

**USO DEL MÉTODO DE GASTOS PREVENTIVOS PARA VALORAR EL
BENEFICIO DEL CONTROL DE SEDIMENTOS EN CUENCAS ALTAS
PRODUCTORAS DE AGUA PARA ABASTECIMIENTO HUMANO
(CASO : CUENCA RIO MUCUJEPE)**

Por

Anna Paola La Rotta

**Trabajo de grado para optar al título de Magister Scientiae
en Gestión de los Recursos Naturales Renovables y Medio Ambiente**

**Universidad de Los Andes
Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación
Ambiental y Territorial
Mérida, Venezuela
2005**

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a toda mi familia especialmente a mis padres cuyo apoyo incondicional fue de vital ayuda para culminar este esfuerzo, a la empresa Aguas de Mérida y todo el personal que labora en la misma , al C.D.C.H.T , a todo el personal del C.I.D.I.A.T que de una u otra forma aportó su grano de arena y en general a todas las personas que dedicaron su tiempo y conocimiento al desarrollo de este trabajo.

INDICE

	Pág.
AGRADECIMIENTO.....	iii
LISTA DE TABLAS.....	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN.....	xvi
Capítulos	
1. CONCEPTUALIZACIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.1. Definición del problema y justificación.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo general.....	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	3
2.1. Fenómeno de erosión – transporte de sedimentos en cuencas.....	3
2.1.1. Procesos erosivos en una cuenca.....	3
Remoción en masa.....	3
Remoción hídrica.....	3
2.1.2. Clasificación de los sedimentos.....	5
Carga de fondo.....	5
Sedimentos en suspensión.....	6
Sedimentos en saltación.....	6
2.2. Ecuación universal de pérdidas de suelo modificada: MUSLE.....	6
2.2.1. Factor de erodabilidad (K).....	7
2.2.2. Factor de cobertura y administración de la tierra (C).....	7
2.2.3. Factor prácticas de conservación (P).....	7
2.2.4. Factor longitud de la pendiente y pendiente (LS).....	7
2.3. Prácticas agronómicas de conservación de suelos.....	8
2.3.1. Cultivo de cobertura.....	8
2.3.2. Barreras vivas.....	8
2.3.3. Cultivo en fajas.....	8
2.3.4. Cultivo en contorno.....	9
2.3.5. Terrazas.....	9

INDICE (Cont.)

	Pág.
2.4. Abastecimiento humano mediante fuente de agua superficial.....	9
2.4.1. Impurezas y estándares de calidad.....	9
2.4.2. Sistema de suministro.....	11
Obra de captación.....	12
Sedimentación.....	12
Planta potabilizadora de agua.....	12
2.5. El método de gastos preventivos.....	20
2.5.1. Economía de la calidad ambiental.....	21
2.5.2. Análisis de costo-beneficio.....	23
Determinación de los beneficios.....	25
Determinación de los costos.....	25
2.6. Indicadores de rentabilidad.....	26
2.6.1. Valor presente.....	26
2.6.2. Factor de recuperación de capital (FRC).....	26
2.6.3. Costo anual equivalente (CAE).....	27
3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	29
3.1. Descripción de la cuenca del río Mucujepe.....	29
3.1.1. Ubicación de la cuenca.....	29
3.1.2. Clima.....	30
Precipitación.....	30
Temperatura.....	30
Viento.....	31
3.1.3. Relieve.....	31
3.1.4. Sistema hidrográfico.....	33
3.1.5. Suelo.....	33
3.1.6. Vegetación y uso actual de la tierra.....	33
Bosques naturales.....	33
Bosque intervenido.....	37
Vegetación paramera.....	37
Pastizales arbolados.....	37
Pastizales puros.....	37
Matorral.....	37
Cultivos anuales.....	38
Cultivos permanentes.....	38

INDICE (Cont.)

	Pág.
3.1.7. Escorrentía.....	39
3.1.8. Producción de sedimentos.....	39
3.2. Sistema de suministro de agua para la ciudad de El Vigía.....	39
3.2.1. Captaciones en los ríos Cacique y Caña Brava.....	43
Captación del río Cacique.....	45
3.2.2. Líneas de conducción.....	45
3.2.3. Planta potabilizadora Mucujepe.....	46
Mezcla rápida.....	46
Mezcla lenta y clarificadores.....	47
Filtración.....	47
Tanque de agua filtrada.....	48
Dosificación de productos químicos.....	48
4. METODOLOGÍA.....	51
4.1. Recopilación y producción de información básica.....	52
4.1.1. Información requerida para la implementación de un modelo de producción de sedimentos acoplados a un modelo hidrológico. Modelo SWA (Soil and Water Assessment Tool) desarrollado por el Dr. Jeff Arnold para Agricultural Research Service (ARS).....	52
Mapas.....	52
Información climatológica.....	52
4.1.2. Información requerida para la implementación del método de gastos preventivos.....	52
4.2. Implementación en la cuenca a estudiar, de un modelo de producción de sedimentos acoplados a un modelo hidrológico.....	52
4.2.1. Delineación de la cuenca.....	52
4.2.2. Módulo uso de la tierra y tipo de suelo.....	53
4.2.3. Definición de los parámetros climáticos.....	55
4.2.4. Corrida de SWAT.....	56
4.2.5. Ajuste y modificación de los parámetros de entrada.....	57
4.3. Simulación mediante el modelo implementado, de diferentes escenarios de prácticas de conservación de suelos y vegetación.....	58
4.4. Determinación de la concentración de sólidos suspendidos que ingresan a la planta de tratamiento a nivel mensual para cada uno de los escenarios planteados.....	59

INDICE (Cont.)

	Pág.
4.5. Implementación y desarrollo de un muestreo simultáneo a fin de determinar la concentración de sedimentos en la captación y turbidez del agua que ingresa a la planta de tratamiento.....	59
4.6. Determinación de una relación entre sedimentos en suspensión y turbidez.....	59
4.7. Determinación de una relación entre turbidez – dosis de coagulante – costos de potabilización.....	59
4.8. Aplicación del método de gastos preventivos para valorar el efecto del control de los sedimentos en la cuenca sobre los costos de potabilización del agua.....	60
4.8.1. Determinación de la variación en los costos de potabilización para los diferentes escenarios planteados.....	60
4.8.2. Estimación de los costos anuales necesarios para el desarrollo de las diferentes prácticas de conservación.....	60
4.8.3. Realización de una comparación entre los costos de implementación de prácticas de conservación y los costos de reducción en el proceso de potabilización de agua.....	60
5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	61
5.1. Obtención mediante modelación con SWAT la producción de sedimentos para diferentes escenarios planteados.....	61
5.2. Determinación de la concentración de sólidos en suspensión que ingresa a la planta potabilizadora.....	64
5.3. Desarrollo de un muestreo simultáneo a fin de determinar la concentración de sedimentos en la captación y turbidez del agua que ingresa a la planta de tratamiento.....	71
5.4. Determinación de una relación entre sedimentos en suspensión y turbidez.....	72
5.5. Determinación de una relación entre turbidez – dosis de coagulante – y costos de potabilización.....	73
5.6. Aplicación del método de gastos preventivos para valorar el efecto del control de los sedimentos en la cuenca sobre los costos de potabilización del agua.....	74
5.6.1. Determinación de la variación en los costos de potabilización para los diferentes escenarios planteados.....	74
5.6.2. Estimación de los costos anuales necesarios para el desarrollo de las diferentes prácticas de conservación.....	77
5.6.3. Realización de una comparación entre los costos de implementación de prácticas de conservación y los costos de reducción en el proceso de potabilización de agua.....	79

INDICE (Cont.)

	Pág.
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	83
BIBLIOGRAFIA.....	85
APENDICES.....	87
APENDICE A:	89
APENDICE B:	93
APENDICE C:	115

LISTA DE TABLAS

Tabla	Pág.
2.1. Requisitos de la calidad del agua superficial en Venezuela (Tomado de la Gaceta Oficial de la República de Venezuela, viernes 13 de febrero de 1988)..	10
3.1. Proyecciones de población y demanda de agua en la ciudad de El Vigía (TAHAL, 1995).....	42
4.1. Aproximación a los tipos de uso en la cuenca.....	54
5.1. Producción de sedimentos anuales en ton/ha.....	65
5.2. Valores de sólidos en suspensión (mg/l), al ingreso de la planta potabilizadora	67
5.3. Valores de sólidos en suspensión y turbidez para muestras tomadas durante periodos de lluvia.....	72
5.4. Costos de reducción obtenidos para la Práctica 2.....	76
5.5. Resumen costos de reducción o incrementales en el proceso de potabilización.	77
5.6. Costos para el establecimiento de prácticas de conservación de suelos y aguas. Tomado y adaptado de (PRISMA, 2001).....	78
5.7. Costos anuales necesarios para la implementación y mantenimiento de las diferentes prácticas de conservación en la cuenca.....	79
5.8. Costos anuales equivalentes para el desarrollo de las diferentes prácticas propuestas.....	80
5.9. Porcentajes de los costos de las prácticas de conservación que podría asumir la empresa.....	82

LISTA DE FIGURAS

Figura	Pág.
2.1. Sistema convencional de abastecimiento de agua para consumo humano.....	11
2.2. Planta potabilizadora convencional de agua. (Tomado de Arboleda (1998)).....	12
2.3. Distribución de los sólidos según su tamaño.....	13
2.4. Reacciones del cloro en agua cruda.....	19
2.5. Relación dosis de cloro y formas de cloro residual.....	20
2.6. Funciones de daños.....	22
2.7. Funciones de los costos marginales de reducción.....	23
2.8. Nivel eficiente de emisiones.....	24
2.9. Determinación de beneficios totales en la curva de daño marginal.....	25
3.1. Ubicación del área de estudio.....	29
3.2. Precipitación promedio mensual en las estaciones cercanas a la cuenca del río Mucujepe	30
3.3. Temperaturas en la estación de el aeropuerto El Vigía (1993-2002).....	31
3.4. Mapa de relieve en la parte media y alta de la cuenca Mucujepe (Tomado y modificado por mapas de la Empresa Aguas de Mérida).....	32
3.5. Sistema hidrográfico en la parte media y alta de la cuenca Mucujepe (Tomado y modificado por mapas de la Empresa Aguas de Mérida).....	34
3.6. Mapa de suelos existentes en la cuenca del río Mucujepe (Mapa digitalizado por la tesista con información suministrada por la empresa Aguas de Mérida).	35
3.7. Mapa de uso actual en la cuenca del río Mucujepe (Mapa digitalizado por la tesista con información suministrada por la empresa Aguas de Mérida).....	36
3.8. Porcentajes de los usos y tipos de vegetación existentes en la cuenca media y alta del río Mucujepe.....	38
3.9. Caudales en los ríos Cacique y Caña Brava (Solsona, 1990).....	40
3.10. Caudales en los ríos Cacique y Caña Brava (Información suministrada por Aguas de Mérida, 2004).....	41
3.11. Dique toma sobre el río Caña Brava.....	43
3.12. Ubicación obras de captación sobre los ríos Cacique y Caña Brava.....	44
3.13. Obra de captación sobre el río Cacique	45
3.14. Venturi para la medición de caudal.....	46
3.15. Sistema de coagulación, floculación y clarificación.....	47
3.16. Filtro rápido de arena en la Planta de Mucujepe.....	48
3.17. Sistema de dosificación de productos químicos.....	49
4.1. Metodología empleada en el desarrollo del trabajo.....	51
4.2. Imagen ventana delineación de la cuenca.....	53
4.3. Ventana uso de la tierra y suelo.....	54

4.4.	Definición de parámetros climáticos.....	55
4.5.	Parámetros estadísticos para el generador climático.....	56
4.6.	Ventana para la corrida del modelo SWAT.....	57
4.7.	Valores de caudales observados y simulados en la estación Los Naranjos para el año de 1973.....	58
5.1.	Mapa de uso actual sobre la cuenca del río Mucujepe (Mapa realizado por la tesisista, con uso de información suministrada por Aguas de Mérida).....	62
5.2.	Distribución de usos en porcentaje para los diferentes escenarios planteados...	63
5.3.	Concentración de sólidos en suspensión esperada a la entrada de la planta potabilizadora.....	69
5.4.	Variación de los sólidos en suspensión para las diferentes prácticas realizadas sobre las cuencas de los ríos Cacique y Caña Brava.....	70
5.5.	Variación de los sólidos en suspensión para los escenarios negativos propuestos sobre las cuencas de los ríos Cacique y Caña Brava.....	71
5.6.	Función doblemente logarítmica que relaciona sólidos en suspensión con turbidez.....	73
5.7.	Función doblemente logarítmica que relaciona turbidez con dosis de coagulante.....	74
5.8.	Variación de los costos anuales equivalentes en los diferentes horizontes de planificación.....	81
5.9.	Variación de los porcentajes asumidos por la empresa para diferentes escenarios.....	83

RESUMEN

La intervención antrópica inadecuada sobre los recursos existentes en las cuencas altas productoras de agua ha llevado al detrimento de las mismas a lo largo de los últimos años. Algunas manifestaciones tangibles de este hecho son el aumento en la producción de sedimentos, inundaciones en las partes bajas y disminución de los caudales de estiaje entre otras.

Cuando uno de los principales usos que se da a las fuentes de agua existentes en una cuenca, es el suministro de agua potable a una población, un incremento en la producción de sedimentos implica un incremento en los insumos necesarios para desarrollar el proceso de clarificación y por consiguiente un aumento en los gastos en que tiene que incurrir la empresa prestadora del servicio de agua potable para llevar acabo el mismo.

Este trabajo pretende abordar esta problemática específicamente en la cuenca del Río Mucujepe, donde la intervención antrópica inadecuada cada día es más evidente y cuyas dos principales fuentes de agua los Ríos Cacique y Caña Brava sometidas a un proceso previo de potabilización, suministran actualmente la totalidad del agua potable a la ciudad del Vigía.

En el desarrollo de esta investigación , inicialmente se simuló la producción de sedimentos sobre las cuencas de los Ríos Caña Brava y Cacique mediante el uso del modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool). tanto para la situación actual de la cuenca, como para diferentes escenarios favorables (desarrollo de prácticas de conservación) y escenarios desfavorables (extensión de la frontera agrícola) planteados previamente; posteriormente y previa demostración de que estos valores se ajustaban a una distribución normal se buscó el valor esperado para una probabilidad del 95% en cada uno de los rios para cada uno de los diferentes escenarios planteados. Seguidamente se realizó un balance de masas para determinar la concentración de sedimentos que estaría ingresando a la planta potabilizadora Mucujepe.

Se establecieron diferentes funciones que permitieron relacionar sólidos en suspensión con costos de potabilización y de esta forma se pudo estimar mediante el uso del Método de Gastos Preventivos cual sería la variación en los costos de potabilización a nivel anual para los diferentes escenarios favorables y desfavorables planteados en el trabajo, demostrándose que el desarrollo de cualquier práctica de conservación sobre la cuenca produciría una reducción en los costos de potabilización.

Finalmente se buscó establecer una relación de beneficio/costo entre los costos de reducción en el proceso de potabilización al realizar prácticas de conservación sobre la cuenca y los costos necesarios para implementar y mantener dichas prácticas, obteniéndose una mayor relación para el desarrollo de la práctica de barreras vivas.

Palabras claves: *producción de sedimentos, insumos, método de gastos preventivos.*

CAPITULO 1

CONCEPTUALIZACIÓN DEL PROBLEMA

1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

En la fecha actual la cuenca del río Mucujepe constituye la fuente principal de abastecimiento de agua para la población de El Vigía, segunda ciudad en población del Estado Mérida. Diversas actividades antropogénicas desarrolladas en la parte media y alta de la misma durante los últimos años constituyen una amenaza a la calidad del agua proveniente de la misma, que podría limitar la operación adecuada de la planta potabilizadora Mucujepe.

La turbidez está asociada a la presencia de materia orgánica e inorgánica en el agua. Es conocido el hecho de que microorganismos patógenos pueden enmascararse en las partículas de sedimentos, haciéndose de esta manera no susceptibles a los procesos de desinfección, lo cual constituye un riesgo sanitario importante.

✓ El uso del agua del río Mucujepe para consumo humano, implica que la misma debe cumplir ciertos parámetros de calidad preestablecidos en las leyes Venezolanas. Para lograr el cumplimiento de estos parámetros el agua debe ser sometida a un proceso de tratamiento en el cual se lleven cada uno de estos parámetros a límites preestablecidos por normas. Uno de estos parámetros es la turbidez, la cual en caso de encontrarse por encima del límite, debe ser ajustada a través de procesos de clarificación (coagulación, sedimentación y filtración). El proceso de coagulación/floculación implica la adición de coagulantes al agua y por consiguiente un incremento en la turbidez implica un aumento en la cantidad de coagulantes necesarios para obtener un agua apta para el consumo humano.

Los coagulantes adicionados representan un costo dentro del proceso de tratamiento, el cual debe ser asumido por el estado en caso de que existan subsidios o por el consumidor en caso contrario.

El conocimiento de la producción de sedimentos asociados a determinadas prácticas de conservación de suelo y vegetación en una cuenca específica permite analizar en forma comparativa cuáles prácticas logran reducir la producción de sedimentos; una vez conocida la relación 'costo de tratamiento/ producción de sedimentos' se puede indagar la viabilidad económica de hacer trabajos de conservación y recuperación en la cuenca desde la perspectiva de la empresa que presta el servicio de potabilización del agua. Por tal motivo los objetivos de este trabajo se centran en la valoración a través del Método de Gastos Preventivos del beneficio del control de sedimentos en la cuenca del río Mucujepe.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Valorar a través del Método de Gastos Preventivos el beneficio del control de sedimentos en la cuenca del río Mucujepe, considerando fundamentalmente los costos asociados a los procesos de clarificación en la potabilización del agua.

1.2.2 Objetivos Específicos

- **Determinar, mediante simulación, el efecto de diferentes escenarios de prácticas de conservación de suelo y vegetación sobre la producción de sedimentos.**
- **Valorar el efecto del control de la producción de sedimentos en la cuenca sobre los costos asociados a los procesos de clarificación en la potabilización del agua.**

CAPITULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 FENOMENO DE EROSIÓN - TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN CUENCAS

2.1.1 Procesos erosivos en una cuenca

La cuenca vertiente contribuye con sedimentos a la carga total de una corriente natural de dos maneras:

- *Remoción en masa*

Este fenómeno está asociado con deslizamientos de grandes masas de material sólido que se han concentrado en sitios inestables. La inestabilidad es causada por factores geotécnicos que tienen que ver con las pendientes de los taludes, el manejo inadecuado del suelo, la tala de árboles y el almacenamiento de agua de lluvia en los suelos.

Las masas de material permanecen por algún tiempo en un equilibrio precario en los sitios inestables, pero basta la presencia de un factor detonante para que se produzca el deslizamiento. Este factor detonante puede ser un sismo, un período prolongado de lluvias intensas o la pérdida de soporte en el pie de un talud.

Cuando el deslizamiento se produce directamente sobre una de las márgenes de una corriente natural el material deslizado se deposita sobre el lecho obstruyendo el paso libre del agua, pero a medida que pasa el tiempo el mismo flujo de agua se encarga de transportar el material hacia aguas abajo, parte como carga de fondo y parte en suspensión. Si los deslizamientos se producen lejos de las corrientes de agua, entonces solamente una parte del material puede llegar a las corrientes por erosión hídrica.

- *Erosión hídrica*

La erosión hídrica se genera cuando las gotas de lluvia que caen sobre un suelo tienen suficiente energía para remover partículas del mismo, dejándolas libres para que puedan ser transportadas por la escorrentía superficial hacia las corrientes de drenaje.

En la actualidad la magnitud de la erosión hídrica se mide por medio de la pérdida de suelo.

Los estudios semiempíricos que existen sobre el tema consideran que sólo un porcentaje de la pérdida de suelo llega hasta la corriente de drenaje y puede entrar a formar parte de la carga en suspensión.

Los factores que actúan en la generación de la pérdida de suelo en una cuenca son los siguientes:

Lluvia. Es el agente que inicia el proceso erosivo. La magnitud de su efecto depende de su distribución temporal y espacial sobre la cuenca; para cuantificarla es indispensable analizar las intensidades de lluvias de corta duración, su frecuencia y el cubrimiento sobre el área de la cuenca.

Morfometría del área vertiente. Las características morfométricas de la zona potencialmente erosionable son el área, la longitud de recorrido de la escorrentía y la pendiente del terreno.

Suelo. Es un factor que incluye la textura y la estructura que tiene el suelo en el momento de comenzar las lluvias.

Cobertura vegetal. Es un factor muy importante en la generación y transporte de la erosión hídrica, especialmente en el período inicial del aguacero. Depende del tipo de cultivo, el sistema de siembra y las prácticas de manejo.

Wischmeier y Smith entre los años 1965 y 1976 (Wischmeier and Smith, 1978) tomaron los factores anteriores y desarrollaron un modelo de índices de vulnerabilidad para estimar la pérdida superficial de suelos en los Estados Unidos, rápidamente este modelo fue aplicado en otros países y es conocido actualmente como La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE). La USLE está basada en índices de vulnerabilidad y tiene la siguiente expresión matemática:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (2.1)$$

Donde:

A = Pérdida de suelo por unidad de superficie (ton/ha)

R = Factor de erosividad de la lluvia. Es el producto acumulado para el período de interés con cierta probabilidad de ocurrencia, de la energía cinética por la máxima intensidad en 30 min de lluvias (MJ.mm / ha.hora. Año).

K = Factor erosionabilidad del suelo. Cantidad de suelo perdido por unidad del factor R , cuando el suelo es mantenido permanentemente desnudo con laboreo secundario a favor de la pendiente. (ton.ha.h /ha.Mj.mm)

Los demás factores son adimensionales:

L = Factor longitud de la pendiente. Es la relación entre la erosión con una longitud de pendiente dada y la que ocurre en el estándar de 22,1m de longitud.

S = Factor inclinación de la pendiente. Es la relación entre la erosión con una pendiente dada y la que ocurre con el estándar de 9% de inclinación.

C = Factor de uso y manejo (cubierta vegetal). Es la relación entre la erosión de un suelo con un determinado sistema de uso y manejo y la que ocurre en el mismo suelo puesto en las condiciones estándar en que se definió el factor K .

P = Factor práctica de lucha contra la erosión. Es la relación entre la erosión que ocurre con una determinada práctica y la que ocurre con la condición estándar de laboreo a favor de la pendiente.

Cada uno de esos factores se puede calcular o estimar utilizando datos sobre el terreno (en los casos de R y LS) o tomados de cuadros o nomogramas (resto de los factores).

2.1.2 Clasificación de los sedimentos

Los sedimentos totales que transporta una corriente natural de agua se descomponen en:

- *Carga de fondo*

Está conformada por el material sólido que se mueve en el lecho de la corriente. Esta es alimentada por los sedimentos que conforman el lecho y por materiales gruesos que son transportados desde la cuenca.

- ***Sedimentos en suspensión***

Es el material fino que llega a la corriente como resultado de procesos de erosión pluvial de la cuenca o por lavado de material suelto en las márgenes.

- ***Sedimentos en saltación***

Se producen por causa de las irregularidades del fondo. Parte de la carga de fondo sube y se mantiene en suspensión por un período corto.

2.2 ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDAS DE SUELO MODIFICADA : MUSLE

MUSLE es una versión modificada de la Ecuación de Pérdidas de suelo (USLE) desarrollada por Wischmeier y Smith (1965). En la MUSLE: el factor de energía de la precipitación es reemplazado con un factor de escorrentía, mejorando la predicción de sedimentos y permitiendo que la ecuación sea aplicada a eventos torrenciales individuales.

La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Modificada es:

$$sed = 11.8 \times (Q \times qpico \times area)^{1.56} \times K_{USLE} \times C_{USLE} \times P_{USLE} \times LS_{USLE} \quad (2.2)$$

Donde:

Sed: es la cantidad de sedimento en un evento dado (Ton métricas)

Q : es el volumen de la escorrentía en la superficie de drenaje (mm/ha)

qpico: es el pico de la escorrentía (m3/s),

area: es el área de la cuenca (ha)

K_{USLE} : es el factor USLE de erodabilidad del suelo

C_{USLE} : es el factor USLE de cobertura

P_{USLE} : es el factor USLE de prácticas de soporte

LS_{USLE} : es el factor USLE topográfico

2.2.1 Factor de Erodabilidad (K)

Algunos suelos son más fácilmente erodables que otros aún cuando todas sus otras propiedades sean las mismas. Wischmeier y Smith (1978) definen el factor de erodabilidad del suelo como la tasa de pérdida de suelo por unidad índice de erosión ($11.8 \times (Q \times qpicó \times area)^{0.56}$) para un suelo específico medido sobre una unidad de ploteo. Una unidad de ploteo es 22.1 m de longitud, con una pendiente uniforme del 9%, en continuo barbecho, cultivado en la dirección de la pendiente. Continuo barbecho es definido como tierra que ha sido cultivada y mantenida libre de vegetación por más de 2 años. Este factor tiene unidades de masa por área por erosividad (ton .ha. hr/ (ha.MJ.mm)).

2.2.2 Factor de cobertura y administración de la tierra (C)

Es definido como la razón de pérdidas de suelo en tierra cultivada bajo unas condiciones específicas y la correspondiente pérdida bajo continuo barbecho (Wischmeier y Smith, 1978).

2.2.3 Factor Prácticas de Conservación (P)

Es definido como la razón entre pérdidas de suelo con una práctica de conservación específica y las pérdidas correspondientes sin prácticas y cultivos en dirección de la pendiente.

2.2.4 Factor Longitud de la pendiente y Pendiente (LS)

Es una relación adimensional entre la longitud de una pendiente dada y la longitud de una unidad de ploteo.

$$\left(\frac{l}{lu} \right)^m \quad (2.3)$$

Donde:

l = longitud de la pendiente dada.

lu = longitud de la unidad de ploteo (22.1 m).

m = exponente que depende de la caída de la pendiente.

2.3 PRÁCTICAS AGRONÓMICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELOS

Las prácticas agronómicas se han destacado mucho durante los últimos años, ya que cada día la degradación de los suelos a nivel mundial aumenta con el paso del tiempo y este tipo de prácticas parecen ser las más apropiadas debido a su facilidad de ejecución y costo relativamente bajo.

Estas prácticas pueden ser desarrolladas con la finalidad de reducir el impacto de los agentes de degradación o fortalecer las propiedades intrínsecas del suelo para que este sea más resistente a los procesos de degradación.

Algunas de las prácticas de conservación de suelos más comunes son: cultivos de cobertura, barreras vivas, cultivo en fajas y cultivo en contorno.

2.3.1 Cultivo de cobertura

En el desarrollo de esta práctica se establece una cubierta vegetal densa, una vez se ha cosechado el cultivo principal.

Mediante el desarrollo de esta práctica se logra reducir el escurrimiento superficial y por consiguiente aumentar la infiltración, adicionalmente la cubierta vegetal empleada puede ser usada posteriormente como abono verde.

2.3.2 Barreras vivas

Consiste en la colocación de hileras de plantas perennes, densas, sembradas en dirección transversal a la pendiente del terreno.

Mediante el desarrollo de esta práctica se busca reducir el poder erosivo del escurrimiento y retener partículas desprendidas mediante procesos erosivos.

2.3.3 Cultivo en fajas

Esta práctica consiste en el cultivo de franjas alternas de cultivos limpios (cultivos de escarda) con cultivos densos.

Este tipo de práctica se puede realizar en terrenos mecanizables, adaptándose bien a pendientes entre 2 y 20%. Mediante la implementación de esta práctica se logra: reducir el impacto de la lluvia por parte del cultivo denso, aumentar la infiltración y por consiguiente reducir la escorrentía que afectaría la faja de cultivo limpio.

2.3.4 Cultivo en contorno

En el desarrollo de esta práctica se labra, hacen surcos y siembra el cultivo en dirección perpendicular a la pendiente del terreno, siguiendo aproximadamente las curvas de nivel.

Mediante la implementación de esta práctica se logra: reducir la velocidad del escurrimiento, aumentar la infiltración y por consiguiente reducir la erosión.

El cultivo en contorno es recomendado para pendientes bajas, se estima que es efectivo en pendientes entre el 3% y 8%, si la pendiente es mayor esta debe ser complementada con otro tipo de prácticas.

2.3.5 Terrazas

Son estructuras o terraplenes que se construyen en sentido transversal a la dirección de la pendiente en terrenos inclinados, ondulados o en laderas, con la finalidad de modificar la longitud y magnitud de la pendiente para reducir la velocidad del agua de escorrentía, aumentar su infiltración en el suelo, desalojar los excedentes de agua a velocidades no erosivas y reducir la erosión.

2.4 ABASTECIMIENTO HUMANO MEDIANTE FUENTE DE AGUA SUPERFICIAL

2.4.1 Impurezas y Estándares de Calidad

Un agua absolutamente pura nunca es encontrada en la naturaleza y cada día es más raro encontrar una fuente de agua que no requiera un tratamiento antes de ser usada para el consumo humano. En el agua cruda son diversas las impurezas que se pueden encontrar, por tal motivo el método de tratamiento requerido para la remoción de las mismas o su disminución a límites preestablecidos dependerá del tipo de impurezas.

Las impurezas encontradas en un agua cruda, en condiciones naturales, son generalmente:

- Material suspendido
- Coloides
- Sólidos Disueltos (aluminio, calcio, sodio, potasio, hierro, manganeso, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, nitratos, generalmente)
- Polución orgánica (materia fecal , ácidos húmicos y fúlvicos)
- Algas tóxicas

Las Normas Venezolanas dictadas por el Ministerio de Salud y Desarrollo Social (MSDS), consideran que un agua potable es “aquella que es sana para el consumo humano”, y por lo tanto debe cumplir con los requisitos descritos en la Tabla 2.1

Tabla 2.1 Requisitos de la calidad del agua superficial en Venezuela (Tomado de la Gaceta Oficial de la República de Venezuela, viernes 13 de febrero de 1988)

Elementos o compuestos	Límites (mg/l)
Accites minerales	0,30
Aluminio	0,10
Arsénico total	0,01
Bario total	0,7
Cadmio total	0,003
Cianuro total	0,07
Cloruros	300
Cobre total	2,0
Cromo total	0,05
Detergentes	1,0
Dispersantes	1,0
Dureza como CaCO ₃	500
Extracto de carbono al cloroformo	0,15
Fenoles	0,002
Hierro total	0,5
Manganeso total	0,10
Mercurio total	0,001
Nitritos + Nitratos	10,0
Plata total	0,05
Plomo total	0,01
Selenio	0,01
Sodio	200
Sólidos disueltos totales	1500
Sulfatos	400
Zinc	5,0
Organofosforados y carbonatos	0,10
Organoclorados	0,20
Cloro residual libre en cualquier punto de la red	0,3 – 0,50
Radiactividad alfa global	0,1Bq/l
Radiactividad Beta global	1,0Bq/l

Continuación Tabla 2.1

Parámetro	Límite o rango máximo
Oxígeno disuelto	Mayor de 4 mg/l
pH	Mínimo 6 y máximo 8,5
Color real	Menor de 25, UCV
Turbiedad	Menor de 5 UNT
Fluoruros	Menor de 1,7 mg/l
Organismos coliformes totales	0 NMP por cada 100 ml

2.4.2 Sistema de suministro

Con el objetivo de suministrar agua potable a una población, es necesaria la construcción de una serie de obras civiles y sanitarias para su captación, purificación, almacenamiento y distribución. La Figura 2.1 presenta un esquema convencional de un sistema de abastecimiento de agua para consumo humano.

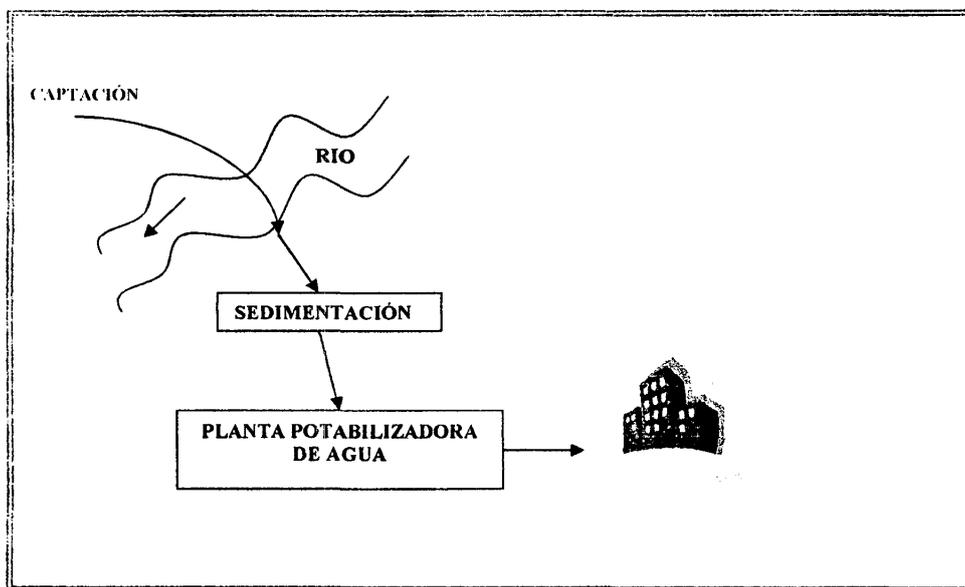


Figura 2.1 Sistema Convencional de abastecimiento de agua para consumo humano.

- **Obra de Captación**

El objetivo de esta estructura es derivar el caudal de diseño necesario para abastecer a una población determinada.

Esta estructura debe ubicarse en zonas donde el suelo sea estable y resistente a la erosión. Existen diferentes tipos de captaciones; los factores determinantes para la selección de la captación más adecuada son la naturaleza del cauce y la topografía en la zona.

En términos generales se habla de tres tipos de captaciones: captación lateral, captación de fondo y captaciones con embalses o lagos.

- **Sedimentación**

El propósito fundamental es sedimentar partículas en suspensión por acción de la gravedad, es decir la remoción de las partículas hasta el tamaño de las arenas ($\varnothing > 0.05$ mm). Para cumplir este objetivo se construye un tanque denominado desarenador, el cual debe estar ubicado lo más cerca posible a la obra de captación, con el fin de evitar problemas de abrasión y obstrucción en la línea de conducción.

- **Planta potabilizadora de agua**

La Figura 2.2 ilustra una planta potabilizadora convencional, la cual consta de los siguientes procesos:

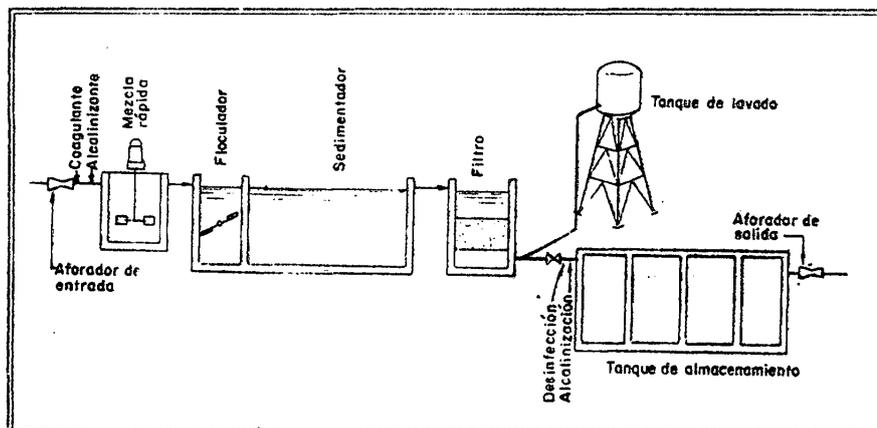


Figura 2.2 Planta potabilizadora convencional de agua. (Tomado de Arboleda (1998))

Procesos de Coagulación (mezcla rápida) y Floculación (mezcla lenta). Los sólidos se encuentran presentes en el agua en tres principales formas: Partículas suspendidas, coloides, y sólidos disueltos (moléculas). La Figura 2.3 ilustra el rango de medidas de diferentes materiales presentes en el agua.

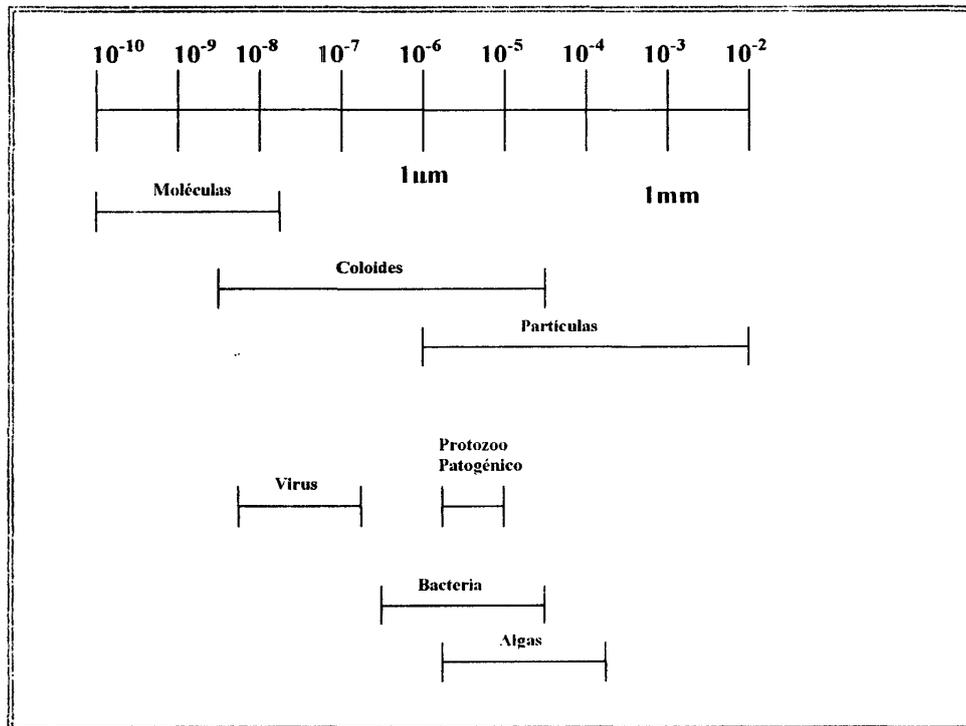


Figura 2.3 Distribución de los sólidos según su tamaño

Las partículas suspendidas varían en tamaño con una dimensión típica de $10 \mu\text{m}$. Los coloides son partículas muy finas, típicamente entre 10nm y $10 \mu\text{m}$ y finalmente los sólidos disueltos están presentes como moléculas individuales o como iones.

La remoción de coloides es frecuentemente el principal objetivo y el aspecto más difícil del tratamiento de agua convencional. Como resultado de su pequeño tamaño con gran área superficial, los efectos gravitacionales no son importantes. Los coloides son divididos en dos tipos: hidrofílicos e hidrofóbicos.

La razón por la que los coloides permanecen como partículas tan pequeñas es que las partículas tienen cargas eléctricas similares negativas, manteniendo las partículas separadas.

Con el objetivo de remover las partículas coloidales es necesario formar grandes partículas que puedan ser removidas por operaciones unitarias como la sedimentación y filtración. Para los coloides hidrofóbicos, es necesario vencer las fuerzas que mantienen las partículas separadas; una vez esto logrado, las partículas colisionan formando partículas más grandes; este proceso es llamado coagulación. La floculación es el proceso de mezcla en el cual colisionan las partículas formadas en la coagulación, logrando la formación de partículas relativamente más grandes y que pueden ser más fáciles de remover.

Los coloides hidrofílicos no pueden ser removidos tan fácilmente. Ellos normalmente tienen que ser removidos por precipitación química, filtración o adsorción. Sin embargo, algunos pueden ser removidos en la floculación, específicamente aquellos compuestos de largas moléculas orgánicas con múltiples cargas.

La floculación se genera a partir de tres principales procesos: el movimiento que las partículas tienen por sí mismas (movimiento browniano), la agitación inducida al líquido por fuerzas externas (paletas giratorias) y la gravedad o peso de las partículas que al caer tienden a aglomerarse. Para floculaciones iniciales de partículas con $\text{Ø} < 0.50\mu\text{m}$, el movimiento browniano es el principal proceso.

Para el caso en que actúan el movimiento browniano y la gravedad se habla de floculación pericinéctica y cuando la energía comunicada al líquido es generada por fuerzas externas, de floculación ortocinéctica.

- *Desestabilización de partículas.* Existen cuatro principales métodos de desestabilización
 - a. *Compresión de la doble capa.* Implica la adición de un electrolito al agua para incrementar la concentración de iones. Esto genera un efecto de disminución en el espesor de la doble capa que rodea la partícula coloidal, permitiendo que las partículas se muevan más cerca una a la otra y las fuerzas atractivas tienen más chance de vencer a las fuerzas repulsivas que las mantienen separadas. Este tipo de efecto es directamente proporcional al cambio en la concentración iónica e independiente de la concentración de material coloidal.
 - b. *Neutralización de la carga.* La adición de iones con una carga opuesta a la que posee el material coloidal puede llevar a la absorción de los iones sobre la superficie del material coloidal, esto reduce las fuerzas eléctricas que mantienen las partículas separadas y permiten una aglomeración más fácil. En este proceso la dosis necesaria de iones es proporcional a la cantidad de material coloidal presente.

- c. *Atrapamiento en un precipitado.* Si sales de aluminio o hierro son adicionadas al agua, ellos precipitarán como flocs hidróxido, entonces en presencia de material coloidal el hidróxido tenderá a usar las partículas coloidales como núcleo, formando un floc alrededor de las mismas. Una vez el floc hidróxido se ha formado este podría atrapar físicamente otras partículas coloidales, particularmente durante la floculación.
- d. *Partículas puente.* Grandes moléculas orgánicas con múltiple cargas eléctricas (polímeros) son frecuentemente efectivas como coagulantes. Se cree que estas moléculas trabajan como puentes entre las partículas.

- **Energía Inducida.** La agitación del agua origina diferencias de velocidad y por consiguiente gradientes de velocidad. El gradiente de velocidad en un fluido agitado es denotado por G y este es usado para medir la intensidad de la mezcla. Un alto G indica una mezcla violenta y un bajo G indica una mezcla moderada.

Por regla general la coagulación requiere un alto valor de G, esto es debido a que en la coagulación con sales metálicas por compresión de la doble capa y neutralización de la carga, la efectividad es mayor cuando las sales están presentes como complejos iónicos, y estos complejos sólo existen en períodos muy cortos de tiempo (1 segundo o menos) por consiguiente es necesario asegurar que el coagulante metálico es distribuido rápidamente a través del agua antes de que se produzca la formación de sales insolubles. Por otro lado la floculación requiere un bajo valor de G, pues una alta energía de mezcla tendería a romper los flocs formados.

- **Tipos de coagulantes y ayudantes de coagulación.** Coagulante se puede definir al químico dosificado para provocar que las partículas coagulen. Típicamente son sales metálicas. Polimeros podrían ser usados como coagulantes, pero es más frecuente usarlos durante la floculación que en la coagulación. Cuando son usados para ampliar los flocs formados por la coagulación, es normalmente referido como un ayudante de coagulación.

En la coagulación con sales de hierro y aluminio, inicialmente se forman iones trivalentes, después se hidratan para formar complejidades del metal con las moléculas de agua. En una serie de posteriores reacciones las moléculas de agua son reemplazadas por iones hidróxido dando lugar a otras complejidades. Dependiendo del valor de pH y la concentración de hierro y aluminio, precipitará como un floc hidróxido. Las complejidades intermedias son muy efectivas en la compresión de la doble capa y neutralización de la carga, y su duración es muy corta.

El control del pH durante la coagulación es muy importante, debido a que los hidróxidos de hierro y aluminio son menos solubles en determinados pH.

El objetivo principal es coagular en el valor de pH donde la solubilidad de los hidróxidos de hierro y aluminio es mínima (prueba de jarras).

Los coagulantes férricos frecuentemente requieren un control menos preciso del pH.

Aguas con alto contenido de sales disueltas y generalmente alcalinas, son buenas amortiguando los cambios de pH.

Aguas suaves con alto contenido de sólidos disueltos tienen poca capacidad de amortiguación. Frecuentemente tales aguas tienen color orgánico y son ácidas, por esta razón el aluminio con un pequeño rango de mínima solubilidad de hidróxidos no es recomendado.

- **Sulfato de Aluminio**. Al adicionarlo al agua reacciona con la alcalinidad, para formar hidróxido de aluminio.
- **Sulfato Férrico**. Puede ser un coagulante superior al aluminio en algunas aguas, es más tolerante a los cambios de pH.
- **Cloruro Férrico**. Si se encuentra en forma líquida no tiene problemas para su almacenamiento y dosificación, su reacción es similar a la del sulfato férrico.
- **Sales de hierro y aluminio polimerizadas**. Estos son polímeros inorgánicos con alto peso molecular. Estos coagulantes son más costosos pero tienen varias ventajas: más efectivo a bajas temperaturas, rápida formación del floc y valores de dosificaciones más bajos.
- **Polímeros Orgánicos**. Generalmente son usados como ayudantes de coagulación, pero en algunos casos son usados como coagulante principal. Su ventaja es que ellos pueden ser usados sobre un amplio rango de pH.

- **Otros Químicos usados en la coagulación y floculación**

- **Poli electrolitos**. Son químicos sintéticos; su composición y tamaño molecular pueden ser variados según los requerimientos operacionales. Su costo es alto, se dosifica como ayudante de coagulación (0.01 mg/l) o como coagulante principal (sobre 0,5mg/l). Han mostrado efectividad en aguas con altos valores de pH o con contenido de hierro o manganeso.
- **Hidróxido de Calcio**. Es ampliamente usada para la corrección del pH.

- **Espesadores.** Cuando el entrelazamiento en un precipitado es el principal proceso de coagulación, la dosis de coagulante requerida es inversamente proporcional a la concentración de sólidos. Aún cuando la compresión de la doble capa o neutralización de la carga sea el principal método de desestabilización, el entrelazamiento entre partículas es importante en el proceso de floculación. Bentonita puede ser usada.

Filtración rápida en arena por gravedad. El objetivo principal de la filtración rápida es la remoción de partículas y microorganismos objetables que no han quedado retenidos en los procesos previos de coagulación, floculación y sedimentación.

Los filtros rápidos por gravedad son los tipos más comunes. Idealmente se les debe alimentar con agua de menos de 5 UNT (Unidades Nefelométricas de Turbidez) para que produzcan buenos resultados, sin embargo trabajan razonablemente bien con agua de 10-20 UNT. Un filtro rápido por gravedad, bien diseñado y operado, debe producir agua con una turbidez alrededor de 0.10 UNT.

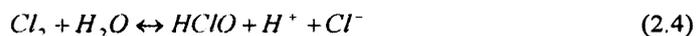
Un filtro rápido por gravedad es un tanque rectangular de 3 a 4 m de profundidad, en el que va un lecho mixto de antracita, arena y grava, el cual es lavado mediante un proceso de inversión del flujo.

El objetivo de la grava es repartir el flujo uniformemente en toda la masa del lecho filtrante durante el lavado e impedir que los granos de arena penetren en los drenes usados para evacuar el agua filtrada.

Desinfección En una planta de tratamiento correctamente operada, en los procesos de coagulación- floculación y filtración se elimina entre 80 % y 95 % del total de organismos en el agua, sin embargo quedan presentes en suficiente número organismos causantes de enfermedades (bacterias, protozoarios, virus, trematodos). Por tal razón se hace necesario un proceso adicional denominado desinfección.

El cloro es el más común de los desinfectantes, este se puede usar en dos formas: cloro gaseoso o una solución de hipoclorito, generalmente hipoclorito de sodio.

Cuando se adiciona cloro al agua este reacciona rápidamente para formar ácido hipocloroso, iones de hidrógeno y cloro:



El ácido hipocloroso puede ser disociado



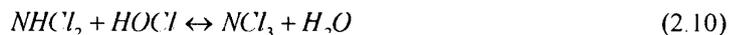
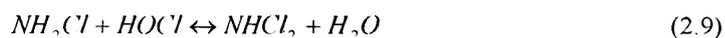
Los puntos de equilibrio de esta reacción son dependientes del pH; la ecuación 2.4 aplica en pH menores aproximadamente de 4 y la ecuación 2.5 cubre un rango de pH de 5 – 10.

El ácido hipocloroso ($HOCl$) es un bactericida poderoso, mientras que el OCl^- es un bactericida muy pobre.

Cuando se adiciona una solución de hipoclorito de sodio o calcio ellos son disociados de la siguiente forma:

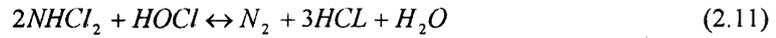


Otras reacciones importantes con relación a la cloración son las reacciones entre el cloro y el ión amonio. Estas son importantes por dos razones, remueven el ácido hipocloroso y forman componentes que actúan como desinfectantes y son frecuentemente usados para proporcionar desinfección residual en los sistemas de distribución. El cloro o ácido hipocloroso reaccionan con el ión amonio para reemplazar sucesivamente los átomos de hidrógeno con cloro:



Estas reacciones llevan a la formación de monocloramina (NH_2Cl), dicloramina ($NHCl_2$) y tricloramina (NCl_3), la relación entre las cantidades de estos tres depende del valor de pH y la concentración de NH_4 en el agua. Las tricloraminas solo se pueden formar en bajos valores de pH y las dicloraminas son bactericidas mucho más efectivos.

La cloración de agua que contiene amonía también puede llevar a la formación de nitrógeno gas:



En esta reacción se libera el nitrógeno y se convierte el hipoclorito a ácido clorhídrico.

Lo anterior se puede sintetizar en el siguiente diagrama:

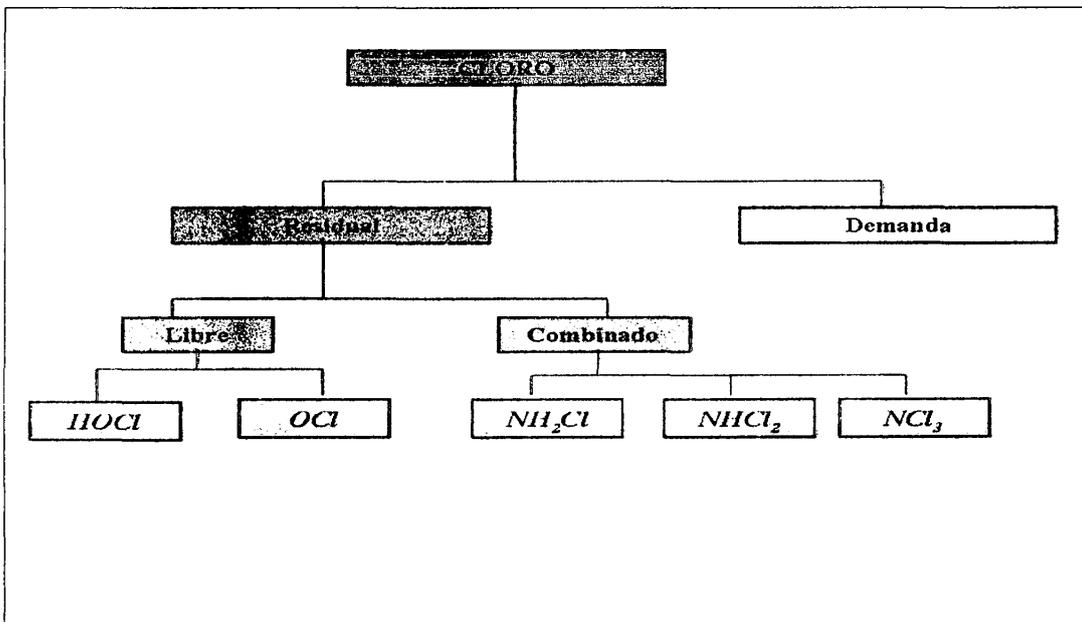


Figura 2.4 Reacciones del cloro en agua cruda

El ácido hipocloroso y el ión hipoclorito son llamados “cloro libre”, las cloraminas son conocidas como ‘cloro combinado’ y la cantidad de cloro gastado en la oxidación de materia orgánica es conocido como demanda.

- *Cloración en punto de quiebre.* Aun cuando el agua es muy pura, tiende a tener trazas de Amonía y otros químicos que reaccionan con el cloro. En la Figura 2.5 se puede ilustrar lo siguiente: En la zona ascendente inicial de la curva, ocurren las primeras reacciones que resultan en la remoción de algunos cloros, debido a reacciones con iones de sulfuro y de hierro (por ejemplo) y la formación de monocloraminas y dicloraminas, resultando en un incremento del cloro residual. La curva empieza a descender una vez la mayoría de la amonía ha sido convertida

a dicloraminas, entonces se produce la formación de ácido clorhídrico e iones cloro (ninguno de los cuales es detectado como cloro residual), provocando un decrecimiento del cloro residual con las dosis de cloro. Finalmente la curva empieza ascender nuevamente cuando todas las dicloraminas han reaccionado para formar tricloraminas o nitrógeno, el cloro residual se incrementa a medida que aumenta la dosis de cloro, este punto en el cual el cloro residual empieza a aumentar nuevamente es conocido como punto de quiebre. Anterior al punto de quiebre el cloro está presente predominantemente como cloro combinado, después del punto de quiebre predomina el cloro libre.

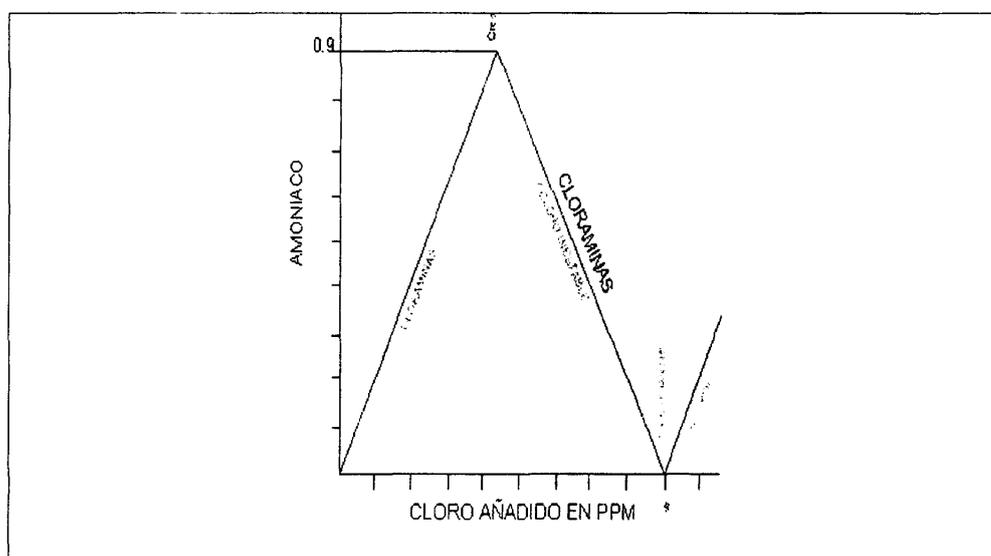


Figura 2.5 Relación dosis de cloro y formas de cloro residual

La demanda de cloro para cualquier agua es la dosis de cloro para la cual se alcanza el punto de quiebre.

2.5 EL MÉTODO DE GASTOS PREVENTIVOS

2.5.1 Economía de la calidad ambiental

Durante los últimos años se han desarrollado diversos tipos de análisis con el fin de suministrar información ambiental, económica y social que permitan facilitar el proceso de desarrollo de políticas.

En ambientes donde se está produciendo contaminación, existen muchos problemas acerca de las políticas más adecuadas para reducir la misma, es decir, cuáles deben ser las metas de calidad ambiental que se desean alcanzar y cómo lograrlo.

Las actividades del control de la contaminación se caracterizan por la siguiente situación; por una parte al reducir las emisiones del contaminante se reducen los impactos negativos que el usuario ambiental experimenta como consecuencia de la degradación del mismo (daños); pero por el otro lado reducir las emisiones requiere el uso de recursos que pueden emplearse en otras actividades.

Si se observa esta situación desde la perspectiva de una empresa de producción que utiliza como insumo el bien y/o recurso natural afectado, cualquier cambio en la calidad o cantidad provista por el ambiente ocasionará un cambio en el nivel de producción o en el nivel de costos de producción.

Una función de costos de producción presenta la siguiente forma:

$$CT = f(P_k, P_L, Q, q) \quad (2.12)$$

Donde CT, son los costos totales de producción, P_k es el precio de insumos variable, P_L es el precio del factor trabajo, Q es el nivel de producto producido y q es la calidad o cantidad ambiental.

Independientemente del modelo (lineal, logarítmico, etc.) que mejor ajuste la función de costos, lo que cuantifica la influencia de la degradación sobre los costos de producción de una empresa, será el coeficiente que acompañe al término q.

Para describir la relación existente entre la contaminación y los daños, se utiliza una función de daño ambiental donde se muestra el cambio en los daños que se originan por el aumento de emisiones o concentraciones en el entorno. Para la obtención de la función de daño marginal, se deriva la función de costos de producción con respecto a la calidad ambiental teniendo:

$$VDMg = \frac{\partial CT}{\partial q} \quad (2.13)$$

En general se podría esperar que la función de daños tenga cualquiera de las dos formas ilustradas en la Figura 2.6 :

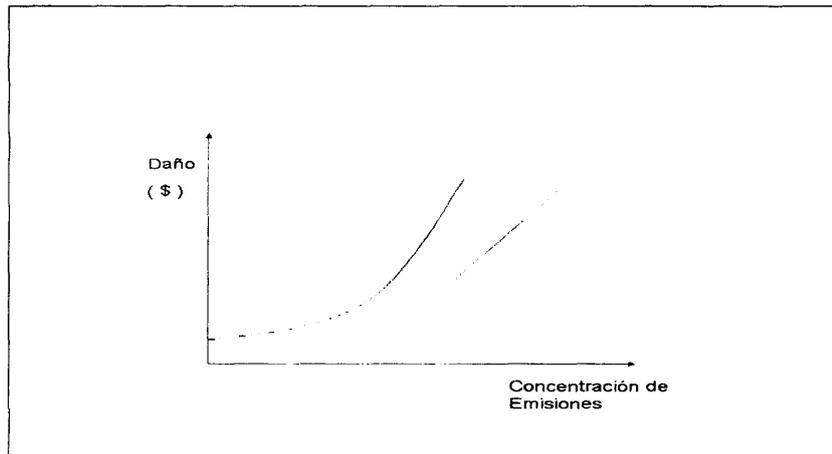


Figura 2.6 Funciones de daños

De igual forma se puede obtener una función que relacione los costos generados al disminuir la cantidad de contaminante emitido al ambiente (costos de reducción) con la calidad ambiental, teniendo una función de la siguiente forma:

$$CR = f(q) \quad (2.14)$$

Donde CR son los costos de reducción en que se tienen que incurrir para mejorar la calidad ambiental y q es la calidad ambiental.

Para obtener la función del valor de reducción marginal, se deriva la función de costos de reducción con respecto a la calidad ambiental teniendo:

$$VRMg = \frac{\partial CR}{\partial q} \quad (2.15)$$

La función de costos marginales de reducción podría presentar cualquiera de las formas ilustradas en la Figura 2.7.

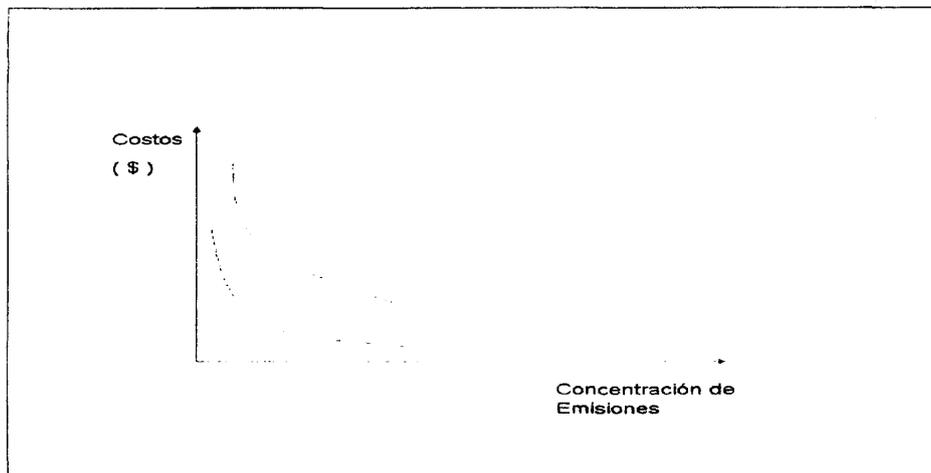


Figura 2.7 Funciones de los costos marginales de reducción

Al confrontar los dos gráficos anteriores (Figura 2.8) se puede obtener el nivel eficiente de emisiones e^* , el cual corresponde al nivel de emisiones de contaminante para el cual los daños marginales son iguales a los costos marginales de reducción. En este nivel se logra un balance, pues es en este punto donde los costos marginales de reducción se compensan totalmente con los costos marginales de daño.

2.5.2 Análisis de Costo-Beneficio

Desde el punto de vista económico, el análisis de costo-beneficio es una herramienta primordial. La metodología de gastos preventivos entra bajo esta perspectiva, pues básicamente intenta observar el valor de los bienes y servicios ambientales equiparándolos con otros bienes y servicios que normalmente se intercambian en el mercado.

Este tipo de análisis consiste en medir y comparar todos los beneficios y costos de un proyecto o programa en particular.

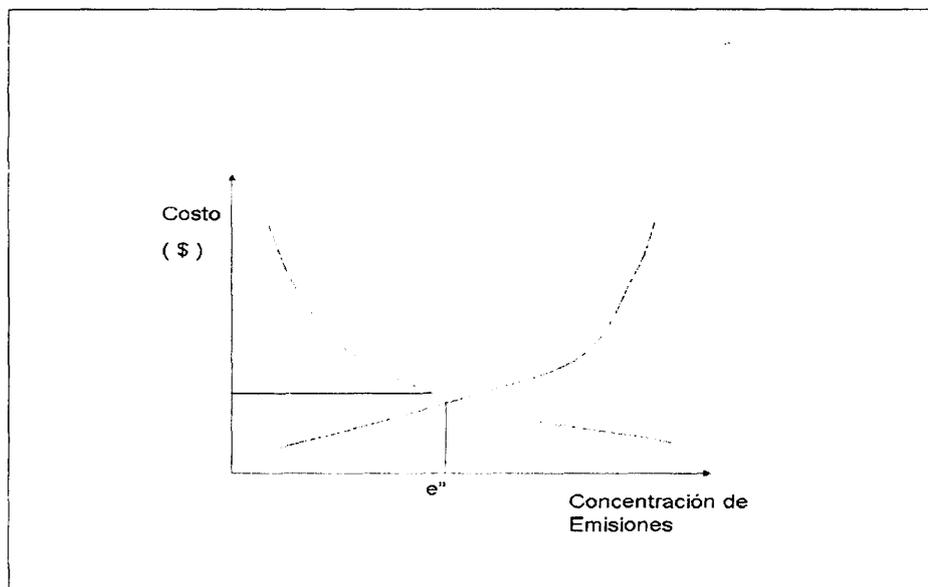


Figura 2.8 Nivel eficiente de emisiones

Los pasos a seguir dentro de un análisis de Costo-Beneficio son:

- Decidir la perspectiva desde la cual se va a realizar el estudio (municipal, estatal, nacional, etc.).
- Especificación completa de los principales componentes del programa o proyecto (ubicación, grupos involucrados, vínculos con otros programas, etc.).
- Realización de un flujo de las entradas y las salidas.
- Asignación de un valor a los flujos de entradas y salidas; es decir cuantificar costos y beneficios.

Cuando se realiza este tipo de análisis desde la perspectiva de los productores que usan el bien o servicio ambiental, es un análisis incompleto, pues solamente se están teniendo en cuenta las afectaciones sobre las actividades económicas sin tener en cuenta las posibles pérdidas en el valor de no uso y en valores de uso indirecto. Sin embargo esta metodología puede dar buenos resultados cuando la calidad del recurso ambiental afectado puede ser mejorada mediante la inversión en proyectos de mitigación.

- **Determinación de los beneficios**

Cuando se analiza este concepto desde una perspectiva ambiental, no se pueden cuantificar tan fácilmente los beneficios de una determinada acción o proyecto como se podría hacer para cualquier otro producto. Sin embargo cuando ocurre una degradación de tipo ambiental, esta genera daños que permiten cuantificar de forma directa los beneficios, es decir, los beneficios totales de la calidad ambiental mejorada se verán representados por la reducción de los daños, lo cual matemáticamente se puede determinar como el área bajo la curva marginal de daño, comprendida entre dos niveles de calidad ambiental q_1 y q_2 . Esto se puede ilustrar en la Figura 2.9

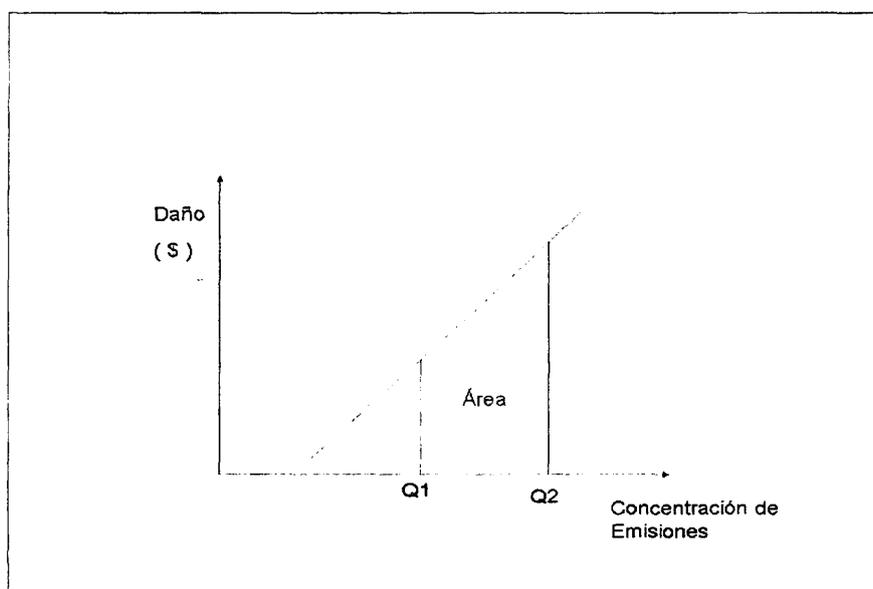


Figura 2.9 Determinación de beneficios totales en la curva de daño marginal

- **Determinación de los costos**

El análisis de costos puede realizarse a muchos niveles, sin embargo el nivel más sencillo es aquel que se concentra en los costos de un programa ambiental para una comunidad o empresa o un solo proyecto ambiental.

Para el cálculo de este tipo de costos se depende principalmente de especificaciones técnicas y de ingeniería, desarrollada anteriormente en instalaciones similares

Al igual que con la curva de daño, los costo totales a incurrir para reducir la calidad ambiental desde un nivel Q_1 a Q_2 , están representados por el área bajo la curva de los costos marginales de reducción.

2.6 INDICADORES DE RENTABILIDAD

2.6.1 Valor presente

El valor presente es el valor que tiene actualmente la suma de una serie de pagos que se efectuarán en el futuro.

El valor presente de una inversión se calcula a partir de una tasa de descuento y una serie de pagos futuros (valores negativos) e ingresos (valores positivos)

$$VP = \sum_{t=1}^N \frac{(\text{valores}_t)}{(1 + \text{tasa})^t} \quad (2.16)$$

Donde :

VP : Representa el valor actual de la inversión

Tasa : Tasa de interés por periodo

N : Número de pagos futuros

Los pagos e ingresos deben tener la misma duración y realizarse al final de cada periodo.

2.6.2 Factor de recuperación de capital (FRC)

Conocido como factor de recuperación de capital con serie de pagos iguales. Se utiliza para calcular los pagos iguales requeridos para amortizar un monto presente de una inversión o préstamo realizado durante un período n , el interés es calculado sobre saldos. Este factor tiene la expresión mostrada en la ecuación 2.17

$$FRC = \frac{i \times (1+i)^n}{[(1+i)^n - 1]} \quad (2.17)$$

Donde :

i = tasa de interés

n = período de tiempo considerado

2.6.3 Costo anual equivalente (CAE)

Consiste en convertir todos los ingresos y egresos, en una serie uniforme de pagos, mediante la aplicación de la ecuación 2.18.

$$CAE = FRC \times VP \quad (2.18)$$

Donde:

CAE = Costo anual equivalente

FRC = Factor de recuperación de capital.

VP = Valor presente.

CAPITULO 3

DESCRIPCIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO MUCUJEPE

3.1.1 Ubicación de la cuenca

La cuenca del río Mucujepe se encuentra ubicada geográficamente en las coordenadas UTM: 235.600 m E, 215.675m E, 945.425 m N, 963.525 m N (Zona 19), abarcando un área de 40500 ha, de las cuales en este trabajo solo se estudiaron 15965 ha, que corresponden a la parte media y alta de la cuenca.

La zona más alta de la cuenca colinda al sur con el Páramo El Tambor, encontrándose allí las nacientes del río Cacique, El Quebadrón y sus afluentes, abarcando un área aproximada de 8280 ha, de las cuales el 17 % forman parte del Parque Nacional Sierra de La Culata, el área restante corresponde a la parte media.

Desde el punto de vista político, esta cuenca pertenece a los municipios AlbertoAdriani, Sucre y Andrés Bello del Estado Mérida. La Figura 3.1 muestra la ubicación relativa de la cuenca.

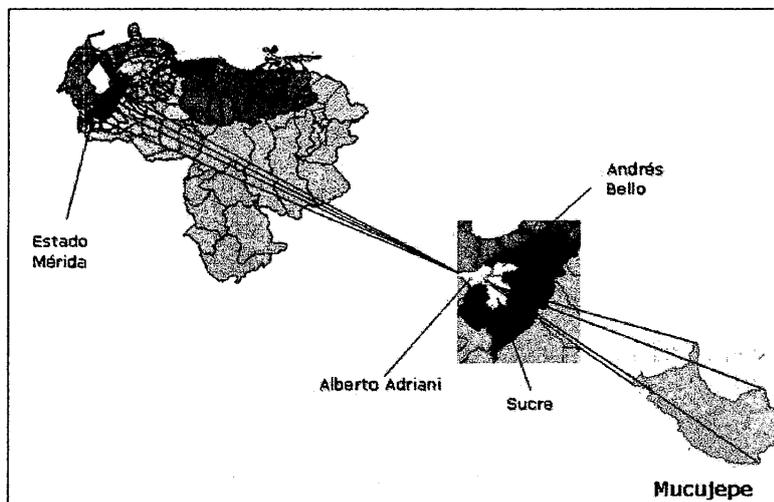


Figura 3.1 Ubicación del área de estudio

3.1.2 Clima

- **Precipitación**

Existen registros históricos de estaciones pluviométricas del MARNR (El Vigía, La Palmita, Chiguará, Mucujepe) y la estación del Aeropuerto de la ciudad de El Vigía; las cuales están ubicadas en cercanías al área de estudio. Se puede observar en la Figura 3.2 la tendencia bimodal de la precipitación media mensual en la zona, con un pico en el mes de abril y el otro en los meses de octubre y noviembre.

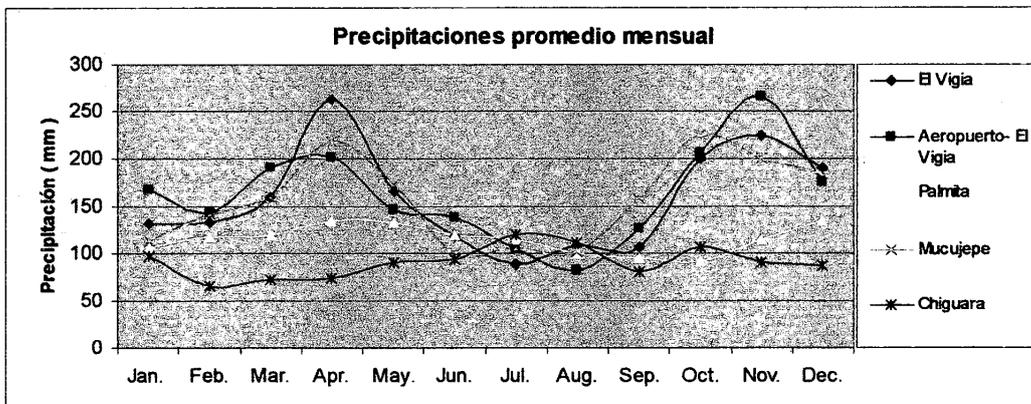


Figura 3.2 Precipitación promedio mensual en las estaciones cercanas a la cuenca del río Mucujepe.

La precipitación media anual en el área de estudio oscila entre 1200 y 1900 mm / año.

- **Temperatura**

La temperatura en la zona de estudio se ve influenciada por las diferencias de altitud y el tipo de vegetación existente. Para la estación del Aeropuerto de El Vigía la temperatura promedio anual para el período 1993-2001 es de 26.6 °C con una desviación estándar de 0.64 (ver Apéndice B) .

La Figura 3.3 presenta las temperaturas medias mensuales de la estación El Aeropuerto de El Vigía, para el período 1993 -2001. Se puede observar que los picos de temperatura media se observan en los meses de mayo y agosto.

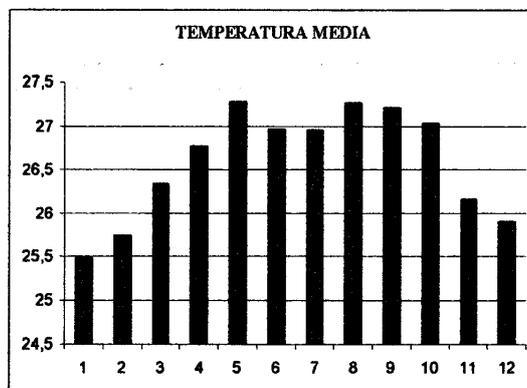


Figura 3.3 Temperaturas en la Estación de el Aeropuerto El Vigia (1993-2002).

- **Viento**

Los vientos predominantes en el área de estudio son los alisios que soplan en dirección NE-SO, con una velocidad promedio anual de 3.94 m/s para la estación del Aeropuerto de El Vigia para el período 1993-2001 (ver Apéndice B).

3.1.3 Relieve

La cuenca se extiende desde los 135 m.s.n.m en los límites con la carretera Panamericana hasta los 3000 m.s.n.m en el Páramo el Tambor (ver Figura 3.4).

La zona más alta de la cuenca se encuentra entre los 1600 – 3100 m.s.n.m, presentando generalmente un relieve de colinas redondeadas. En la parte media se encuentran vertientes más pronunciadas y piedemonte de colinas.

En la zona se encuentran tres tipos de sistemas:

Sistema valle-depresión. Caracterizado por un relieve plano con pendientes menores del 12%

Sistema piedemonte de colinas. Se encuentran colinas altas y bajas y lomas alargadas, con pendientes comprendidas entre 12 y 30 %.

Sistema de vertientes o de montaña. Son montañas altas con pendientes $\geq 30\%$.

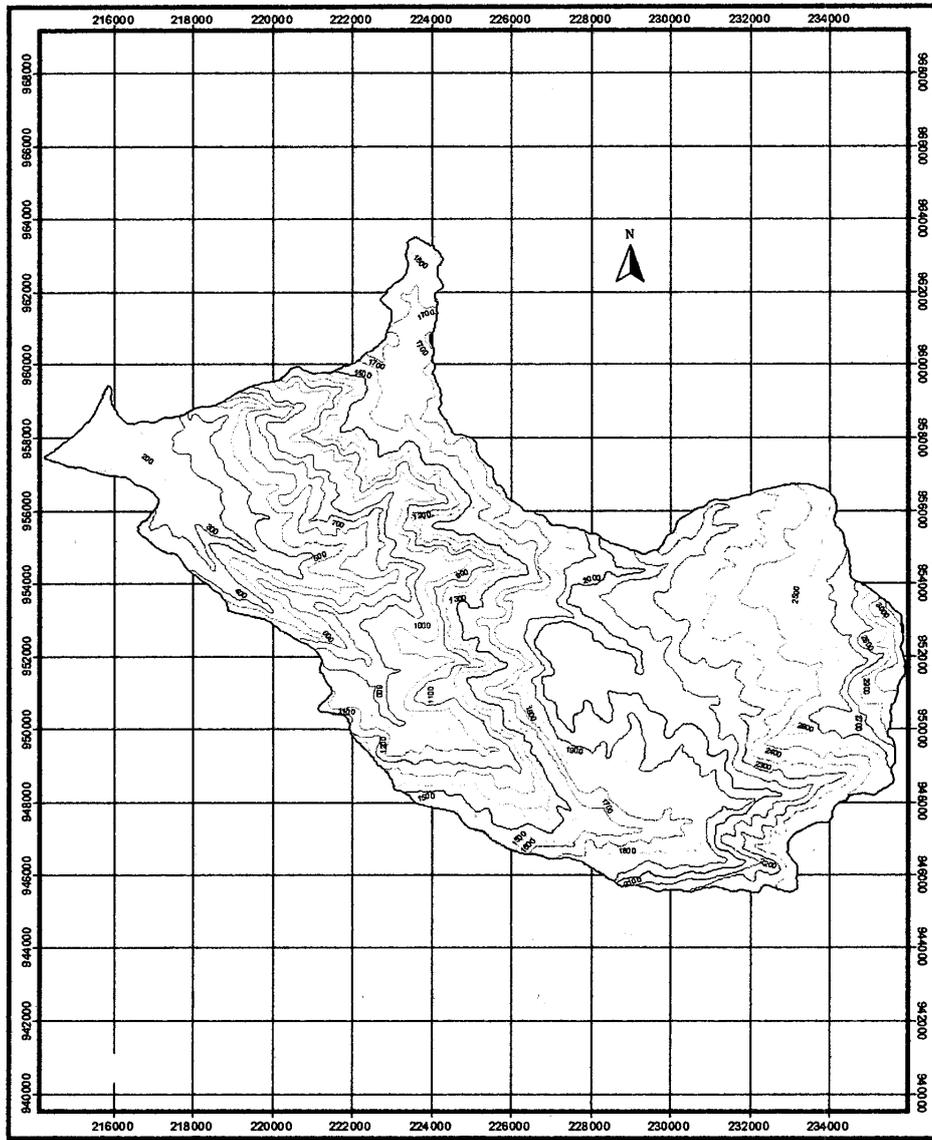


Figura 3.4 Mapa de relieve en la parte media y alta de la cuenca Mucujepe (Mapa digitalizado por la tesista con información suministrada por la empresa Aguas de Mérida)

3.1.4 Sistema hidrográfico

Según el MARNR (1982) los límites hidrogeográficos de la cuenca del río Mucujepe son: al NE la cuenca del río Capazón; al NO la cuenca del caño Caimán-Arenoso y la cuenca de la quebrada Caño Seco; al SE la cuenca de las quebradas Corrales y Barroso, la cuenca de la quebrada El Molino y la cuenca de la quebrada La Sucia y al SO la cuenca del río Mocacay y la cuenca de la quebrada La Sucia.

En la Figura 3.5 se observa como en la parte alta de la cuenca se encuentran las nacientes de los ríos Cacique y Caña Brava y sus afluentes, en la parte media confluyen el río blanco y la quebrada La Roncona, formando el río Mucujepe luego de su confluencia. Finalmente en la zona más baja de la parte media confluyen la quebrada Los Rangeles y caño Blanco, seguido por un transcurso en una planicie aluvial hasta su desembocadura al lago de Maracaibo.

3.1.5 Suelos

En la cuenca en estudio se encuentran cuatro tipos de suelo: Inceptisoles, Ultisoles, Entisoles, Molisoles (ver Figura 3.6).

Las características de cada una de las subunidades taxonómicas allí encontradas por el MARNR (1982) y Linares (2002), se pueden observar en el Apéndice B

3.1.6 Vegetación y uso actual de la tierra

Según Linares (2002) existen once clases de vegetación y uso actual de la tierra en la cuenca media y alta del Río Mucujepe (Figura 3.7):

- **Bosques Naturales**

El MARNR (1982), considera un bosque como una formación vegetal natural, generalmente pluriestratificada, en la cual predominan formas de vida arbóreas, de por lo menos cinco metros de altura y cuyo dosel presenta una cobertura de cierto grado de densidad.

Para el MARNR los bosques se pueden clasificar según su altura y grado de densidad de cobertura. Según su altura pueden ser: Altos, con alturas superiores a los 25 m; Medios, con alturas entre los 15 y 25 m y Bajos con alturas entre los 5 y 15m y según su grado de cobertura son: Denso, con cobertura de copas del dosel superior mayor al 75%; Medianamente Denso, con cobertura de copas del dosel superior entre el 50 y 75% y Ralo, con cobertura de copas del dosel superior entre el 25 y 50 %.

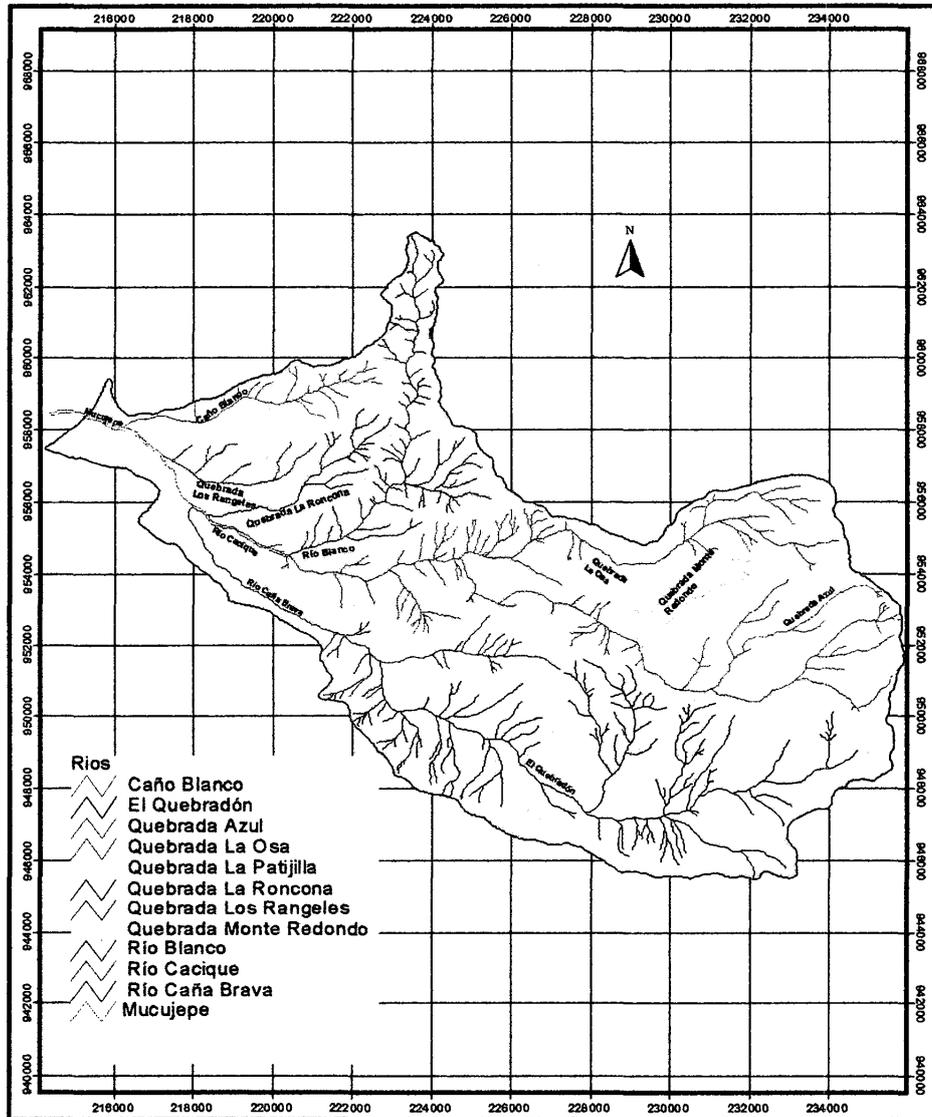


Figura 3.5 Sistema hidrográfico en la parte media y alta de la cuenca Mucujepe (Mapa digitalizado por la tesis con información suministrada por la empresa Aguas de Mérida).

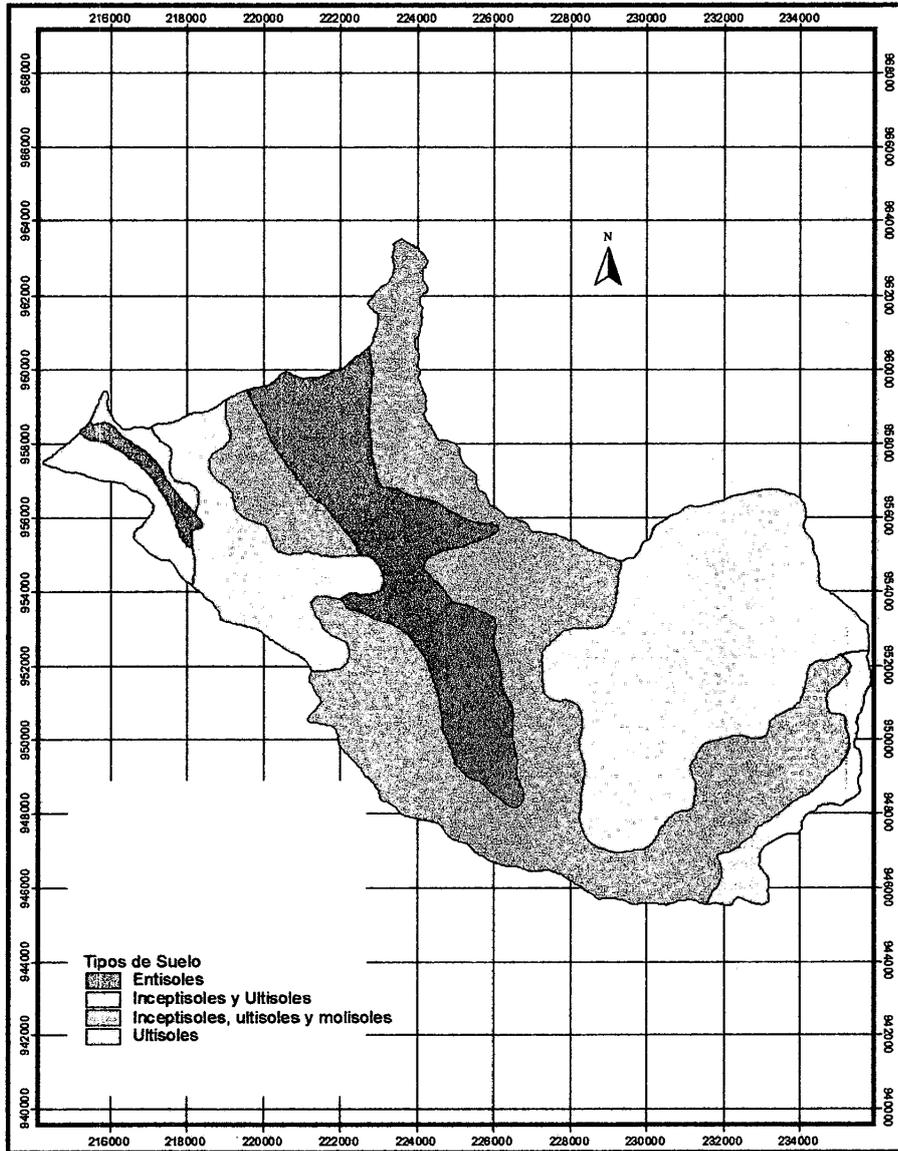


Figura 3.6 Mapa de Suelos existentes en la cuenca del Río Mucujepe (Mapa digitalizado por la tesista con información suministrada por la empresa Aguas de Mérida)

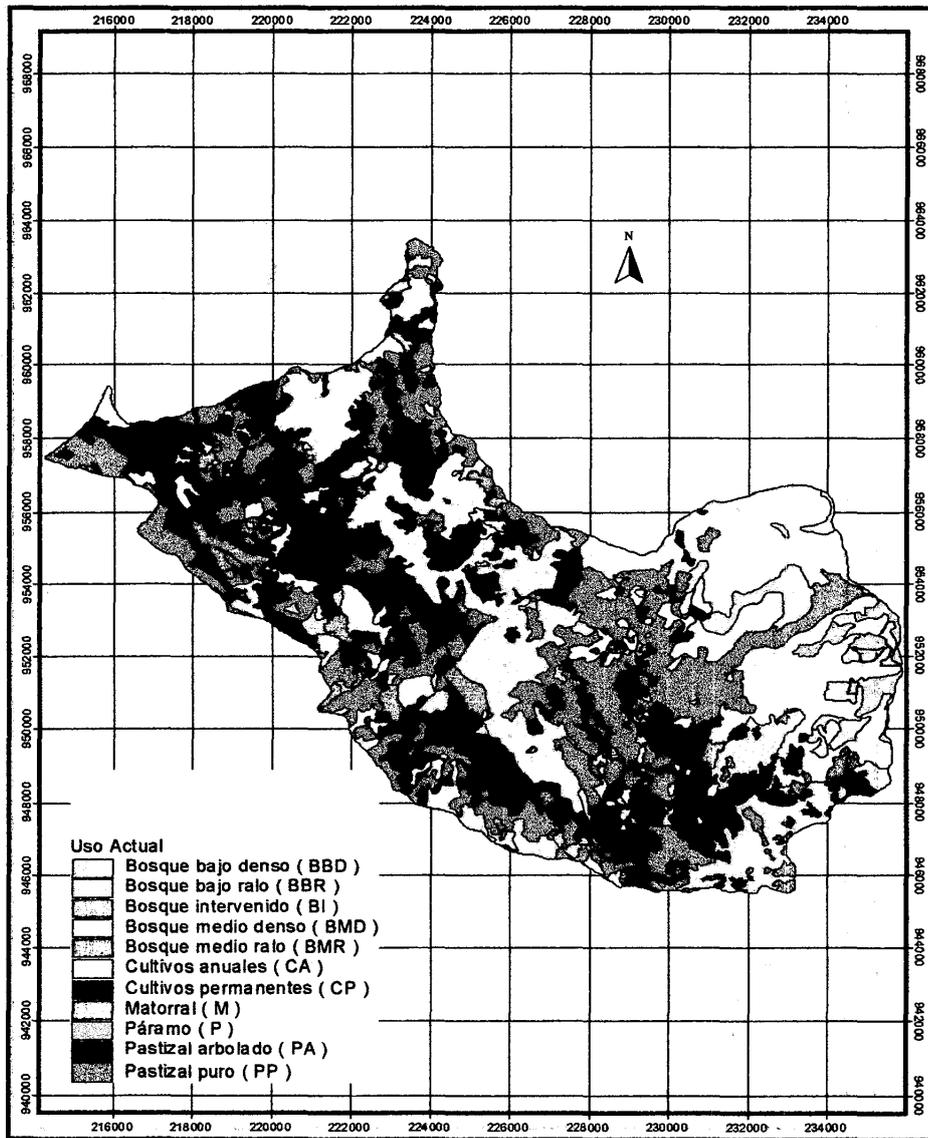


Figura 3.7 Mapa de uso actual en la cuenca del Río Mucujepe (Mapa digitalizado por la tesista con información suministrada por la empresa Aguas de Mérida)

Según Linares (2002) se encuentran en el área cuatro categorías de bosque naturales: Bosque medio denso (BMd), bosque medio ralo (BMr), bosque bajo denso (BBd), y bosque bajo ralo (BBr), representando respectivamente el 78.4 %, 0.20%, 19.5% y 0.49% de la totalidad del área de la cuenca que se encuentra cubierta por bosque. .

- **Bosque Intervenido**

Linares (2002), clasificó como bosque intervenido aquel donde se evidencia la intervención antrópica debido a: proximidad a zonas pobladas, presencia de cultivos anuales o permanentes y existencia de vegetación arbórea diferente a la que caracteriza a un bosque natural.

- **Vegetación Paramera**

Según el MARNR (1982), es una formación natural clímax, predominantemente herbácea, donde el suelo esta tapizado por formas de vida en rosetas y de cojín, musgos y líquenes; además de presentar frailejones y árboles pequeños de la familia Rosácea.

- **Pastizales arbolados**

Combinaciones dispersas y/o concentradas de individuos arbóreos de múltiples usos como: Apamate, cedro, Ceiba, samán, lechero, bambú, pardillo y otras especies que se combinan con algunos pastos. (Linares, 2002).

- **Pastizales puros**

Vegetación monoestratificada donde predominan gramíneas perennes, con muy pocos elementos arbóreos, arbustivos o herbáceos. (Linares, 2002) .

- **Matorral**

Es definido por el MARNR (1982) como una formación vegetal arbustiva de origen natural o antrópico con una dinámica ecológica propia, de menos de 5 m de altura, monoestratificada, de fisonomía variable de acuerdo a las condiciones climáticas y cuyas especies componentes poseen bastante ramificación desde la base. Según Linares (2002) algunos representantes de este tipo de vegetación en la zona son: Mora silvestre, helechos arbóreos y mano de león .

- **Cultivos anuales**

Linares (2002) los clasificó como parcelas no muy extensas ubicadas cerca de casas o poblados, presentando en la parte alta cultivos de papa, zanahoria, remolacha, cebollina, repollo y apio y en la parte media de la cuenca yuca, auyama y ñame .

- **Cultivos permanentes**

Linares (2002) los considera como cultivos de más de un año de duración; encontrando en la parte media frutales como nispero del Japón, tamarindo y cítricos; y en la parte alta manzana y durazno .

También se encuentran especies no arbóreas como el café, caña de azúcar, y algunas leguminosas en la parte media; y en la parte alta maíz y cambur.

Los porcentajes en cuanto a superficie ocupada de los diferentes usos y tipo de vegetación en el área de estudio se presentan en la Figura 3.8 :

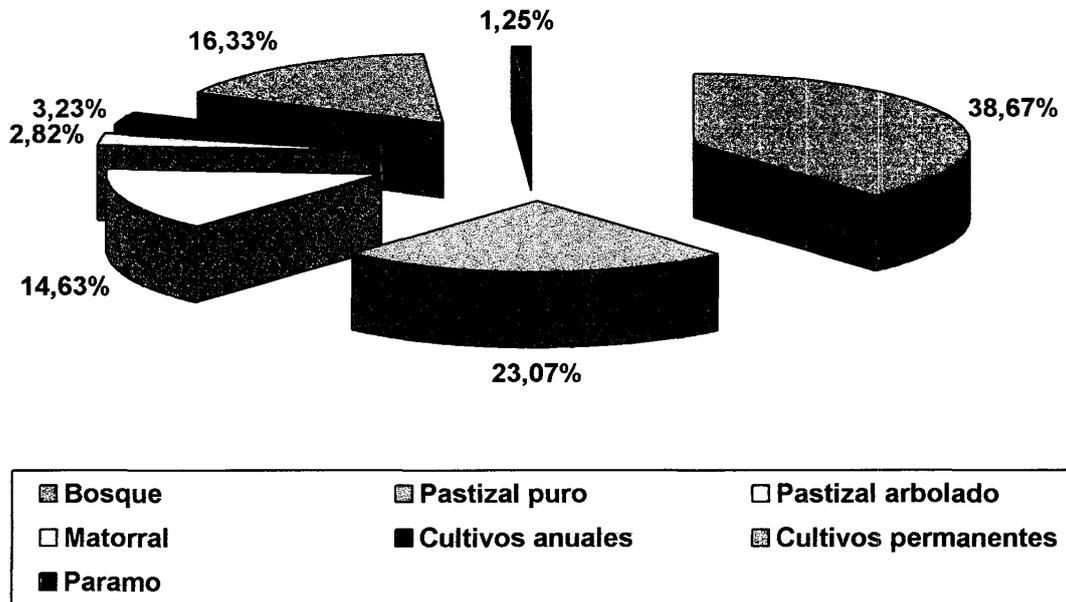


Figura 3.8 Porcentajes de los usos y tipos de vegetación existentes en la cuenca media y alta del río Mucujepe.

3.1.7 Escorrentía

Los caudales en los ríos Cacique y Caña Brava durante los últimos años han variado. Según estudios realizados por Solsona (1990), los caudales de estiaje en 1990 fueron para Caña Brava 214 l/s y para Cacique 750 l/s y para ese mismo año se registraron valores máximos de 5.06 m³/s para Cacique y 4.157 m³/s en Caña Brava, como se puede observar en la Figura 3.9

Sin embargo en aforos puntuales recientemente realizados por la empresa Aguas de Mérida en el período 1998-2004, los mayores caudales registrados en los ríos Cacique y Caña Brava fueron 1.08 m³/s y 1.36 m³/s respectivamente, como se puede observar en la Figura 3.10.

3.1.8 Producción de sedimentos

Las principales fuentes de producción de sedimentos en la cuenca del río Mucujepe son grandes masas de material erosionado de laderas y taludes, debido a las altas pendientes presentes en el área, suelos poco profundos, concentraciones de escurrimiento producido por la lluvia y la intervención del hombre.

Según el informe técnico “Actualización del estudio hidrológico de la zona sur del lago de Maracaibo” (CIDIAT, 1987), la producción media anual de sedimentos esperada a la salida de la cuenca del río Mucujepe es de 2175 Ton / Km².

En estudios más recientes realizados por Solsona (1990), se determinó que la producción anual de sedimentos esperada en la parte baja de la cuenca (Estación Los Naranjos, Norte:969478.15, Este:208672.65) es de 1626 Ton / Km².

3.2 SISTEMA DE SUMINISTRO DE AGUA PARA LA CIUDAD DE EL VIGIA

La ciudad de El Vigía es el segundo centro de atracción poblacional del Estado Mérida; de acuerdo al censo realizado en el año de 1990, la población de la ciudad para esa fecha fue de 70.522 habitantes. Proyecciones de población realizadas por TAHAL (1995) indican que la población esperada para el 2005 es de 130.860 habitantes con una demanda de 613 l/s (Tabla 3.1).

Las actividades económicas predominantes en la ciudad de El Vigía son el comercio y los servicios (77,8%), en segundo lugar las artesanías, industria manufacturera y la construcción (14,3%) y en menor proporción la actividad ganadera (7,8%).

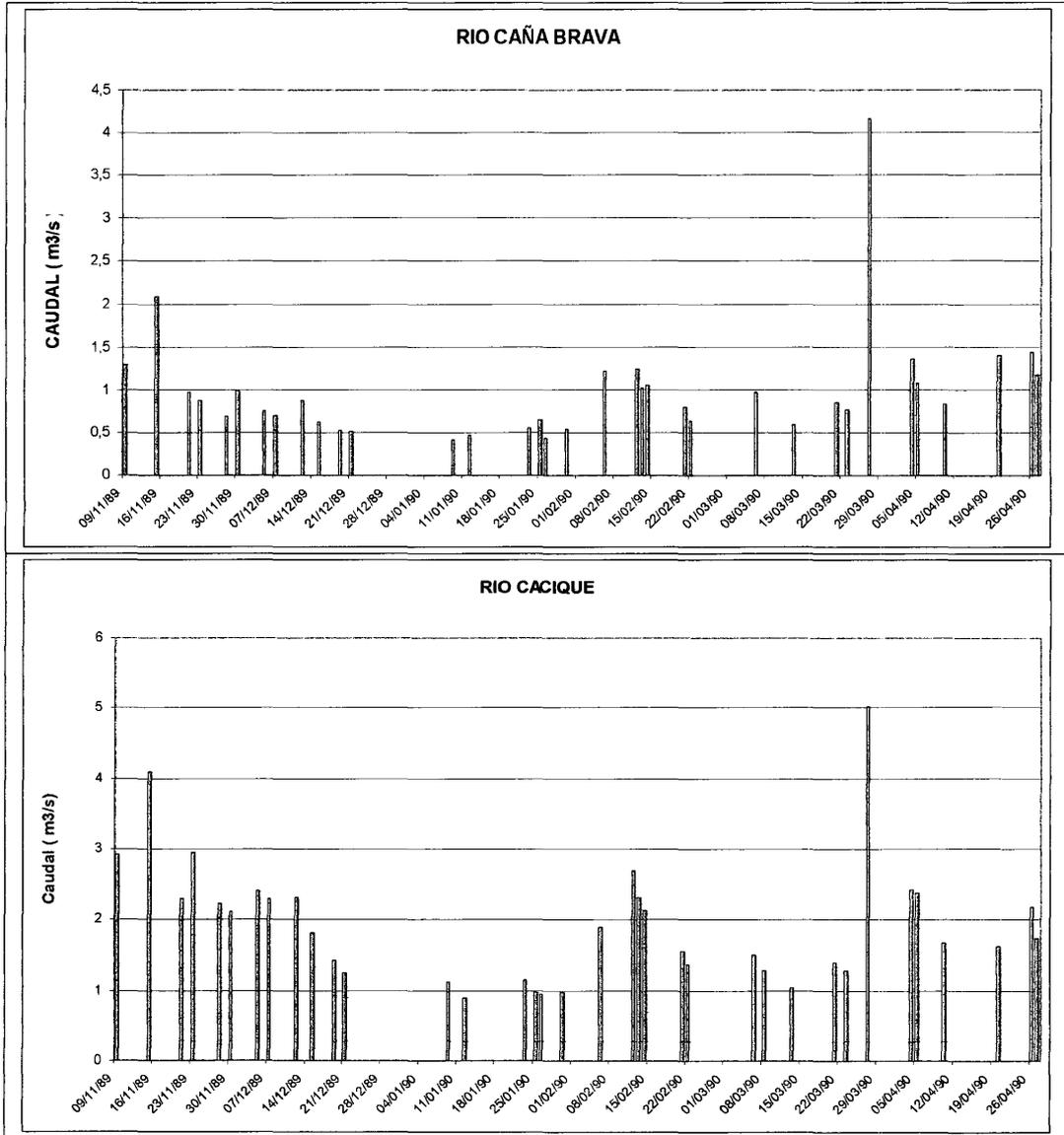


Figura 3.9 Caudales en los ríos Cacique y Caña Brava (Solsona, 1990)

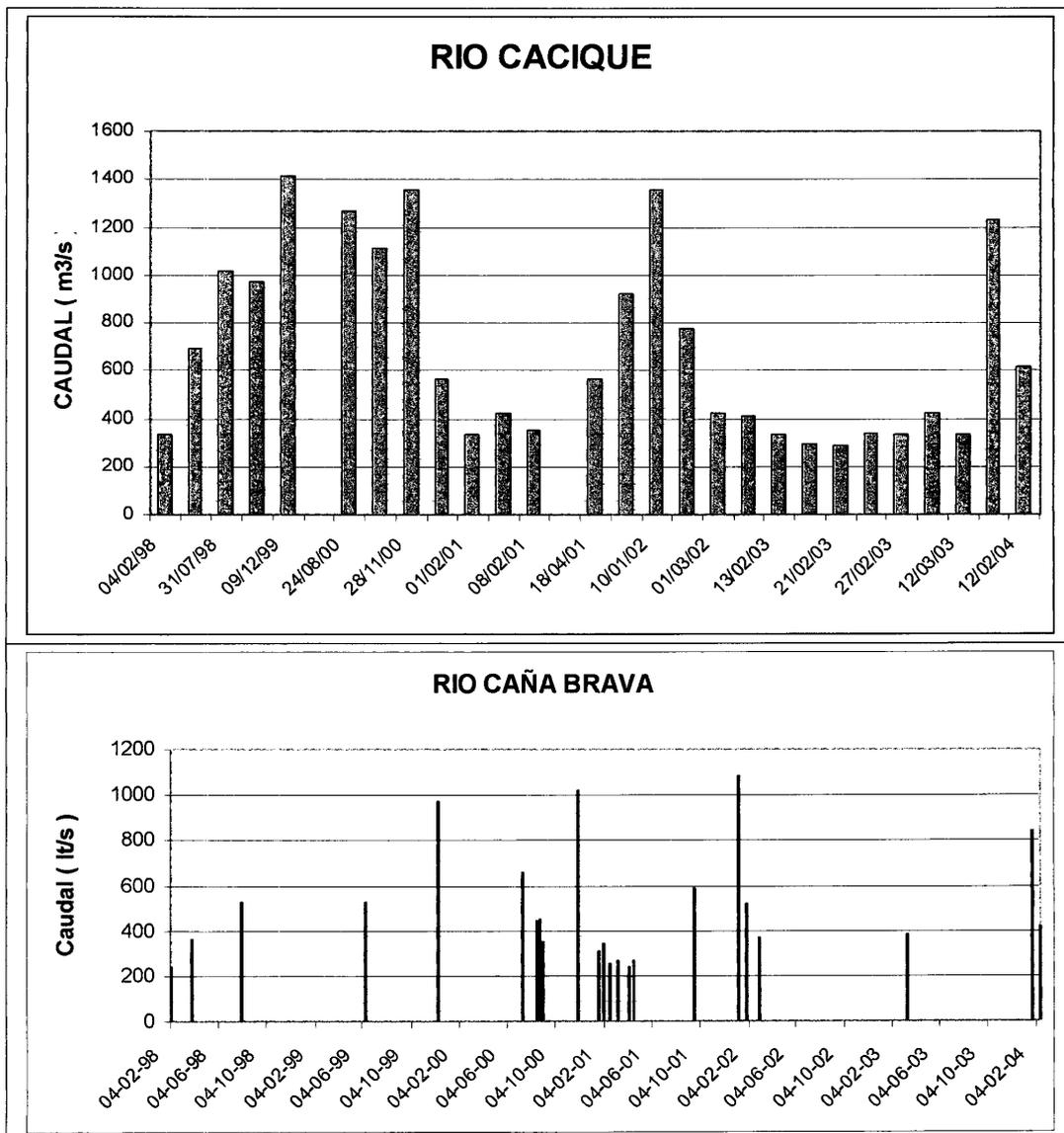


Figura 3.10 Caudales en los Ríos CaciQue y Caña Brava (Información suministrada por Aguas de Mérida, 2004)

La ciudad de El Vigía es el principal polo económico en el estado debido a su potencial agropecuario, desarrollo agroindustrial y ubicación estratégica de convergencia de rutas de la zona Sur del Lago de Maracaibo y La Cordillera Andina.

La ciudad de El Vigía cuenta con dos fuentes de suministro de agua superficial correspondientes a los ríos Cacique y Caña Brava; de igual forma cuenta con seis pozos ubicados en la vía a Santa Bárbara del Zulia para el suministro de agua subterránea. Estos pozos funcionan como complemento del suministro de agua superficial ya que solo operan en casos de emergencia o en épocas de estiaje.

Tabla 3.1 Proyecciones de población y demanda de agua en la ciudad de El Vigía (TAHAL, 1995)

AÑO	1995	1997	1998	2000	2005	2010	2015	2020
Poblacion	88563	96190	100004	107631	130860	155922	184611	216514
Cobertura	80%	80%	80%	80%	95%	98%	98%	98%
Poblacion Servida	70850	76952	80003	86105	124317	152804	180919	212184
Demanda Total Domestica L/Seg	286	311	323	340	337	397	449	503
Dem Comercial L/Seg	64	69	72	76	75	88	100	112
Dem Oficial L/Seg	13	15	15	16	16	19	21	24
Dem. Industrial L/Seg	5	5	5	5	5	6	7	8
Otros Usos (L/Seg)	11	11	12	12	12	14	15	16
Perdidas Fisicas En L/Seg	162	176	183	193	169	174	172	166
Demanda Promedio Total (L/Seg)	540	587	610	642	613	697	764	828

3.2.1 Captaciones en los ríos Cacique y Caña Brava

En la Figura 3.12 se muestra la ubicación de las obras de captación sobre los ríos Cacique y Caña brava.

La captación del agua sobre el río Caña Brava se realiza mediante un dique toma de rejilla lateral ubicado aproximadamente a 315 m.s.n.m, como se puede observar en la Figura 3.11, este es seguido por un canal que transporta el agua hasta los desgravadores y desarenadores.

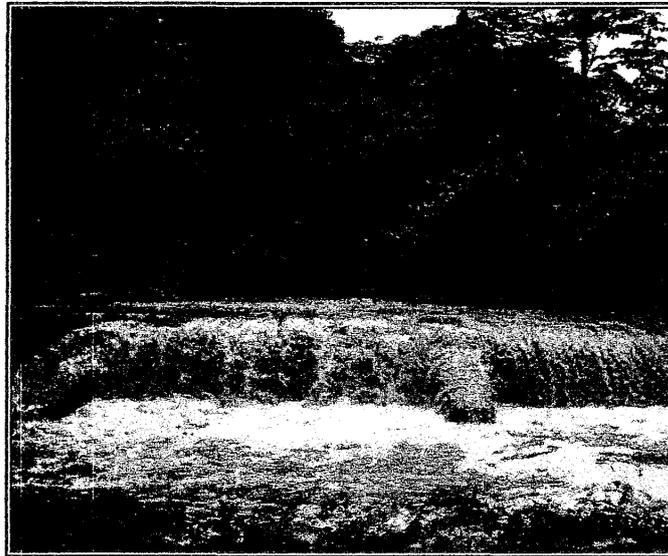


Figura 3.11 Dique toma sobre el río Caña Brava

El sistema de desarenación está conformado por tres desarenadores iguales con una capacidad máxima de 400 l/s, el agua a la salida de los desarenadores es llevada hacia la tubería de aducción, la cual tiene un diámetro de 600 mm.

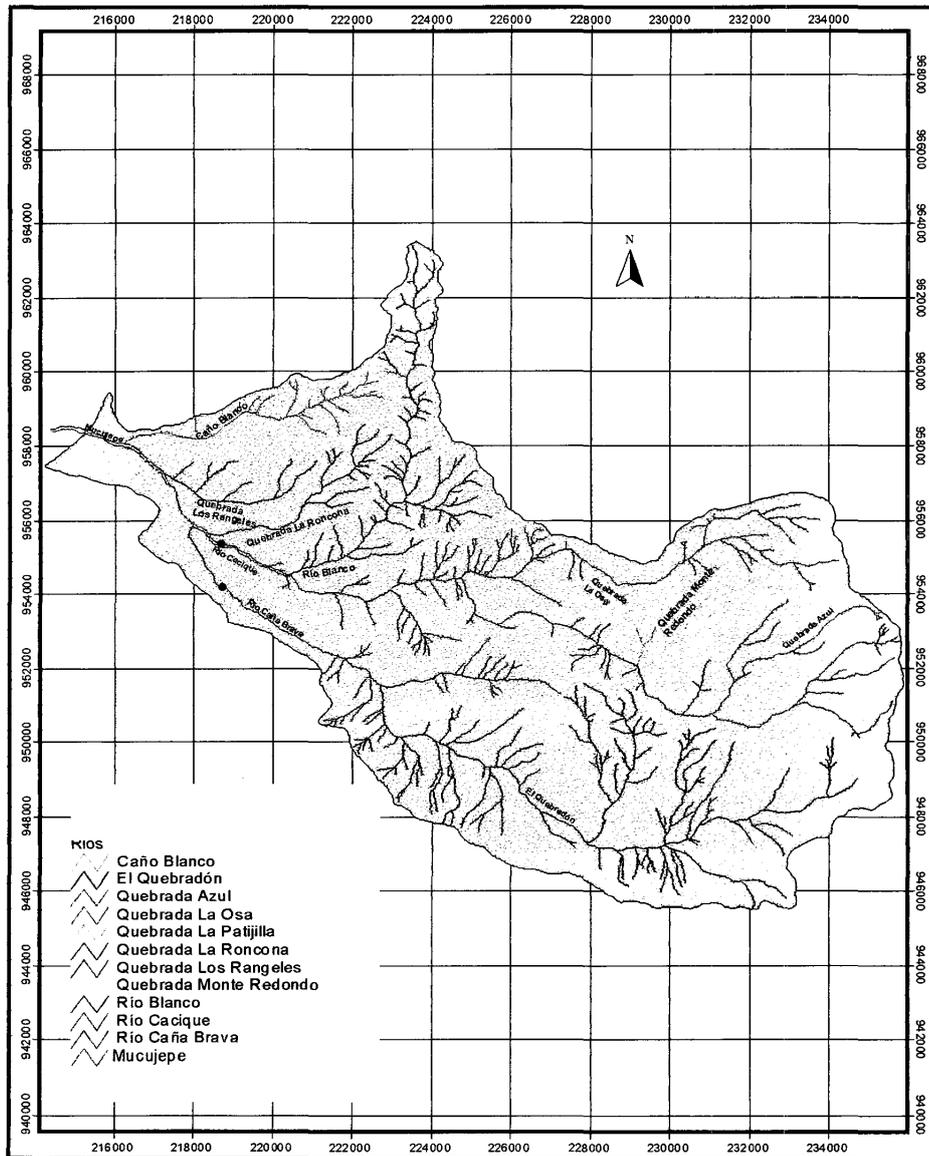


Figura 3.12 Ubicación obras de captación sobre los ríos CaciQue y Caña Brava.

Generalmente el río Caña Brava suministra el 65% del agua tratada en planta potabilizadora Mucujepe (400 l/s).

- ***Captación del Río Cacique***

La captación sobre el río Cacique se muestra en la Figura 3.13, esta se realiza a unos 1.000 m aguas arriba de la confluencia con el río Caña Brava aproximadamente a 280 m.s.n.m; el agua captada es transportada por una tubería de 700 mm de diámetro hasta los desarenadores.

Se cuenta con dos unidades iguales de desarenación con una capacidad de 400 l/s cada una. El río Cacique suministra aproximadamente el 35 % del agua tratada en la planta potabilizadora, captándose en épocas de sequía casi la totalidad del río.



Figura 3.13 Obra de captación sobre el río Cacique

3.2.2 Líneas de Conducción

La Conducción del río Caña Brava a la planta potabilizadora Mucujepe consiste de una tubería en Acero de 2.994 m de longitud, con un diámetro de 900 mm en el primer tramo de 984 m y 750 mm en el tramo final. Esta línea de conducción suministra un caudal de 800 l/s en condiciones normales a la planta potabilizadora.

Igualmente existe una conducción desde la toma en el río Cacique hasta la conducción del río Caña Brava, esta conducción es de acero de 750 mm de diámetro, con una longitud de 1480 m. El caudal transportado por esta tubería esta entre los 200 y 300 l/s

3.2.3 Planta potabilizadora Mucujepe

La planta potabilizadora Mucujepe es abastecida por los ríos Mucujepe y Caña Brava. Se encuentra ubicada en las cercanías del pueblo Mucujepe, aproximadamente a 2 Km. de la carretera Panamericana a una cota de 224,50 m.s.n.m.

En la Figura 3.14 se observa un venturi ubicado al ingreso de la planta para la medición del caudal de ingreso, después de este se realiza la dosificación de los productos químicos para pasar a dos clarificadores del tipo manto de lodos; una vez realizada la clarificación se pasa al proceso de filtración y posterior desinfección. Según TAHAL (1995), la planta tiene una capacidad efectiva de 800 l/ s.



Figura 3.14 Venturi para la medición de caudal

- **Mezcla rápida**

Para la realización de este proceso se cuenta con una zona turbulenta del tipo de flujo pistón en la tubería que va desde el venturi de entrada a los clarificadores, posteriormente el proceso se completa en la cámara de ingreso a los clarificadores.

- *Mezcla lenta y clarificadores*

Conformados por estructuras patentadas tipo Belco (Figura 3.15) las cuales cuentan con una cámara de mezcla lenta, una campana en la cual se realiza la floculación, una zona de sedimentación, una zona de agua clarificada y una zona de concentración y extracción de lodos. La capacidad de estas estructuras esta entre 800 – 900 l/s.

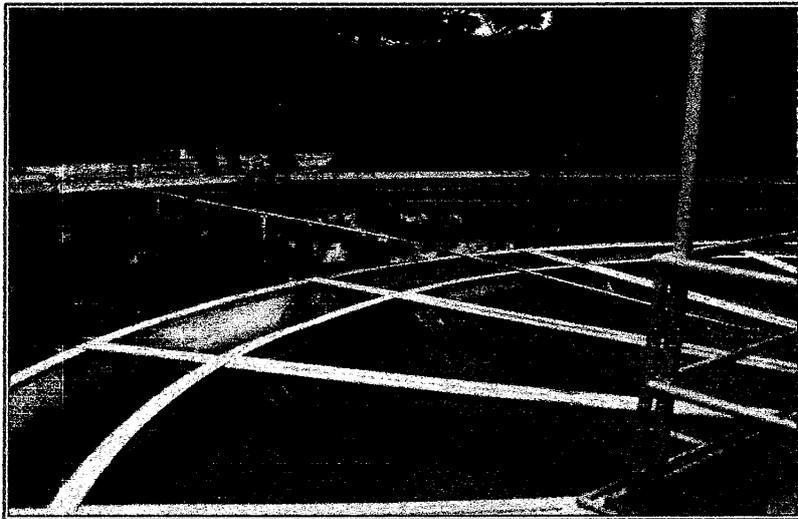


Figura 3.15 Sistema de coagulación, floculación y clarificación

- *Filtración*

Para la filtración se cuentan con dieciséis filtros rápidos por gravedad, de tasa declinante (Ver Figura 3.16). Cada filtro está constituido por la siguiente estructura: En la parte superior un lecho de arena fina de 686 mm de espesor, este descansa sobre un lecho de arena gruesa de 0,8 a 1,2 mm de diámetro por debajo de este un lecho de 456 mm de grava con tamaños entre 1 1/2” y 1/8”. El falso fondo está constituido por una placa metálica con 64 boquillas.

Cada filtro tiene una sección cuadrada de 6,25 m de lado con un área de filtración 39 m²

- ***Tanque de agua filtrada***

Este tanque tiene una capacidad de 521 m³. El ingreso al tanque se realiza mediante una tubería de 762 mm donde se encuentran ubicados los puntos de postcloración y post-alcalinización. La salida se efectúa igualmente mediante una tubería de 762 mm.

El tanque funciona como cámara de contacto puesto que la dosificación de cloro se realiza en la tubería de ingreso, el tiempo de retención aproximado es de 14 minutos.

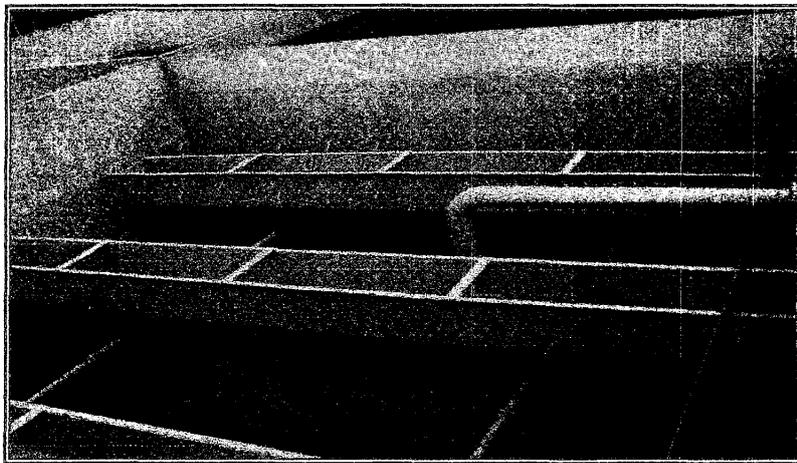


Figura 3.16 Filtro rápido de arena en la Planta de Mucujepe.

- ***Dosificación de productos químicos***

La planta potabilizadora cuenta con sistemas de dosificación de sulfato de aluminio, polímeros, cal, gas cloro y fluor.

En la actualidad se está usando como coagulante primario sulfato de aluminio sólido, este se suministra mediante dos dosificadores marca BIF con capacidad para 400 Kg / h.

Como coagulante también se está empleando el poli cloruro de aluminio cuando la turbidez se encuentra por encima de 40 UNT. Aunque este producto es más costoso que el sulfato de aluminio la dosificación necesaria para reducir la turbidez en el agua cruda y el aluminio residual en el agua tratada son menores que la del anterior.

La dosificación de polímero se realiza cuando la turbiedad del agua cruda supera las 200 UNT, su dosificación se realiza mediante bombas dosificadoras marca BIF.

Para la dosificación de cal se emplean dosificadores marca BIF similares a los dosificadores de sulfato.

El proceso de desinfección usa gas cloro en contenedores de 907 Kg, se cuenta con 10 contenedores de los cuales se utilizan aproximadamente tres.

En la Figura 3.17 se muestra el sistema de dosificación existente en la Planta Potabilizadora Mucujepe



Figura 3.17 Sistema de dosificación de productos químicos

