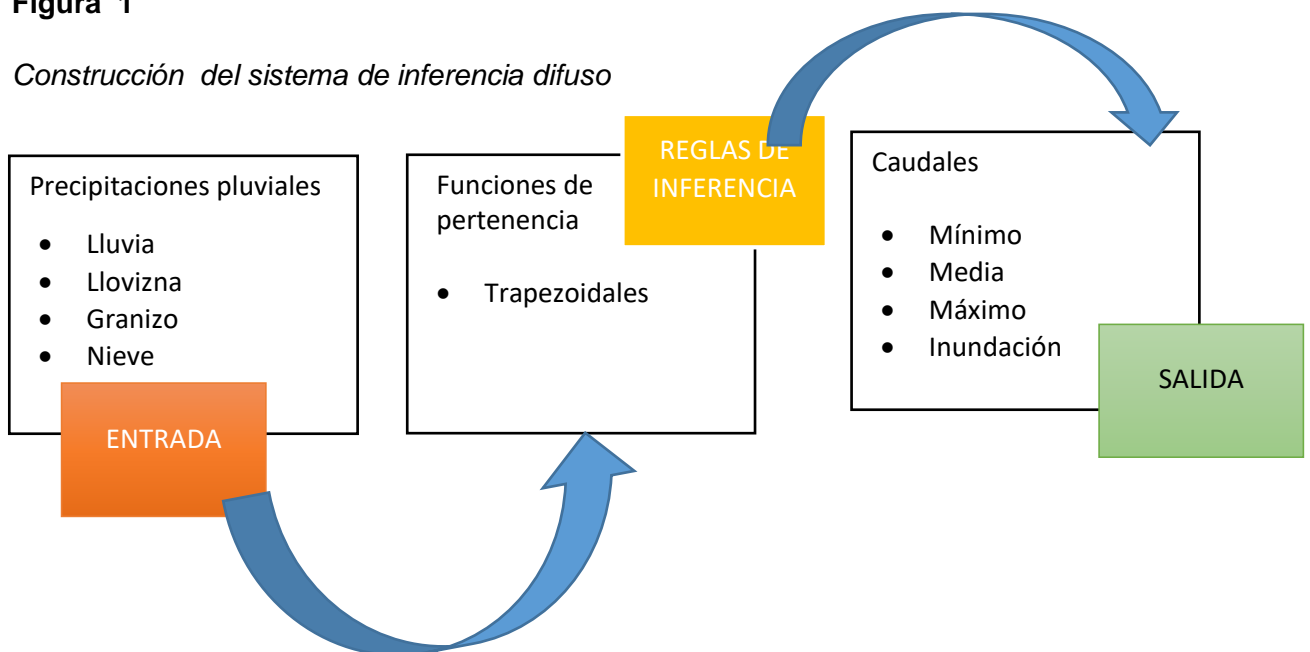
4.1. Análisis de resultados

1. Diseño del sistema de inferencia difuso

Para pronosticar el caudal de la cuenca del río Huaura, teniendo en cuenta la precipitaciones pluviales como: lluvia, llovizna, granizo y nieve y tomando como referencia el estudio realizado por la Dirección de conservación y planeamiento de Recursos Hídricos de la Autoridad Local del agua Huaura se diseño de la manera siguiente:

Figura 1

Construcción del sistema de inferencia difuso



2. Fundamento teórico del sistema difuso.

Definamos como conjunto difuso de entrada

$$A_i = \{ (x, \mu_{A_i}(x) / x \in U_i \wedge \mu_{A_i}(x) \in [0,1] \}$$

x = parametro de lluvia, llovizna, granizo y nieve

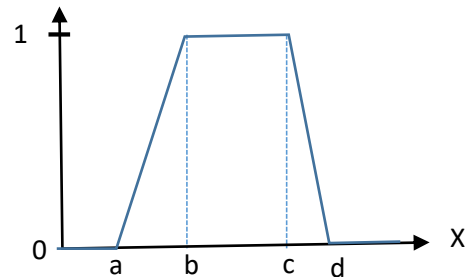
$U_i = \text{Universo discurso del parametro } i$

$$U_i = [0, x_i]; \text{ con } x_i \in U_i; \mu_{A_i}(x_i) = 1$$

Se define la función de pertenencia trapezoidal

Se dice que un número borroso A es trapezoidal si su pertenencia tiene la forma de un trapecoide y esta dado por:

$$\mu_{A_i}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } (x \leq a) \text{ o } (x \geq d) \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{si } a < x \leq b \\ 1 & \text{si } b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{si } b < x < d \end{cases}$$



4.1.1 Variables de entrada

4.1.2.1. Lluvia

Para la variable de entrada **lluvia** se utilizó el universo $[0,10]$ expresado en mm/h. Se utilizó el conjunto calificador MUY LIGERO (menor que 1,4) , LIGERA (1,4 – 2,5), MODERADO BAJA (2,5 – 4), MODERADO MEDIA (4 – 5,6), MODERADO (5,6 – 7,5), FUERTE (7,5 – 9) y MUY FUERTE (9 a mas). El conjunto difuso asignado se muestra en la figura.

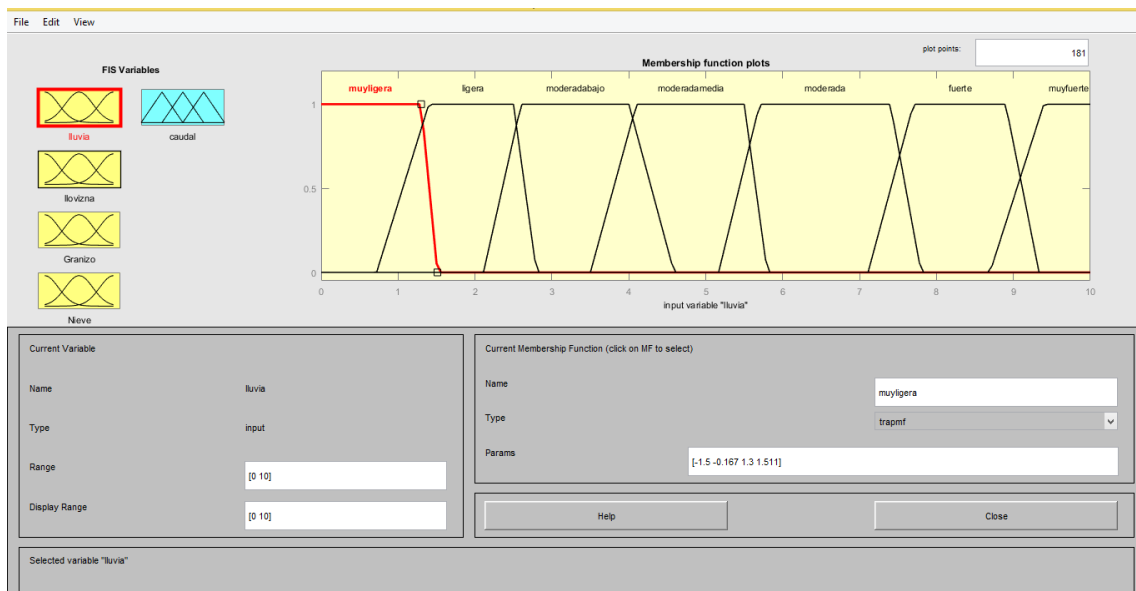


Figura 1. Variable del universo de entrada LLUVIA

4.1.2.2. Llovizna

Para la variable de entrada LLOVIZNA se utilizó el universo $[0 ; 0,6]$ expresado en mm/h. Se utilizó el conjunto calificador MUY LIGERO (menor que 0,05) , LIGERO(0,05 – 0,1), MODERADA BAJA (0,1- 0,2), MODERADA MEDIA (0,2-0,3) , MODERADA (0,3- 0,4) , FUERTE (0,4- 0,5) y MUY FUERTE (0,5 a mas). El conjunto difuso asignado se muestra en la figura.

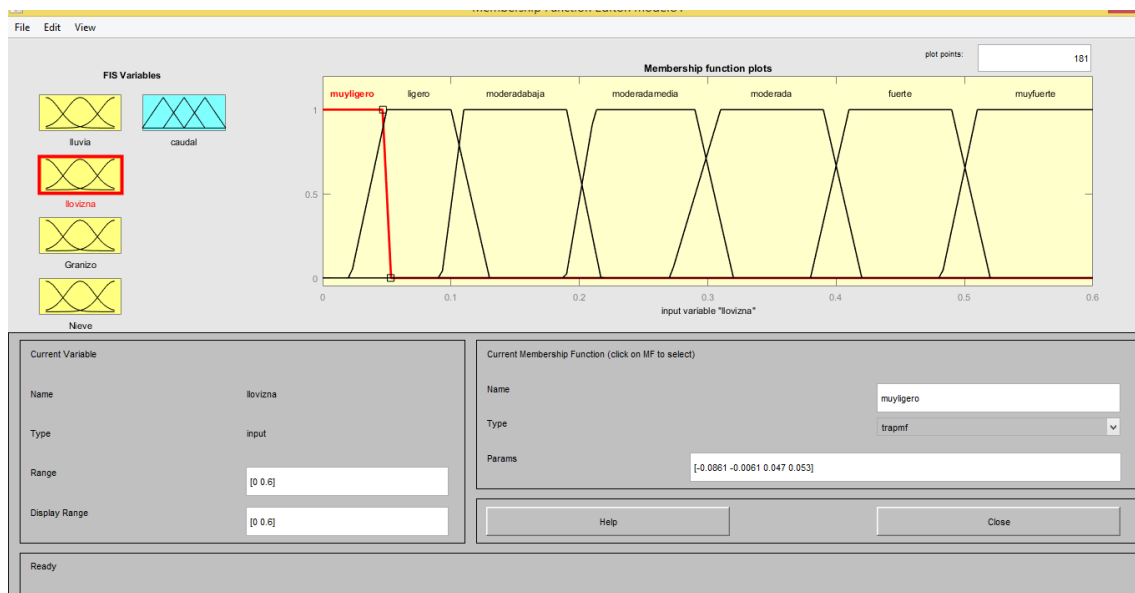


Figura 2. Variable del universo de entrada LLOVIZNA

4.1.2.3. Granizo

Para la variable de entrada **GRANIZO** se utilizó el universo $[0 ; 60]$ expresado en mm. Se utilizó el conjunto calificador PEQUEÑO (menor que 5), MEDIANO A (5 -15), MEDIANO B (15-25), MEDIANO (25-35), GRANDE (35-50) y MUY GRANDE (mayor que 50) . El conjunto difuso asignado se muestra en la figura.

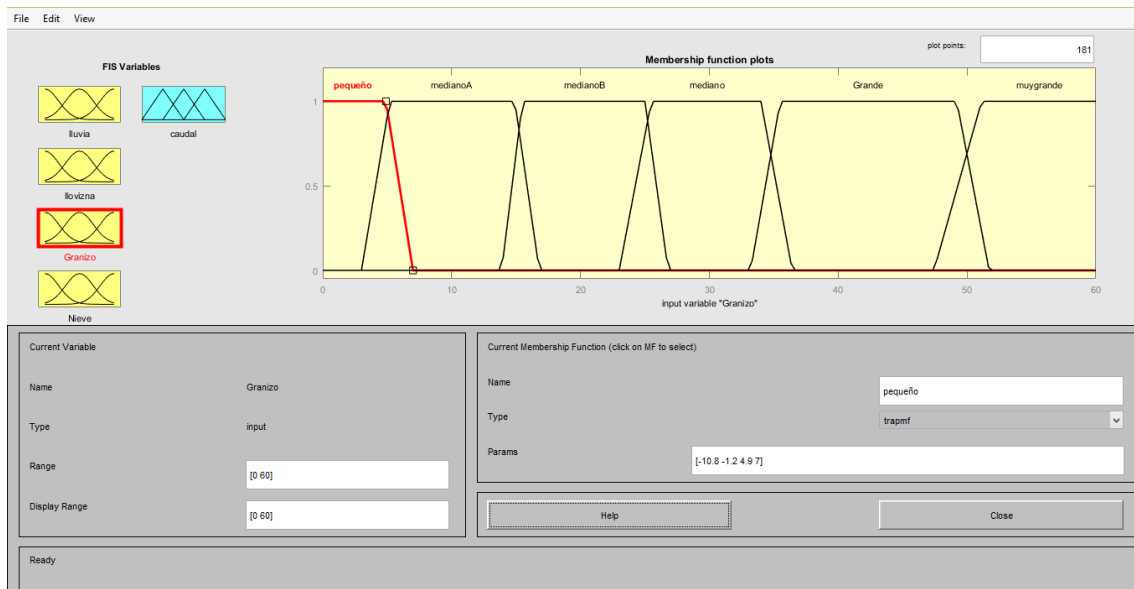


Figura 3. Variable del universo de entrada GRANIZO

4.1.2.4. Nieve

Para la variable de entrada NIEVE se utilizó el universo $[0 ; 6]$ expresado en mm/h. Se utilizó el conjunto calificador LIGERA (menor que 1.0), MODERADA BAJA (1- 2), MODERADA MEDIO (2-3), MODERADA (3-4), FUERTE (4-5), MUY FUERTE (mayor de 5). El conjunto difuso asignado se muestra en la figura.

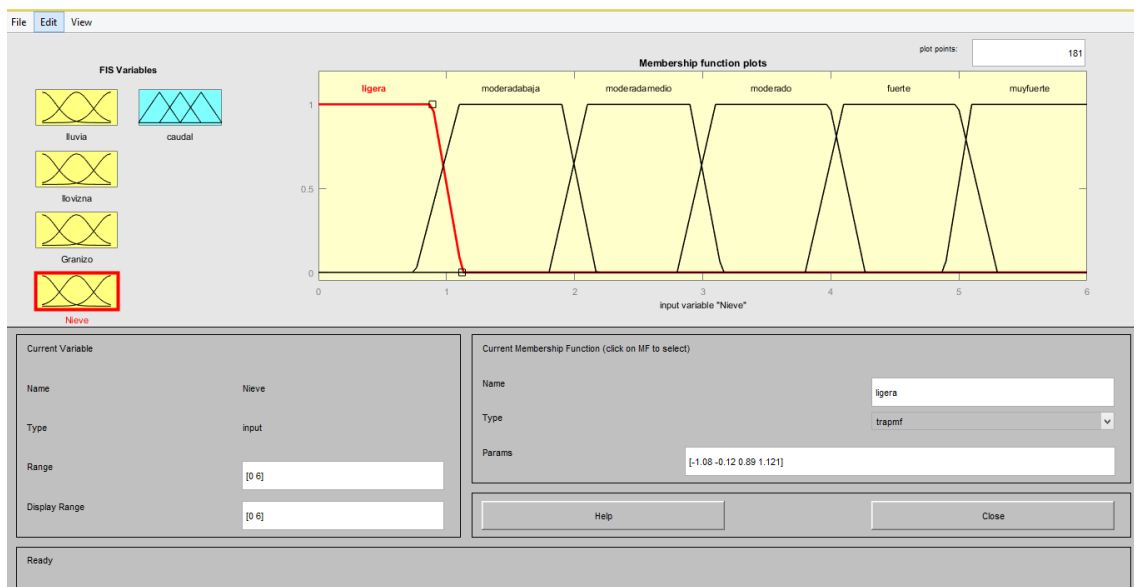


Figura 4. Variable del universo de entrada NIEVE

Para el análisis de estas variables de entrada se ha tenido en cuenta a Galindo J. (2007). El conjunto difuso C se define como una Función de pertenencia que conecta

o empareja los elementos de un dominio o Universo de Discurso X con los elementos de Intervalo [0 , 1]:

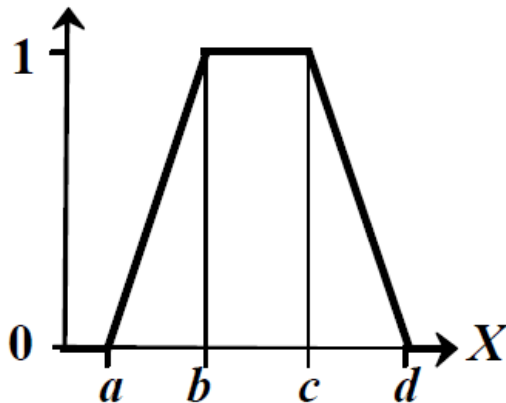
$$C: X \rightarrow [0, 1]$$

Cuanto más próximo esté C(x) del valor 1, mayor será la pertenencia del objeto x al conjunto C.

Los valores de pertenencia varían entre = 0 (no pertenece) y 1 (pertenece l)

Función trapezoidal: Determinada por sus límites inferiores a y superiores d, y los límites de su soporte, b y c, inferior y sus superiores respectivamente,

$$C(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } (x \leq a) \text{ o } (x \geq d) \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{si } x \in (a, b] \\ 1 & \text{si } x \in (b, c) \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{si } x \in (c, d) \end{cases}$$



4.1.3 Salida del sistema.

El sistema tiene una salida que está representado por MÍNIMO, MEDIA MÁXIMO e INUNDACIONES , el cual mostrará el valor del caudal pronosticado. El número de reglas del sistema se da por todas las posibles combinaciones.

4.1.4. Variable de salida

Esta variable es el caudal. Para la variable CAUDAL se utilizó el universo $[0 ; 85]$ expresado en m^3/s . El sistema tiene una salida que está representado como MÍNIMAS (menor de 40), MEDIA (40 - 60), MÁXIMO (60- 80) INUNDACION (80 a mas), la cual mostrará el valor del caudal pronosticado. El conjunto difuso asignado se muestra en la figura

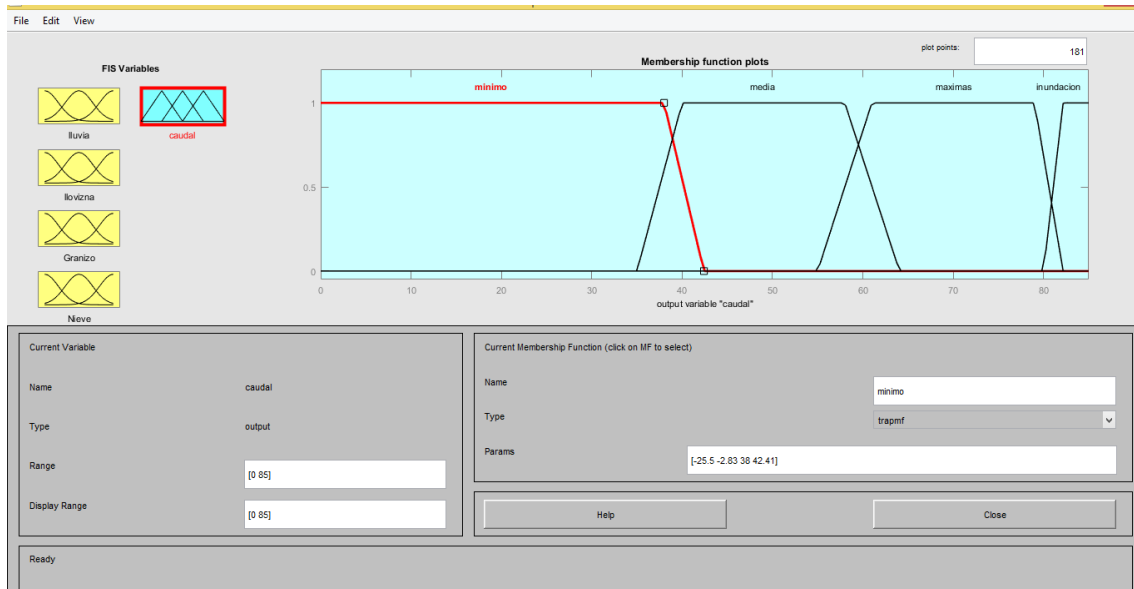


Figura 5. Variable del universo de salida CAUDAL

4.1.5 Entrada de datos a Matlab.

VARIABLE DE ENTRADA:

- Lluvia
- Llovizna
- Granizo
- Nieve

VARIABLE DE SALIDA:

- Caudal

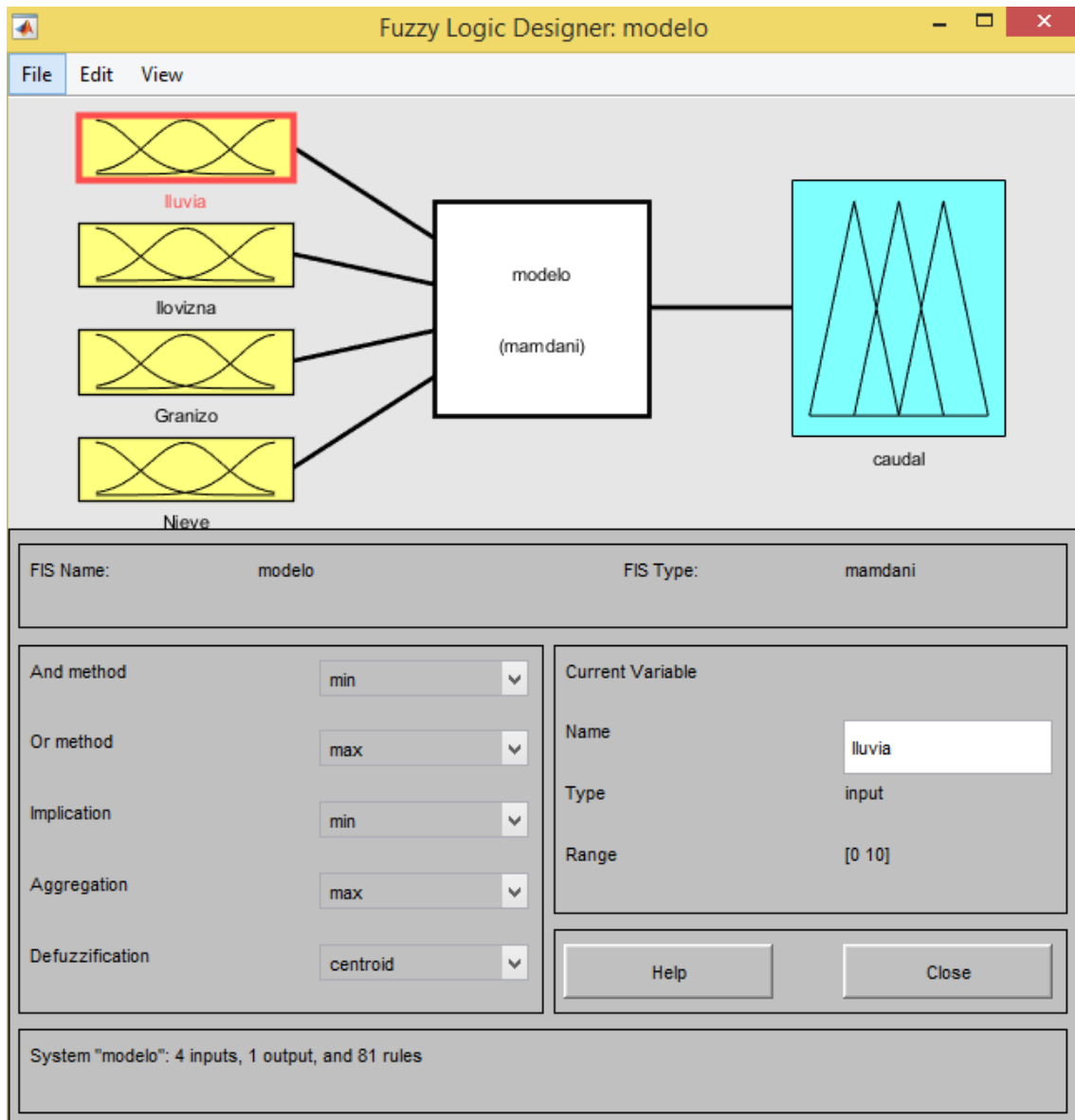


Figura 6: variable de salida “Caudal”

4.1.6 Lógica de decisiones

Regla difusa de Mamdani:

IF x_1 is A AND x_2 IS B AND x_3 IS C AND x_4 D THEN u_1 E

Donde x_1, x_2, x_3 y x_3 son las variables de entrada (Lluvia, Llovizna, Granizo y Nieve) A, B, C y D son las funciones de entrada, u_1 es la acción de control (Caudal: Mínimo Medio y Máximo) y E son funciones de Salida.

Para formar las reglas del modelo, hemos utilizado el Ruler Editor, según el número de variables de entradas y salidas que existen y sus funciones de pertenencia. A

continuación se muestran las reglas y las combinaciones utilizadas para conseguir un solo conjunto borroso de salida.

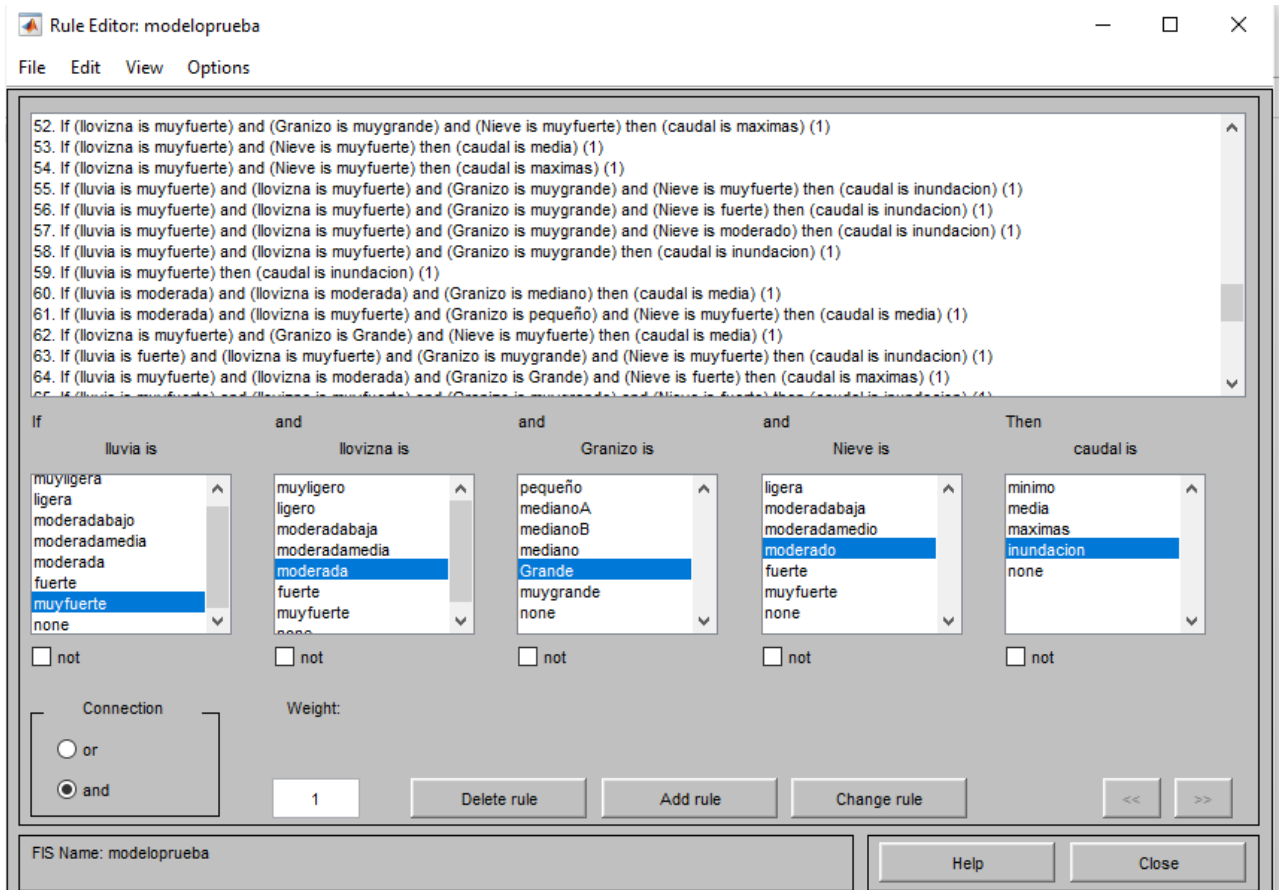


Figura 7. Rule editor

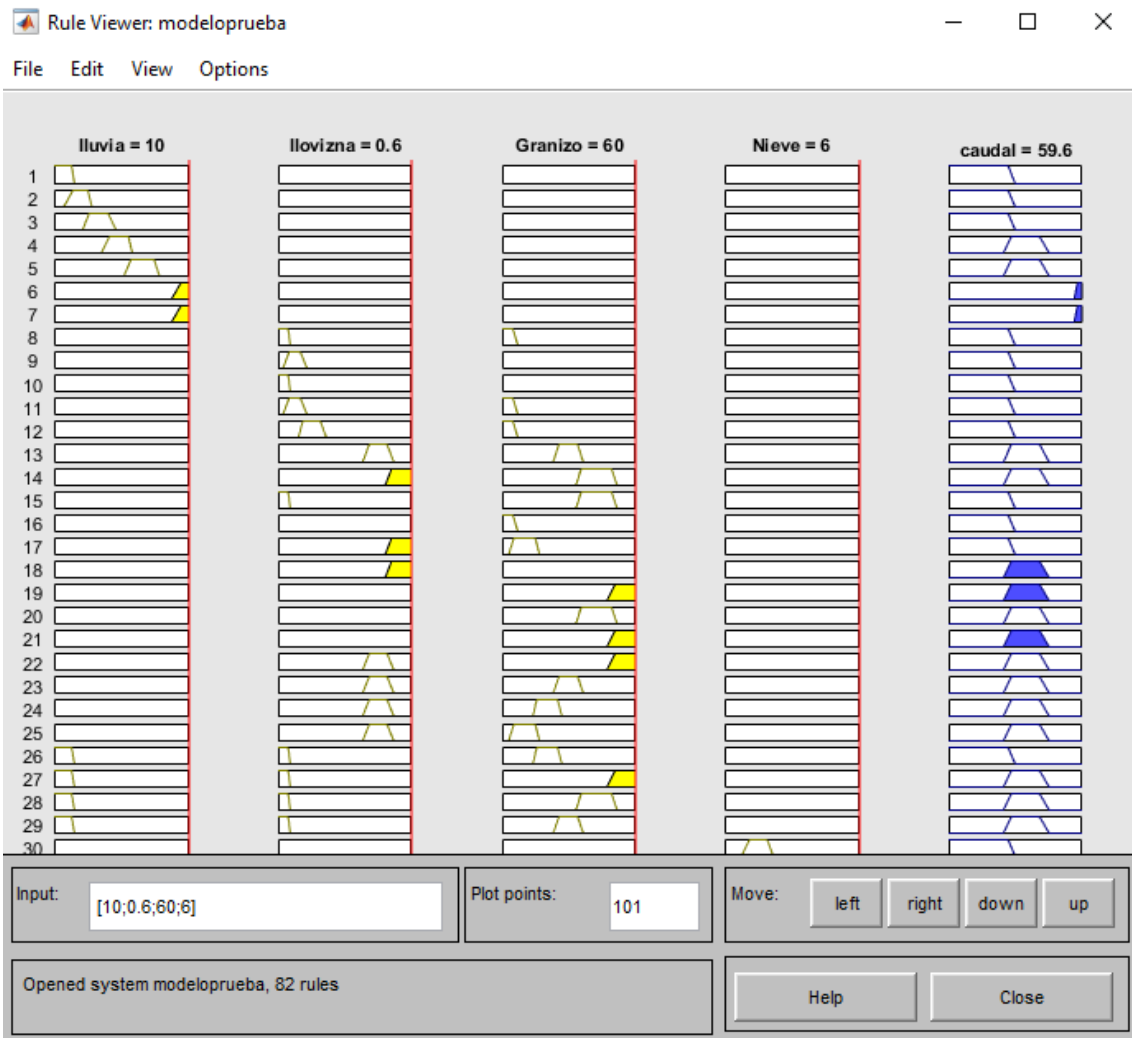


Figura 8. Reglas expresadas con las funciones de pertenencias y del conjunto difuso a defusificar.



Figura 9. Reglas expresadas con las funciones de pertenencias y del conjunto difuso a desfuzzyficar

Las columnas amarillas de los gráficos manifiestan cómo se utilizan las variables de entrada en las reglas. Las columnas azules del gráfico muestran cómo se utiliza la variable de salida en las reglas. El gráfico inferior derecho muestra cómo se combinan los resultados de cada regla para producir un desenfoque de salida único “desfuzzyficar”

4.1.7 Defuzzificación de los resultados

El resultado final habitualmente es necesario expresarlo mediante un valor crisp. En esta etapa se toma dar un valor de salida. Existen varios métodos de defuzzificación, pero en este caso utilizamos el centroide; que calcula el punto donde una línea vertical divide el conjunto en dos áreas con igual masa

$$C(x) = \frac{\sum_{i=1}^4 \mu_{A_i}(u_j) x u_{i_m}}{\sum_{i=1}^4 \mu_{A_i}(u_j)}$$

donde: $\mu_{A_i}(u_j)$: es el valor calculado de la función de pertenencia pronosticado de caudal x.

u_{i_m} : son los puntos medio de los intervalos

El pronóstico del caudal de la cuenca del Rio Huaura, se avalúa con un sistema de inferencia difuso, basados en precipitaciones pluviales.

Utilizando el software Matlab y analizando en el sistema de inferencia difuso resulta:

En la regla 1. Si (lluvia es ligera) and (llovizna es débil) and (granizo es pequeño) and (nieve es ligera) then (caudal es mínimo).

Analizando esta regla encontramos que si lluvia es ligera de 0.219, llovizna 0.0296, el granizo de 0.0 y la nieve es 0.0 entonces al caudal es mínimo de 19,9 m³/s

En la regla 18. Si (lluvia es fuerte) and (llovizna es fuerte) and (granizo es grande) and (nieve es fuerte) then (caudal es máximo).

Analizando esta regla encontramos que si lluvia es fuerte de 10.00, llovizna 0.6, el granizo de 60.00 y la nieve es 6.0 entonces al caudal es máximo de 59,6

Los resultados de muestran en la tabla.

Tabla 5

Resultados del pronóstico de la caudal de rio Huaura(m3/s) estación Sayán puente Alco.

No	Luvia(mm/h)	Lovizna(mm/h)	Granizo(mm)	Nieve(mm/h)	Caudal(m3/s)
01	0.219	0.0206	0	0	19.9
02	0.0313	0.0319	3.54	0.356	21.3
03	1.28	0.0356	2.05	0.131	21.6
04	0.469	0.0356	2.05	0.131	21.7
05	0.156	0.394	3.54	0.356	22.0
06	0.682	0.0415	5.91	1.06	22.6
07	3.71	0.208	19.5	2.72	23.3
08	3.03	0.407	14,3	2.94	30,6
09	8.59	0.407	14,3	2.94	43.9
10	8.59	0.504	28.9	3.24	48
11	5.53	0.346	35.9	3.74	48.3
12	6.29	0.429	51.4	4.48	51.6
13	8.41	0.475	51.4	5.31	53.8
14	9.17	0.6	58.6	5.68	59.3
15	3.79	0.346	30	2.83	34.2
17	5.28	0.444	30	2.83	40.9
18	10	0.6	60	6	59,6

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6

Información del caudal medio de río Huaura(m3/s) estación Sayán puente Alco

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Prom. Anual
1960	35.255	40.133	34.976	22.917	13.815	9.743	8.608	7.507	7.346	9.684	12.183	9.605	17.648
1961	25.267	43.469	40.415	35.395	17.450	11.855	8.694	8.009	8.122	8.925	19.064	41.300	22.330
1962	43.684	45.671	66.934	43.844	16.592	11.817	11.272	10.076	10.213	11.422	15.229	17.143	25.325
1963	38.047	49.661	70.279	43.179	18.862	12.902	10.163	10.579	10.583	11.458	24.361	40.933	28.417
1964	26.784	51.763	72.776	50.012	22.805	15.801	13.375	12.098	11.889	16.019	19.969	15.749	27.420
1965	25.011	42.348	65.502	24.285	13.819	11.548	10.694	9.924	9.838	10.342	11.408	14.084	20.734
1966	33.912	23.327	38.045	20.835	14.505	10.843	9.797	10.019	9.727	19.989	19.151	26.980	19.761
1967	35.318	92.252	74.506	31.995	21.267	17.101	15.045	13.298	13.356	21.628	20.951	22.700	31.618
1968	28.120	23.853	37.913	19.573	12.350	10.804	9.840	10.543	10.855	14.357	16.552	16.730	17.624
1969	13.291	29.870	37.956	26.241	12.016	11.255	10.139	8.629	8.055	10.928	12.613	40.783	18.481
1970	62.481	42.554	40.500	35.707	25.629	19.980	14.884	13.294	17.117	17.571	19.027	28.397	28.095
1971	37.934	45.229	71.983	41.859	20.763	16.729	13.532	11.813	11.254	16.345	14.778	23.584	27.150
1972	37.641	32.813	111.84	76.810	32.530	16.351	13.490	12.478	12.811	15.380	14.670	30.164	33.915
			6										
1973	54.287	78.980	109.75	74.665	34.098	17.022	14.677	12.351	14.200	24.980	23.463	44.218	41.891
			4										
1974	58.763	76.537	71.314	52.108	27.472	17.901	14.031	13.290	14.236	15.744	16.066	16.694	32.846
1975	42.005	36.750	84.810	42.017	24.588	14.379	11.010	9.877	11.931	16.497	16.284	18.069	27.351
1976	43.749	73.025	77.305	43.222	17.816	15.452	13.506	13.205	13.191	12.580	13.378	14.937	29.281
1977	24.707	50.595	56.410	27.527	15.481	12.216	12.250	11.489	11.344	12.356	22.681	24.983	23.503
1978	27.381	56.954	32.029	22.123	14.065	11.913	11.869	11.320	11.656	12.594	19.486	20.041	20.953
1979	22.532	45.945	75.099	48.164	28.167	13.976	11.629	11.003	11.729	13.484	12.034	14.287	25.671

1980	41.285	32.595	35.177	29.423	11.741	7.458	8.368	7.247	8.987	16.235	17.985	32.754	20.771
1981	35.963	74.818	98.387	24.053	14.505	10.276	8.445	10.203	10.350	10.816	15.918	26.113	28.321
1982	27.90	60.90	37.70	39.30	16.60	11.00	8.20	8.40	10.60	13.10	28.90	35.30	24.825
1983	55.90	36.40	60.70	61.30	23.10	9.00	9.70	9.60	9.30	11.20	14.40	21.90	26.875
1984	29.87	100.88	158.91	84.70	31.40	13.98	10.11	10.53	10.14	19.92	15.61	41.24	43.941
1985	27.36	68.26	136.55	74.35	36.89	25.41	18.02	16.18	18.25	15.57	11.85	27.56	39.687
1986	109.80	107.40	131.60	92.10	44.70	14.20	11.90	12.40	12.70	13.20	12.80	25.60	49.033
1987	67.90	117.00	60.30	21.30	12.70	11.10	11.50	14.90	12.70	12.70	19.10	25.60	32.233
1988	45.50	82.50	28.10	52.10	26.50	11.10	9.90	8.50	9.80	13.60	13.90	19.20	26.725
1989	84.80	113.60	135.60	68.80	32.90	25.20	17.50	12.60	11.90	21.00	22.60	12.10	46.550
1990	40.51	25.38	33.42	14.84	12.17	12.42	11.25	10.11	8.12	20.11	33.03	33.50	21.239
1991	33.21	39.71	128.23	27.23	18.16	12.01	11.03	10.69	11.80	17.55	21.52	16.56	28.976
1992	21.88	13.39	25.29	18.18	11.17	10.75	8.99	7.96	8.67	11.43	10.38	9.46	13.130
1993	19.65	38.03	36.46	30.18	16.27	12.10	12.06	11.16	10.19	12.57	20.48	23.18	19.36
1994	37.23	67.05	65.60	56.47	34.27	20.76	16.89	12.87	13.14	13.62	16.29	15.14	30.777
1995	24.16	23.89	38.47	29.12	10.22	7.81	6.28	5.61	6.24	7.21	11.10	14.82	15.154
1996	25.40	49.00	55.90	44.90	18.36	11.10	8.10	6.60	6.70	7.30	9.50	11.80	21.222
1997	20.23	45.10	39.00	11.20	9.60	7.20	6.60	6.70	10.80	12.60	15.10	29.70	17.819
1998	56.30	93.40	97.48	78.89	22.10	14.35	12.80	10.93	10.70	13.82	12.68	12.30	36.313
1999	24.50	76.70	76.90	44.90	27.60	19.30	15.90	12.30	12.00	13.80	12.00	18.70	29.550
2000	35.90	67.50	87.60	58.00	27.40	16.00	15.60	15.40	14.10	16.50	13.50	19.80	32.275
2001	55.08	54.45	84.10	42.67	16.70	13.98	12.23	12.18	12.47	12.22	20.13	22.13	29.862
2002	20.26	41.23	64.74	48.63	19.31	15.26	14.48	13.91	13.63	16.13	19.67	25.01	26.022
2003	35.30	49.86	58.97	36.77	20.28	15.91	14.25	13.96	14.29	13.86	13.93	20.04	25.618
2004	18.11	32.38	27.79	22.45	14.49	12.17	11.98	9.18	10.89	16.85	30.56	36.34	20.265

2005	39.35	31.63	43.31	34.41	16.95	13.88	9.96	12.24	11.95	11.70	12.19	14.10	20.973
2006	22.87	47.76	64.16	71.32	16.55	13.01	11.74	12.06	13.82	14.39	19.60	21.89	27.430
2007	42.70	52.18	96.11	73.47	28.83	15.57	12.89	12.38	12.60	15.94	21.34	14.76	33.230
2008	49.82	57.76	48.76	32.42	16.45	13.71	11.77	10.78	11.09	11.77	11.64	14.97	24.245
2009	43.27	82.66	96.90	80.60	26.88	17.16	15.12	12.09	12.27	15.35	24.79	65.99	41.090
2010	80.30	61.80	74.67	56.58	21.37	13.10	12.49	11.31	12.36	13.60	15.99	40.48	34.504
2011	59.64	78.44	69.75	89.91	30.86	15.68	12.84	10.74	13.06	14.79	24.54	50.02	39.189
2012	56.07	89.54	83.87	94.38	45.16	23.75	18.73	13.20	12.11	15.71	32.06	40.20	43.732
2013	52.96	75.07	119.25	51.66	22.53	16.23	15.94	12.78	13.45	18.20	23.03	38.52	38.302
2014	50.32	69.97	99.22	46.07	39.24	18.39	13.82	13.57	13.77	15.03	18.69	28.37	35.538
2015	64.41	76.96	104.31	70.07	36.20	20.70	14.21	12.80	13.09	14.59	18.99	33.10	39.953
2016	23.09	54.05	61.47	38.32	16.70	11.71	10.87	10.54	11.55	12.95	12.26	13.19	23.058
2017	50.33	82.14	155.91	88.95	32.10	15.59	13.81	12.31	12.43	13.67			47.723
Media	40.436	57.812	72.259	46.940	22.122	14.274	12.151	11.167	11.577	14.360	17.744	25.137	28.832
Maximo	109.800	117.000	158.913	94.380	45.160	25.407	18.730	16.175	18.251	24.980	33.030	65.990	

Fuente: SENAMHI

4.2. Discusión

En la investigación se observa que el sistema de inferencia difuso nos ayuda a pronosticar el caudal de la cuenca del río Huaura, aproximándose a los datos reales obtenidos por Servicio Nacional Meteorología e Hidrología del Perú.

Según Niño S. (2013) para “Pronóstico de recursos hídricos, por medio de lógica difusa” utilizó distintas configuraciones de parámetros de diseño que permitieron seleccionar las implicaciones mínimo y producto como las que generan pronóstico de mejor calidad.

También se analizó que las mediciones más precisas que arroja el sistema son aquellas con implicaciones mínimas, producto, Goguen y Godel, ya que su error promedio (ME) es el más pequeño entre los demás y el más cercano al flujo.

Según Jordán, C.(2009). Para el “Ajuste de un modelo lluvia y caudal para la cuenca del río Paute aplicando el modelo Neuro difuso ANFIS” presenta la aplicación de un sistema de inferencia adaptativo basado en redes (ANFIS) para desarrollar y adaptar un modelo de precipitación y escorrentía. Las simulaciones se realizaron con diferentes combinaciones de variables de entrada considerando múltiples períodos pasados de precipitación y afluencia. Se utilizó el modelo del coeficiente de determinación entre caudales simulados y reales para un período de tiempo determinado. El resultado obtenido del modelo muestran que el modelo ANFIS produce excelentes resultados en comparación con un modelo de regresión estadística.

Según Zuñiga,A(2009) en su investigación “Pronóstico de caudales afluentes para la Planificación de la Operación de Sistemas Hidrotérmicos de Potencia aplicando el modelo ANFIS”

Este trabajo presenta la predicción de los caudales de entrada promedio mensuales para dos plantas hidroeléctricas en Ecuador (Daule – Peripa y Paute – Molino) utilizando uno de los modelos de redes neuro-difusas más populares llamado ANFIS (Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System). Se comparó el desempeño de ANFIS con el pronóstico obtenido aplicando un modelo de series de tiempo de promedio móvil autorregresivo periódico PARMA y con flujos reales para un período de 5 años (2009 – 2013) mediante la aplicación de las métricas de error utilizadas. A menudo se utiliza en predicciones utilizando técnicas de redes neurodifusas. Estos resultados son de gran importancia para el sector eléctrico, ya que una buena previsión de los caudales

mensuales garantiza una planificación óptima del funcionamiento de las centrales hidroeléctricas.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Luego de terminar la investigación presente, llegamos a puntualizar las siguientes conclusiones:

Para lograr el objetivo de este trabajo de investigación que es pronosticar el caudal de la cuenca del río Huaura mediante un sistema de inferencia difuso basado en precipitaciones se definió el universo discurso

Se ha comprobado que con la información de las precipitaciones se pronostica los caudales del río Huaura.

Se evidencia que el sistema de inferencia difuso ayuda a pronosticar el caudal del río Huaura mediante las precipitaciones pluviales.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda considerar más variables de entrada y hacer una visita de campo para obtener la muestra y así comparar con el resultado que se obtiene.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA Y VIRTUAL

Referencias Bibliográfica

- Acosta, H. N. (2006). Diseño de Controladores dedicados a la lógica difusa. Madrid, España: Universidad Autonoma de Madrid.
- Administración local de Agua Huaura (2010). Evaluación de recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Huaura. Lima.
- Autoridad Nacional de Agua (2013). Plan Nacional de recursos hídricos en el Peru. memoria 2013. Lima
- Aguirre, M. (1998) Estudio del Balance Hídrico de la cuenca del rio Huaura. Lima.
- Chereque, W. N. (1989). Hidrologia para estudiantes de Ingenieria Civil. Lima, Peru: Pontificia universidad catolica del Peru.
- Días, J. (2009). Modelo para el ajuste de pronósticos agregados utilizando lógica difusa. Chihuahua. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez Chihuahua
- Garcia Ruesta, J. (2012). Modelo de perdidas para determinar precipitacion efectiva usando sistema de informacion geografica. Universidad de Piura. Perú
- Galindo J. (2007) Conjunto y Sistemas difusos sistema de informacion geografica. Universidad de Malaga. España
- Gonzales, A. (2014). Medicion de caudal. Medellin. Colombia.
- González C. (sd). Lógica Difusa. En Técnicas de Softcomputing
- Herencia, B. y Carrera, C. (2019). Estimacion caudales medios y maximos de la cuenca del rio Checra mediante ecuaciones sintéticas y racionales. Revista del Instituto de Investigación FIGMMG-UNMSM, Volumen No 22, 2019: pp. 100-110. <http://dx.doi.org/10.1538/iigeo.v22i44.17282>.
- Hernandez Sampieri, R, Fernandez Collado, C. y Baptista Lucio, P. (2004) Metodología de la Investigación. México. Mc. Craw Hill.
- Jordán, C ; Medina, D. & Zuñiga, A. (2009). Ajuste de un modelo Lluvia - Caudal para la cuenca media del Rio Paute Aplicando el modelo Neuro . Difuso ANFIS. Revista Tecnológica ESPOL – RTE, Vol. 22, N.2,27-36.

- Martínez, N., & Andrade, H. (2016). Integración de la lógica difusa a la dinámica de sistemas para la selección de terrenos de cultivos agrícolas. *Revista Elementos* , 149-166.
- Mason de la Fuente, S. E. (2023). Desarrollo de un modelo para la predicción de caudales y volúmenes de embalse en el trasvase Tajo-Segura empleando lógica difusa.
- Niño, E. (2013). Pronóstico de recursos hídricos, por medio de lógica difusa. Tesis para optar por el título de ingeniero electrónico y telecomunicaciones. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- Ramiro, W. y Aguilera, E. (2014). Determinación de caudales en cuencas con poca información hidrológica. *Revista Ciencia UNEMI*, Volumen No 02, pp. 100-110. ISSN: 1390-4272.
- Reina, D. (2008). Fundamentos de la matemática difusa.
- Segura, A y Obregón N. (2005). Un modelo de lógica difusa y conjunto difusos para el pronóstico de los niveles medios diarios del río Magdalena en la estación Limnigráfica de Puerto Salgar, Colombia.
- Villacorta , S., Chira, J., Ochoa, M., Sánchez, M., Pari, W., & Valencia, M. (2010). Estudio geoambiental de la cuenca del río Huaura. Lima.
- Villacorta, S. (2010). Estudio Geoambiental de la cuenca del río Huaura. *Boletín* 41. Serie C. Lima.
- Zuñiga, A. Aguirre, D. (2010). Pronóstico de caudales afluentes para la planificación de la operación de sistemas hidrotérmicos de potencia aplicando el modelo ANFIS. Guayaquil, Ecuador.
- Zadeh, L.(1965). Fuzzy sets. *Information and control*, vol. 8 (1965), pp. 338–353. - L. A. Zadeh. Similarity relations and fuzzy orderings. *Information sciences*, vol. 3 (1971), pp. 177–200
- Lujano, E. (2014). Pronóstico de caudales medios mensuales del río Ilave usando modelos de redes neuronales artificiales. Puno: Universidad Nacional del Altiplano. Disponible en:
<http://huajsapata.unap.edu.pe/ria/index.php/ria/article/view/93>
- Musayon, J. (2013). Análisis y situación de la Cuenca hidrográfica del río Huaura. <https://issuu.com/pepelhc/docs/01-ancajima-ana>