



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias
Línea Terminal en Hidráulica

Intercepción de lluvia por una especie arbórea representativa de la zona urbana
de la Ciudad de Santiago de Querétaro.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de Maestro en
Ciencias

Presenta:

César Chávez Nava

Dirigido por:

Dr. Enrique González Sosa

SINODALES

Presidente
Dr. Enrique González Sosa

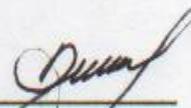
Secretario
Dr. Eusebio Ventura Ramos

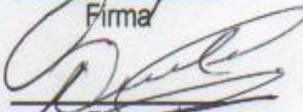
Vocal
Dr. Aurelio Guevara Escobar

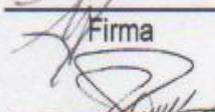
Suplente
Dr. Raúl Pineda López

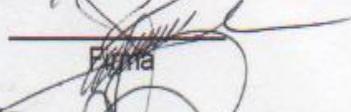
Suplente
Dr. Luis Hernández Sandoval

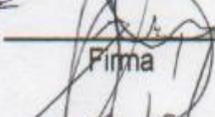
Nombre y Firma
Dr. Gilberto Herrera Ruiz
Director de la Facultad


Firma


Firma


Firma


Firma


Firma

Nombre y Firma
Dr. Luis Hernández Sandoval
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Mayo de 2007
México

RESUMEN

La ampliación de superficies urbanizadas incrementa las fuentes de contaminación y el riesgo de inundación de las comunidades establecidas aguas abajo de los centros urbanos. La vegetación urbana a través de la intercepción de la lluvia juega un papel relevante en la mitigación de los escurrimientos, en el funcionamiento de los sistemas de drenaje, en la disminución de la contaminación y en el costo por tratamiento de aguas superficiales. En este trabajo se investigó la intercepción de un árbol aislado de la especie *Jacaranda mimosifolia* por ser dominante de la vegetación urbana de la ciudad de Santiago de Querétaro, Qro. El individuo seleccionado se localiza en el circuito principal del CU del Cerro de las Campanas, en el sector noroeste, con una altura de 5 m, edad aproximada de 9 años, DAP de 0.28 m. y una proyección horizontal de la corona de 23 m². Durante el periodo de observación de julio a octubre del 2005 ocurrieron 28 eventos que generaron una precipitación de 219 mm la cual represento el 40% de la precipitación media anual (548 mm). La intercepción durante el periodo fue del 54% (118 mm), sin embargo, la intercepción máxima por evento resulto del 50%. Se encontró que los escurrimientos generados en una sección de la Av. Bernardo Quintana, con una longitud de 6.7 km - Parque Querétaro 2000 y Puente del Ferrocarril- con cobertura arbórea aproximada del 50%, se reducen un 23% al tener en cuenta la presencia de la especie *Jacaranda mimosifolia*, pasando de 31,855.050 m³ a 24,463.664 m³. Es decir, cada metro cuadrado de copa de la especie *Jacaranda mimosifolia* contribuye a una reducción del escurrimiento de 0.1182 m³ que representa un ahorro por concepto de tratamiento de agua superficial de \$ 0.55 pesos/m². En síntesis, la vegetación de una ciudad, ofrece un beneficio hidrológico y económico a sus habitantes.

Palabras clave: (Vegetación urbana, intercepción, escurrimientos urbanos)

SUMMARY

The extension of urbanized surfaces increases the sources of contamination and the risk of flood of the established community's waters under the urban centers. The urban vegetation through the interception of rain plays an excellent role in the mitigation of the draining, in the operation of the drainage systems, in the diminution of the contamination and the cost by superficial water treatment. In this work the interception of an isolated tree of dominant the Jacaranda mimosifolia species was investigated for being of the urban vegetation of the city of Santiago de Querétaro, Qro. The selected individual is located in the main circuit of the CU of the Hill of the Bells, in the sector the northwest, with a height of 8.28 ft, approximated age of 9 years, DAP of 0,91 ft. and one horizontal projection of the crown of 247.57 ft². During the period of observation of July to October of the 2005 28 events happened that generated a precipitation of 8.62 inch represent 40% of the annual average precipitation (21.57 inch). The interception during the period was of 54% (4.64 inch), nevertheless, the maxima interception by event from 50%. One was that the draining generated in a section of the Av. Bernardo Quintana, with a length of 4.16 mile - Park Querétaro 2000 and Bridge of the Railroad- with arboreal cover of 50%, are reduced to a 23% when considering the presence of the Jacaranda mimosifolia, happening of 1124961 to 863934 ft³. That is to say, each square meter of glass of the Jacaranda mimosifolia contributes to a reduction of the draining of 4.1742 ft³ that represents a saving by concept of superficial water treatment of \$ 0.05 dollar/10.76 ft². In synthesis, the vegetation of a city, offers a hydrology and economic benefit to habitants.

Key words: (Urban vegetation, interception, draining urban)

DEDICATORIA

El contar con una familia que siempre brinda un apoyo, es un aliciente para que día a día, se enfrenten los retos que nos depara la vida de manera cotidiana, es por esto que, conciente de lo que significa para mí el soporte familiar, dedico este trabajo a las siguientes personas:

A mi Esposa e Hijos, Rosalba, Estefanía y Alexis, gracias por su tiempo y paciencia y por ser el estímulo que me impulsó día a día, pero sobre todo, mi reconocimiento por su tiempo prestado y estar conmigo en los momentos difíciles.

A mis padres Samuel Chávez Almanza y Josefina Nava Torres así como Hermanas y Hermanos por sus constantes enseñanzas y formación que como ser humano me dieron, a mis Suegros Vicente Chávez Garcilazo y Noemí Aguilera Guzmán por su generosidad siempre dispuesta para con mi familia.

A todos, gracias por su apoyo.

AGRADECIMIENTOS

Teniendo como marco la frase de Sor Juana Inés de la Cruz quien escribió, “Estudí no para saber más, sino para ignorar menos” dejo patente en este trabajo mi agradecimiento a todas esas personas que de manera directa e indirecta concurrieron para reducir mi grado de ignorancia y en consecuencia, coadyuvaron a formar un profesionista que siempre dará lo mejor de si en aras de lograr una mejor sociedad:

A todos los Sinodales y Profesores de la División de Estudios de Posgrado en la Facultad de Ingeniería, particularmente, a los Drs. Eusebio Ventura Ramos, Nicolás Caballero Guerrero, Gilberto Herrera Ruiz, MI y estudiante de Doctorado, César Veliz y de manera especial a mi Asesor y guía, el Dr. Enrique González Sosa, a todos ellos, gracias por sus constantes apoyos, criticas y sugerencias, pero sobre todo, por su paciencia.

De igual manera doy las gracias a las Instituciones que me brindaron su apoyo desinteresado para cumplir la meta que hoy se cristaliza.

A la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y su Delegación Federal en el Estado de Querétaro, particularmente al Biol. Alfredo Núñez Palacios por las facilidades prestadas, al Lic. Alejandro Angulo Carrera quien me motivó a cursar la Maestría, al Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología por haberme permitido colaborar en el Proyecto denominado “Formulación de Políticas Publicas para el Manejo de la Cuenca Lerma-Chapala en su Región Queretana” exploración de donde nació la presente investigación y finalmente, al Ing. Noe Ayala Castañeda y TSU Oscar Herrera Franco quienes participaron en el proceso de instrumentación del árbol tipo y muestreo de vegetación así como a la C. Nemesia Lucila Hernández Cerritos.

Gracias por ser participes de este trabajo.

INDICE

	Pagina
Resumen	ii
Summary	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Índice	vi
Índice de cuadros	vii
Índice de figuras	ix
I. INTRODUCCION	1
I.1. Aspectos generales	4
I.2. Escurrimiento superficial	10
I.3. Crecientes e inundaciones	12
I.4. Escurrimiento superficial	12
II. REVISION DE LITERATURA	14
II.1. Horton (1907)	15
II.2. Rutter (1971)	15
II.3. Gash (1986)	17
III. METODOLOGIA	21
III.1. Descripción del sitio de estudio	21
III.2. Métodos	24
III.3. Diseño del experimento	25
III.3.1. Recolección de flujo de precolación.	26
III.3.2. Recolección de flujo cortical	26
III.3.3. Caracterización del árbol	27
III.3.4. Precipitación	29
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
IV.1. Precipitación histórica	31
IV.2. Precipitación observada	31
IV.3. Intercepción	32
IV.4. Análisis precipitación-perdidas	35
IV.5. Perdidas obtenidas con modelo de Gash.	36
IV.6. Participación de la vegetación en la reducción de los costos por tratamiento de agua superficial.	39
V. CONCLUSIONES	45
VI. RECOMENDACIONES	46
VII. LITERATURA CITADA	48
VIII. ACRONIMOS	51
IX. ABREVIATURAS	52
X. APENDICE	53

ÍNDICE DE CUADROS

No.	Pagina
1. Componentes que intervienen en la interceptación de lluvia según Helvey y Patric.	7
2. Valores de interceptación por especies arbustivas, arbóreas y pastizales.	9
3. Valores de interceptación por tipo de cultivo agrícola	9
4. Valores de interceptación por tipo de residuos o Mulch.	10
5. Valores del coeficiente de escorrentía.	12
6. Ecuación original, revisada y actualizada del modelo analítico de interceptación. (Gash, et al., 1979,1995)	19
7. Características fenotípicas de <i>Jacaranda mimosifolia</i>	28
8. Características de la densidad de dosel de <i>Jacaranda mimosifolia</i>	29
9. Valores de las perdidas y escurrimientos obtenidos en los 28 eventos de lluvia	33
10. Perdidas calculadas por regresión lineal	36
11. Valores de velocidad del viento y humedad relativa utilizados para realizar el cálculo de las perdidas por interceptación haciendo uso del modelo de Gash.	37
12. Diferencias numéricas entre las perdidas observadas y las calculadas con el modelo de Gash.	38
13. Características del tramo de estudio ubicado sobre el B. Bernardo Quintana mismo que inicia en el parque Querétaro 2000 y termina en el puente del ferrocarril con dirección norte-sur.	40
14. Participación de la vegetación en el escurrimiento superficial.	41
15. Participación de la vegetación en el costo por tratamiento de agua residual.	42
16. Valores calculados de gastos máximos obtenidos con el método racional para los 28 eventos de lluvia.	44

17. Eventos de lluvia analizados.	53
18. Registro histórico de precipitaciones anuales, 1923-1995.	54
19. Registro histórico de precipitaciones mensuales, 1982-2004	56
20. Registro del arbolado muestreado en un transecto del B. Bernardo Quintana.	57

INDICE DE FIGURAS

No.	Pagina
1. Esquema de la repartición en porcentaje de la precipitación en zonas urbanas: Intercepción, escurrimientos, Infiltración y recarga profunda	5
2. Esquema de las fases del cambio de almacenamiento de la intercepción bajo la hipótesis que un árbol funciona como un reservorio.	6
3. Esquema que contiene los componentes que intervienen en el proceso de la intercepción de lluvia (Hudson et al., 2004).	8
4. Esquema del proceso de la generación de escurrimientos urbanos a nivel de calle.	11
5. Ubicación general del Estado de Querétaro	21
6. Ubicación de áreas verdes arboladas en la ciudad.	22
7. Imagen que muestra la evolución del crecimiento urbano de la ciudad sobre terrenos de vocación forestal durante el ciclo 1999-2005.	23
8. Ubicación del Río Querétaro en la zona urbana de la ciudad.	24
9. Esquema del sistema de medición de las perdidas por intercepción	26
10. Localización general del sitio experimental.	27
11. Vista general del árbol de la especie la <i>Jacaranda mimosifolia</i>	28
12. Esquema que muestra la clasificación de copa superior, media y baja así como el de brazos, ramas y ramillas.	29
13. Relación duración-precipitación-frecuencia para los eventos registrados.	30
14. Distribución de la frecuencia de las precipitaciones mensuales en la ciudad de Querétaro durante el periodo 1982-2004 (CNA)	31
15. Relación precipitación-perdidas para los 28 eventos de lluvia evaluados.	34
16. Comparación entre las pérdidas observadas y las calculadas con el modelo de Gash.	39
17. Transecto efectuado sobre el B. Bernardo Quintana donde se realizó el muestreo de Jacarandas.	40
18. Esquema que muestra la influencia de la vegetación en la generación de escurrimiento superficial en la ciudad para el transecto muestreado.	41
	43

I. INTRODUCCION

El creciente proceso de urbanización que experimentan las grandes ciudades, ha traído consigo un fuerte impacto sobre el medio ambiente, como ejemplo de ello, se tiene que los habitantes de la ciudad consumen una mayor cantidad de energía respecto los que habitan las zonas rurales, la generación de una gran cantidad de residuos sólidos, la contaminación del aire por la emisión de fuentes fijas y de los automóviles, el agotamiento de las fuentes de abastecimiento de agua, el incremento de los cambios de uso de suelo para satisfacer las demandas de territorio para impulsar polos de desarrollo, un deficiente servicio del drenaje pluvial y sanitario, escasas áreas verdes y el latente riesgo de los ciudadanos ha padecer afectaciones en sus bienes por la presencia de fenómenos hidrometeorológicos, tal es el caso de las inundaciones por lluvias intensas.

El régimen de precipitación, sobre todo en los climas de tipo semiárido, ha venido modificándose en la última década en forma de eventos extremos lo cual significa una probabilidad mayor de daños a la sociedad a través de inundaciones. Es por ello que la prevención y protección son prioritarias para evitar daños que frenen el desarrollo.

A diferencia de los bosques naturales, donde la intercepción esta sujeta a la preservación de la vegetación, en bosques urbanos, ésta participa de manera aislada lo cual hace que tenga un papel importante en la regulación y determinación de los escurrimientos superficiales. Un bosque urbano sano puede atenuar impactos de la precipitación excesiva del desarrollo urbano mediante el proceso de intercepción. (Lormand, 1988). En un evento de lluvia los agentes de contaminación de agua son lavados de las superficies impermeables, de áreas verdes y otras fuentes, mismas que posteriormente son transportados a los sistemas de alcantarillado. Si bien es cierto aun cuando diversos investigadores (Mc. Pherson, 1992) han concluido que la vegetación urbana aporta mayores ventajas relacionadas con la prevención de la contaminación de aguas superficiales que las vinculadas con la prevención de las inundaciones, también es innegable que la densidad de vegetación presente en una ciudad, influye en el comportamiento del escurrimiento y la calidad del agua.

Como ejemplo del papel preponderante del papel de la vegetación en la prevención de la contaminación de agua superficial, un estudio realizado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica en el año de 1994, determinó que la precipitación excesiva de las zonas urbanas, es la segunda fuente de contaminación del agua para los lagos y el tercero para los ríos de toda la nación (EPA, 1994). La acelerada urbanización aunada a una reducida cubierta vegetal, trae consigo cambios en el equilibrio ambiental de una ciudad ya que se altera la composición de los contaminantes que están presentes en el aire y suelo, se modifican los porcentajes de radiación solar, la temperatura, la visibilidad, la humedad, la velocidad y dirección del viento, la nubosidad, disminuye la capacidad de infiltración y percolación, y por supuesto, la intercepción de lluvia y su consecuente modificación del régimen lluvia-escurrimiento.

La plantación de árboles y el mantenimiento de los existentes, en el largo plazo contribuyen a reducir el volumen de escurrimiento de salida en las zonas urbanas.

La intercepción es la parte de la precipitación que es retenida por el follaje y que es evaporada durante y después de cada evento de lluvia; es la parte de la precipitación que nunca alcanza el suelo, razón por la cual es definida como pérdida por intercepción.

Del fenómeno de intercepción, se deduce que sí del total de agua precipitada, una parte es retenida por el dosel, fuste, ramas y hojas de la flora que se ubica en una zona urbana, esto significa que la intercepción del agua de lluvia por la vegetación arbórea, juega un papel importante en el proceso del escurrimiento superficial ya que impacta de manera directa en el comportamiento del flujo modificando, entre otras variables, la tasa de evaporación, el tiempo de concentración y el volumen.

La intercepción, es decir, la lamina o altura de la lluvia conservada temporalmente en el dosel de la vegetación para ser evaporada posteriormente (Horton 1919) constituye una porción significativa de la precipitación incidente y tiene una influencia significativa en el presupuesto de la energía y del agua en la superficie de la tierra. (Calder 1977, 1992). La capacidad de intercepción es particularmente influenciada por factores tales como el índice y área de la hoja, intensidad y tipo de precipitación, las fuerzas de tensión en la superficie de contacto de las hojas lo cual es resultado de la configuración de su superficie, de la viscosidad líquida y de la actividad mecánica (Aston,1979). Este fenómeno es particularmente importante en zonas áridas y semiáridas que cuentan con una baja cobertura de vegetación arbórea, bosques naturales con gran densidad de vegetación y en las áreas urbanas donde, regularmente, encontramos grandes superficies impermeabilizadas. Las pérdidas por intercepción en cuencas urbanas, influyen en el balance de agua, sobre todo si las cuencas se localizan en climas áridos y semiáridos donde se presentan precipitaciones irregulares.

Xiao et al., (2002,2006), indicó que la capacidad de intercepción de la vegetación urbana está influenciada por su estructura, (mezcla de especies, ubicación, densidad y cobertura) y la arquitectura del árbol (dosel, dimensión y forma de las hojas, ramas y troncos, porosidad y capacidad de almacenamiento) así como por factores meteorológicos y de la precipitación tales como la intensidad, duración, frecuencia y tasa de evaporación. En zonas urbanas los árboles de calles y parques generalmente se ubican en zonas abiertas y en forma aislada, de manera que la capacidad de almacenamiento del dosel de cada árbol opera como un mini reservorio el cual regula la entrada de los escurrimientos urbanos. La cantidad de agua interceptada puede determinarse bajo teoría lineal, es decir, la integración individual del comportamiento en el espacio y tiempo de cada árbol de la misma especie.

Existen pocos trabajos sobre el impacto de la intercepción de la vegetación urbana, entre ellos el realizado por Xiao (2002) en Santa Mónica, California, quien determinó que la plantación y existencia de 29,999 árboles en calles y parques de esta ciudad, significó un ahorro anual para la ciudad

derivado del tratamiento de aguas del orden de \$1'208,171.00 MN. (\$110,890 USD, que significó 3.69 USD/árbol).

Encontró que la *Jacaranda mimosifolia* con 3.5 cm. de DAP, intercepta 15.3 % de la precipitación (0.8 m³/árbol) mientras que un *Bacharis conferta* con 38 cm. de DAP, alcanzó un valor de hasta 66.5 % (20.8 m³/árbol). La intercepción de la precipitación varió en cada estación, haciendo un promedio de 14.8% durante una tormenta del invierno de 21.7 mm y de 79.5% durante una tormenta del verano de 20.3 mm para un árbol grande, de hojas caducas de *Platanus*. Para los Estados Unidos de Norteamérica, American Forest, (1996) consignó que el bosque urbano de este país está estimado en 400 billones de dólares respecto a su participación en la regulación del escurrimiento superficial.

La intercepción puede exceder de un 59% para árboles viejos con reducido crecimiento, (Baldwin et al. 1938), En bosques naturales, Zinke (1967) encontró que del 15% al 40% de la precipitación incidente anual se puede perder por intercepción en bosques de coníferas.

En una investigación realizada por científicos y estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la UAQ en la ciudad de Santiago de Querétaro durante el año 2005 que constó del análisis de 19 eventos de lluvia, se determinó que la vegetación de la Avenida Zaragoza conformada por 172 árboles (*Ficus benjamina*) redujo el volumen y el costo de tratamiento de agua contaminada derivada del escurrimiento superficial en un promedio de 2.89% (7600.36 m³ y \$ 35,721.74 pesos m⁻³). (Veliz C. et al., 2005)

Objetivo general.

Determinar la cantidad de la precipitación que es retenida por la especie de *Jacaranda mimosifolia* en una zona urbana.

Objetivos específicos.

- a) Determinar una relación entre la precipitación y la intercepción de lluvia.
- b) Cuantificar el volumen retenido por efecto de la intercepción.
- c) Formular recomendaciones para la gestión de cuencas urbanas.

Meta.

Cuantificar el efecto de la intercepción de lluvia por la presencia de *Jacaranda mimosifolia* en una zona urbana.

Alcances de la investigación.

Los resultados obtenidos validaran el uso de la especie *Jacaranda mimosifolia* en los programas de plantaciones urbanas municipales cuyo

propósito sea el retardar a través de la intercepción de lluvia, el escurrimiento superficial.

Los resultados obtenidos servirán de base a las Instancias de Gobierno que operan los programas de plantaciones urbanas, con pleno conocimiento del papel que desempeña la especie *Jacaranda mimosifolia* en la intercepción de lluvia.

1.1. Aspectos generales

El concepto de intercepción es una porción de la precipitación que humedece la superficie de los elementos de la vegetación y puede almacenarse temporalmente, y un fenómeno que ocurre dentro de una cuenca natural o urbana que afecta el cambio de almacenamiento en el suelo y la distribución de las variables que intervienen en el proceso del escurrimiento. La intercepción ha sido estudiada por más de un siglo (Hoppe, 1896) y quizás ha recibido más atención que los otros componentes del balance hidrológico de un bosque (Swank, 1978).

Wilm, (2003), menciona que los datos experimentales obtenidos en diversos climas y tipos de bosques indican que la cantidad de lluvia interceptada por una copa es función del espacio del almacenamiento que existe en la superficie de la vegetación. Por ende, un bosque espeso de árboles con copa alta y densa, interceptará, según esto, la máxima cantidad de agua descargada por una tormenta y la mínima intercepción corresponderá a una copa con vegetación escasa. Es pues que; Además de la clase y densidad de la vegetación, la intercepción es menor a medida que avanza la tormenta y que va saturando la cubierta de la copa, al final de una tormenta intensa y prolongada la copa sólo retiene una cantidad de agua apenas suficiente para compensar la evaporación que durante la lluvia se produce en la superficie de las hojas. De esta manera, las pérdidas máximas por intercepción de lluvia suceden en climas que se caracterizan por tener lloviznas cortas y separadas por períodos de tiempo.

Horton (1919), fue el primero en describir el proceso de intercepción de lluvia, tanto para bosques naturales como para matorrales, arbustos e incluso para algunos cultivos agrícolas. Observó que al inicio de los eventos de lluvia, el porcentaje de precipitación que alcanza el suelo es pequeño, aumentando conforme avanza la duración de la tormenta, es decir, el volumen de agua que alcanza el suelo es mínimo en precipitaciones de corta duración y grande en tormentas severas o de larga duración. Entre algunas de sus conclusiones mencionó que al inicio de las tormentas una gran cantidad de gotas de agua que golpean las hojas que conforman el follaje son retenidas extendiéndose a lo largo de la superficie foliar formando una capa delgada de agua que se agrupa en zonas de depresión lo cual permite retener una parte de esta agua ya que un pequeño porcentaje será drenado hacia el suelo, de igual manera estableció que juega un papel importante la forma de la hoja y el ángulo que forman respecto a la horizontal de tal forma que la fuerza de tensión que se establece entre la superficie de la hoja y el agua puede ser afectada por la fuerza del viento, la intensidad de la lluvia y la fuerza del impacto de las gotas de cada tormenta. Una vez que se alcanza la máxima capacidad de

almacenamiento en la hoja, el agua es drenada hacia las partes bajas a la cual se le integra el agua que es salpicada por el impacto de las gotas de lluvia. El tamaño de las gotas que son salpicadas se incrementa al atrapar aire.

La lluvia también puede atravesar la copa sin entrar en contacto la cual es difícil de medir y junto con el goteo, constituye la percolación, (García O. et al., 2006)

La interceptación es un componente fundamental en la evaporación de todas las cuencas naturales y urbanas ya que llega a representar el 70% de la evaporación total. En los ecosistemas urbanos la interceptación modifica el proceso de escurrimiento ya que reduce los volúmenes y modifica el tiempo de concentración vía el agua retenida en el dosel; del mismo modo, reduce el riesgo de inundación, el aporte de contaminantes por el lavado de superficies, es decir, disminuye los costos derivados por el tratamiento de aguas residuales. Figura 1.

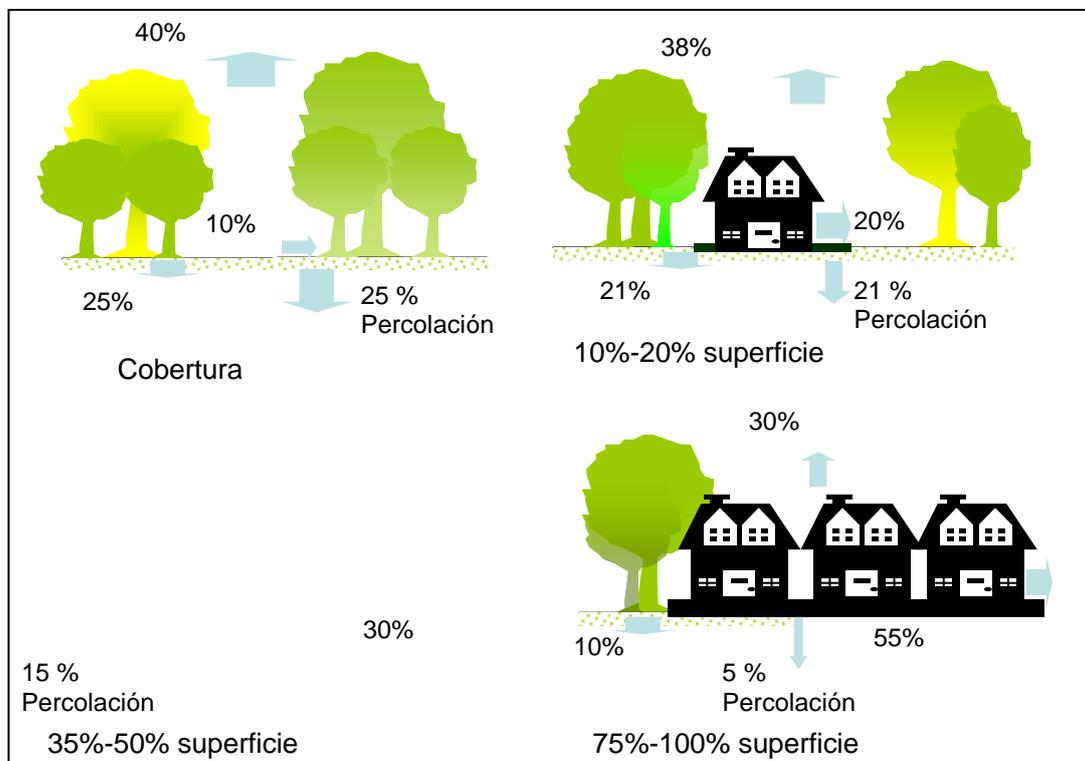


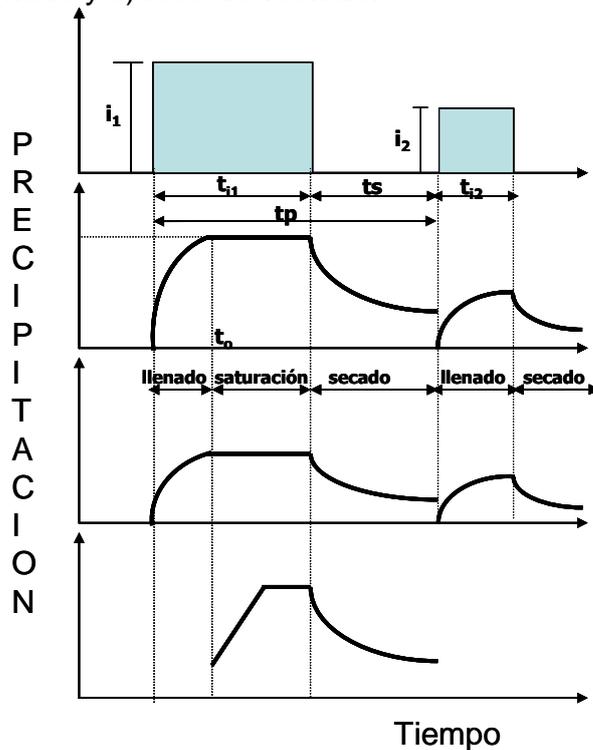
Figura 1. Esquema de la repartición en porcentaje de la precipitación en zonas urbanas: Interceptación, escurrimientos, Infiltración y recarga profunda.

Rutter, (1971), desarrolló un modelo de base física para predecir la interceptación de lluvia en un bosque de *Pinus corsican*, el cual tenía como idea principal que considera a la vegetación como un reservorio que es vaciado por la evaporación y el drenaje. La evaporación y el drenaje en la vegetación varían de acuerdo a la cantidad de agua almacenada, de tal forma que el modelo calcula el balance en el periodo de lluvia, flujo de percolación, la evaporación y cambios en el almacenaje. (Hernández et al., 2004).

En general se distinguen tres fases consecutivas en el fenómeno de interceptión.

En la primera fase la vegetación se moja gradualmente, es decir, el reservorio se está llenando. El término gradual indica que una parte de la lluvia se esta evaporando y otra parte esta drenando, esto significa que la parte superior del dosel regula el humedecimiento del follaje inferior y de las ramas que da lugar al escurrimiento cortical (Zeng et al., Horton 1919, Calder 1986). En la segunda fase, el agua retenida en la superficie de la vegetación esta expuesta a la evaporación y el excedente de la capacidad de almacenamiento es drenado el suelo, esta fase es conocida como saturación. Así mismo, en ese momento el flujo de vapor que regresa a la atmósfera se considera igual a la evaporación potencial y el drenaje tiende a ser constante. Figura 2.

Figura 2. Esquema de las fases del cambio de almacenamiento de la interceptión bajo la hipótesis que un árbol funciona como un reservorio, función de la evaporación potencial (E_p). a) Fase de llenado. b) Fase de saturación o llenado y c) fase de vaciado.



- Fase I $C \leq S$

$$\frac{dC}{dt} = \alpha P_g - E_p \frac{C}{S} - D$$

- Fase II $C = S$

$$\frac{dC}{dt} = (1 - \alpha P_g) - E_p - D$$

- Fase III

$$\frac{dC}{dt} = -k \exp(bC) - E_p \frac{C}{S}$$

Figura 2. Esquema de las fases del cambio de almacenamiento de la interceptión bajo la hipótesis que un árbol funciona como un reservorio, función de la evaporación potencial (E_p). a) Fase de llenado. b) Fase de saturación o llenado y c) fase de vaciado.

Una vez que cesa el evento de lluvia, el drenaje se reduce exponencialmente y toda el agua retenida en la vegetación se evapora, fase que es conocida como secado. Las tres etapas se alcanzan cuando el evento supera la capacidad de almacenamiento del dosel.

Teóricamente la tasa de humedecimiento de la parte superior depende del tamaño de gotas y la capacidad de almacenamiento crece lentamente para lluvias con gotas grandes, la distribución de los tamaños de gotas depende del tipo de lluvia (David et al., 2006). La lluvia de tipo convectivo, frecuente en zonas tropicales, condiciona gotas grandes, en cambio, las tormentas de tipo orográfico presentan gotas pequeñas.

Con base en el trabajo de Helvey y Patric (1965) quienes definieron los términos que están integrados en el proceso de intercepción, (Cuadro 1) (Modificado por González E., 2007), es factible describir por evento el balance hídrico de un árbol y su afectación en los escurrimientos urbanos.

Cuadro No. 1. Componentes que intervienen en el proceso de la intercepción de lluvia según Helvey y Patric, 1965. (Modificado por González E., 2007)

Símbolo	Definición
P_g	Precipitación en zona abierta o arriba del dosel de la vegetación
EI	Evaporación de la precipitación interceptada por el dosel
EI_r	Evaporación de la precipitación retenida por el lecho de residuos vegetales, suelo o pavimento
αP_g	Porción de la precipitación que alcanza directamente el suelo o el lecho de residuos sólidos, la cual pasa a través de los espacios del dosel y gotea por las hojas y ramas.
S_t	Porción de la precipitación bruta la cual es captada por el dosel y drenada al suelo o lecho de residuos a través del flujo por el tronco o fuste.
D	Precipitación drenada por las hojas del dosel.
P_n $P_n = (\alpha P_g) + S_t + D$	Porción de la precipitación bruta que ingresa al suelo después que pasa por el dosel y el lecho de residuos vegetales, algunas veces llamada lluvia efectiva o neta.

La intercepción o pérdidas por intercepción es la suma de la evaporación a partir de las superficies húmedas de los elementos del árbol (E), principalmente el dosel y la evaporación de la precipitación almacenada después que la lluvia ha cesado (S). Para una precipitación suficientemente larga para saturar el dosel se tiene:

$$EI = \int_{t_0}^{t_1} E dt + S \quad (1)$$

Si la precipitación cesa antes de saturar el dosel las pérdidas son iguales a:

$$EI = \int_{t_0}^{t_1} E dt + C \quad (2)$$

Siendo C la precipitación retenida para saturar parcialmente al dosel.

En forma simple la intercepción tomando en cuenta las tres fases del proceso, pueden explicarse con la relación siguiente: Figura 3

$$\frac{dC}{dt} = (\alpha P_g - E - D) \quad \text{Para } 0 \leq C \leq S \quad (3)$$

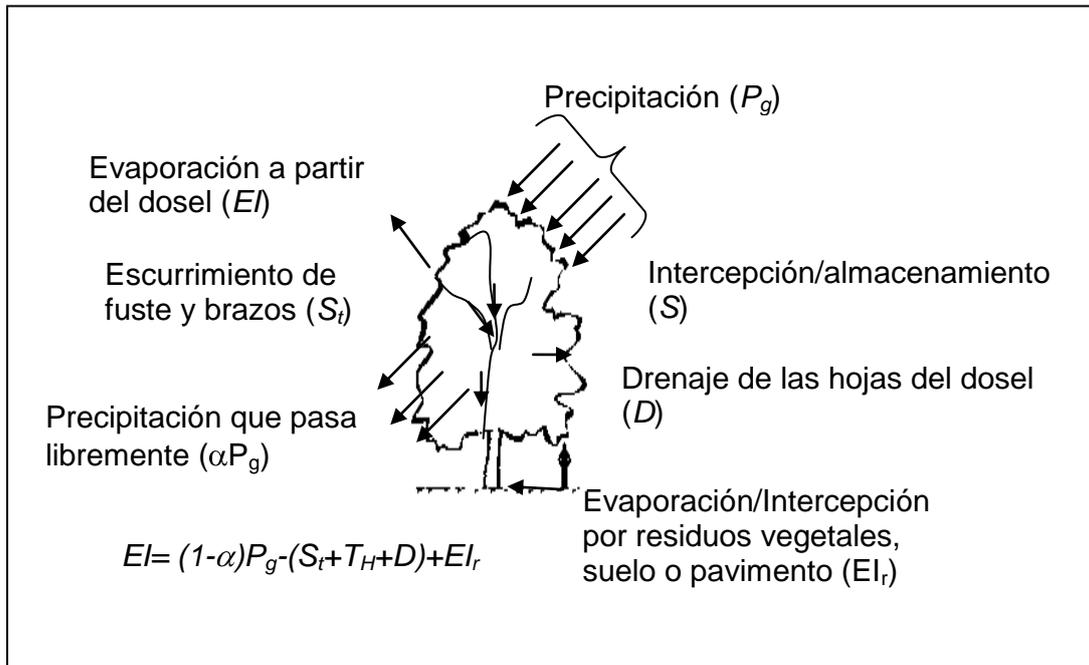


Figura 3. Esquema que contiene los componentes que intervienen en el proceso de la intercepción de lluvia (González E. et al., 2007)

La Ecuación 3 no incluye la intercepción del sotobosque o la evaporación del suelo o calles porque se considera disponible para los escurrimientos superficiales.

De igual forma considerando la intercepción neta del ejemplar arbóreo, esta será igual a la precipitación menos la sumatoria de la percolación, el drenaje y escurrimiento del fuste (incluyendo el generado en brazos) y del dosel.

$$EI = P_g - (\alpha P_g + S_t + D) \quad (4)$$

La Ecuación 4 se reduce al integrar en un solo termino la precipitación que logra llegar al suelo, como la suma de la porción que pasa libremente por el dosel y la parte que es drenada por los elementos del dosel, de tal forma que las pérdidas por intercepción pueden calcularse como

$$EI = P_g - (T_h + S_t) \quad (5)$$

Para bosques naturales, el CATIE (2001), menciona que los bosques constituidos por vegetación tropical interceptan entre un 10 y 30 % de la lluvia señalando además que a partir de una investigación en la micro cuenca del Río Jalapa en Yoro, Honduras donde se aplicó una lluvia simulada, se obtuvieron los siguientes resultados. Cuadro 2.

Cuadro 2. Valores de intercepción de lluvia por especies arbóreas, arbustivas y pastizales. (Jiménez et al., 2001)

Especie	<i>Pinus sp.</i>	<i>Quercus sp.</i>	<i>Coffea Arabica</i>
P _g (mm)	970	970	970
EI _r (mm)	36	16	5
EI (mm)	385	325	450

Con relación a la capacidad de almacenamiento, Horton (1919), reportó valores promedio para diversos cultivos. Cuadro 3

Cuadro 3. Valores de intercepción por tipo de cultivo agrícola

Cultivo	Capacidad de almacenamiento (mm)
Maíz	0,8
Algodón	8,4
Tabaco	1,8
Cereales Menores	4,1
Prados	2,0
Alfalfa	2,8

Por ultimo, Xiao (2002), concluyó que se carece de información suficiente sobre intercepción de lluvia por árboles urbanos ubicados en espacios abiertos.

Respecto a la capacidad de intercepción de residuos vegetales o mulch, estudios de laboratorio efectuados por Hernández *et al.*, (2004) indicaron que la intercepción varía entre el 5% y el 90%, dependiendo de las características de la precipitación, entre las principales, intensidad y duración. Cuadro 4.

Los valores obtenidos de la capacidad de intercepción por residuos vegetales, muestran la participación de éste en la aportación de volumen al escurrimiento superficial ya que modifica la tasa de infiltración y el tiempo de concentración de la cuenca. En las ciudades, esta modificación tiene su origen en la intervención del hombre a consecuencia de la eliminación de vegetación y la remoción de suelo para construir desarrollos habitacionales e infraestructura urbana, situación que implica la impermeabilización de terrenos.

Cuadro 4. Valores de intercepción por tipo de residuo o mulch. (Hernández et al., 2004)

Tipo de lecho	Capacidad de intercepción E_{I_r} (%)	Capacidad almacenamiento (z=5cm) S (mm)
Hojas de Álamo	5-21	2.5
Pasto silvestre	6-24	3.3
Aserrín	15-98	8.9

I.2. Escurrimiento superficial.

El escurrimiento superficial esta influenciado por el régimen de lluvias de una región y por las características físicas del sitio y es de suma importancia conocer su impacto en las zonas bajas de cuencas naturales y cuencas urbanas, para delimitar las zonas de inundación, diseño de redes de drenaje y control de crecientes, plantas de tratamiento, entre otras. Cuando los escurrimientos urbanos producen disturbios en las ciudades, se hace necesario tomar medidas para mitigar y reparar los daños que estos ocasionan. El restablecimiento de los daños depende de la comprensión de los procesos hidrológicos y ecológicos que rigen el comportamiento de los escurrimientos urbanos. Una medida de mitigación de los escurrimientos urbanos es el establecimiento de árboles en calles, avenidas y parques urbanos.

La forma básica de comprender el proceso de escurrimiento de basa en el concepto de conservación de masa

$$\Delta S = Q_{in} - Q_{out} \quad (6)$$

Siendo ΔS el cambio de masa en el tiempo, Q_{in} la masa de entrada y Q_{out} la masa de salida en un cierto periodo de tiempo. Tanto la entrada como la salida dependen las características del lugar. Es decir que el movimiento del agua esta sujeto a la capacidad de transporte del lugar, la cual depende de los elementos que se oponen a su movimiento. En la Figura (4) se muestra un esquema de este concepto, donde la entrada y la salida son definidos como

$$\begin{aligned} Q_{in} &= iA_s \\ Q_{out} &= CiA \end{aligned} \quad (7)$$

Donde i es la intensidad media de un evento de lluvia, C el coeficiente de escurrimiento, A el área y Δt duración del evento. Los escurrimientos que se generan en las calles están sujetos a la forma y características de los edificios y casas, banquetas y camellones y la cobertura de árboles aislados. Figura 4.

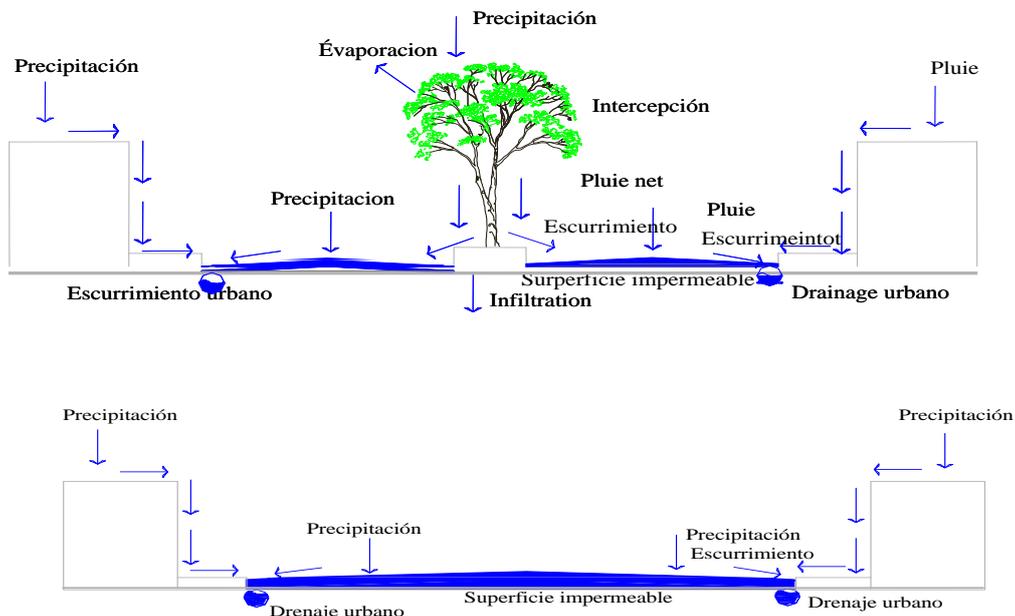


Figura 4. Esquema del proceso de la generación de escurrimientos urbanos a nivel de calle.

El escurrimiento superficial simboliza el volumen de agua que se deriva de la precipitación. La dimensión del escurrimiento superficial depende de factores como intensidad de la lluvia, topografía, condiciones naturales o artificiales de la cuenca y la cantidad de lluvia interceptada por la vegetación urbana.

En las ciudades, las superficies impermeabilizadas por el concreto, asfalto y otros materiales presentes en las viviendas y otras construcciones, aunado a las prácticas de arboricultura o podas que se realizan antes de la temporada de lluvias incrementan el escurrimiento superficial.

La correlación entre la superficie de construcción, la superficie urbanizada y las áreas verdes provocan una acción inmediata en el proceso de los escurrimientos urbanos, esto sin tomar en cuenta la parte interceptada por la vegetación.

De lo antes dicho se concluye que la vegetación presente en una ciudad, aun cuando se encuentre dispersa, participa de manera importante en la generación de escurrimiento superficial.

Para estar en condiciones de aplicar la ecuación del método racional (7) desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos de Norteamérica (la cual considera un tiempo de precipitación igual al tiempo de concentración de la cuenca), y estimar la escorrentía superficial, se debe conocer previamente el valor del coeficiente de escurrimiento. Cuadro 5.

Cuadro 5. Valores del coeficiente de escorrentía (C) con base en el tipo de superficie. (Fuente: Monsalve G. et al., 1999)

Tipo de superficie	Coeficiente C
Suelos arenosos, planos, con 2 % de pendiente	0.05-0.10
Suelos arenosos con pendiente promedio de entre 2 y 7 %	0.15-0.20
Suelos pesados planos, con 2 % de pendiente	0.13-0.17
Suelos pesados con pendiente promedio de entre 2 y 7 %	0.18-0.22
Suelos pesados con pendiente de 7 %	0.25-0.35
Áreas del centro de ciudades	0.70-0.95
Casas individuales separadas	0.30-0.50
Casas multifamiliares unidas	0.60-0.75
Suburbana	0.25-0.40
Departamentos	0.50-0.70
Parques y cementerios	0.10-0.25
Campos de juego	0.20-0.35
Áreas de patio de ferrocarril	0.20-0.40
Áreas no desarrolladas	0.10-0.30
Asfaltadas	0.70-0.95
Concreto	0.80-0.95
Calzadas y alamedas	0.75-0.85
Techos	0.75-0.95

I.3. Crecientes e inundaciones.

Regularmente se identifican dos causas de crecientes, la acumulación de lluvia en las partes bajas de una cuenca y el desbordamiento de obras de almacenamiento y de regulación a consecuencia del exceso del volumen de agua generado por eventos extremos o bien por el crecimiento de superficies impermeables (Figura 1). En zonas urbanas una creciente causa inundaciones cuando el agua se vierte por fuera del canal de conducción o bien por falta de capacidad para el desalojo regulado de la lluvia en exceso, también por la basura que ocupa las entradas y salidas del drenaje, la existencia de obstrucciones aguas abajo que impide el paso adecuado de la creciente, como es el caso de un vertedero mal dimensionado. Otra causa de creciente y de inundación, paradójicamente, es la construcción de obras que tienen como finalidad combatirlas, tal y como sucede cuando la conducción de agua de lluvia o la rehabilitación de un canal solamente sirve para trasladar el flujo aguas abajo de la creciente, siendo en este caso, y no la precipitación efectiva, la causa de inundación, (Monsalve G. et al., 1999) debido a que se acorta el tiempo de concentración o porque se acelera y rebasa la capacidad hidráulica natural y de diseño de algunas de las secciones de ríos y drenes.

I.4. Influencia de la vegetación en el escurrimiento superficial

Las calles impermeables dentro de una ciudad funcionan como colectores naturales del agua de lluvia, causando daños a la sociedad cuando se rebasa la capacidad hidráulica de los sistemas de desagüe de las ciudades. En las ciudades, la lluvia es interceptada por la vegetación urbana y los techos de las edificaciones. Las edificaciones interceptan y almacenan la lluvia en los

techos, la cual llega al suelo por medio del sistema de tuberías que impiden la acumulación de volúmenes de agua en estos, evitando así derrumbes por incremento de peso (Veliz C. *et al.*, 2006).

Generalmente la escorrentía superficial en zonas urbanas se genera en forma natural como resultado del exceso de lluvia que es capaz de producir un incremento en el volumen de agua, al existir una mayor cantidad de superficie impermeable.

En las zonas urbanas, la precipitación interceptada por el dosel, así como las áreas de jardines disminuye el volumen de los escurrimientos superficiales.

El volumen de escurrimiento superficial es generado por la diferencia entre la precipitación neta y la precipitación total. Ecuación 8

$$Q_{out} = C \left(\frac{P_g - P_n}{t_1 - t_0} \right) (A_s - A_v) \quad (8)$$

Siendo i_f la intensidad efectiva promedio durante la duración del evento (t_1-t_0) expresada como:

$$i_f = \left(\frac{P_g - P_n}{t_1 - t_0} \right) \quad (9)$$

Combinando las Ecuaciones 7 y 9 se obtiene que el escurrimiento real que se genera por la presencia del árbol es igual a:

$$R = iA_s - C \left(\frac{P_g - P_n}{t_1 - t_0} \right) (A_s - A_v) \quad (10)$$

II. REVISION DE LITERATURA

El proceso de intercepción ha sido ampliamente estudiado en formaciones arbóreas relativamente homogéneas, de cubierta continua y en muchos casos monoespecíficas de zonas templadas y tropicales, (Horton, 1919; Rutter, 1963; Zinke, 1967; Herwitz, 1985; Crockford *et al.*, 2000; Chappell *et al.*, 2001; Levia, 2004). Por lo que la mayoría de las aproximaciones empíricas y modelos de los que se dispone han sido calibrados para este tipo de situaciones (Rutter *et al.*, 1971; Gash, 1979, Watanabe, 1996; Jetten, 1996; García O. *et al.*, 2006)

Los modelos desarrollados para bosques naturales no son aplicables a las áreas urbanas porque el microclima y la arquitectura de las especies son diferentes además de que generalmente son árboles aislados, incluso en parques urbanos. El gradiente térmico puede variar más rápidamente en bosques urbanos que en bosques naturales. Las diferencias del microclima afectan las tasas de evaporación de la hoja y otros procesos hidrológicos. (Xiao Q., McPherson E, G. y otros *et al.* 2003)

Comparando los bosques naturales con los urbanos, los últimos tienen pocos árboles por unidad de área, el diámetro a la altura del pecho es más grande en promedio, y existe una mayor variación espacial en la cubierta de la copa. (McPherson *et al.* 1998).

La intercepción es controlada por variables meteorológicas y por la arquitectura de la vegetación (Crockford y Richardson, 1990), por lo que existe un buen número de modelos empíricos, de base física y de tipo estocástico para estudiar la influencia de los diversos factores que intervienen en la intercepción.

Los modelos empíricos y estadísticos son de aproximación de primer orden que usan ecuaciones de tipo lineal para determinar la intercepción. Los modelos estadísticos estiman la intercepción como una proporción lineal de la precipitación total (Horton 1919; Zinke 1967). Los coeficientes de regresión para los métodos estadísticos son difíciles de obtener puesto que son procedidos de un sitio específico además de requerir una larga serie de datos históricos para su derivación.

El proceso de intercepción de lluvia, es dinámico, con constantes cambios en el almacenaje de la cubierta ya que esta presente el fenómeno de la evaporación en la copa, ramas y dosel, situación que modifica la precipitación efectiva. (Calder 1996).

En contraste con el acercamiento estadístico, Rutter (1975.1977) desarrolló un modelo físicamente basado en la intercepción de la copa que calcula el equilibrio del agua existente en el follaje y dosel. Este modelo fue probado con éxito (Morton 1978; Lloyd y otros. 1988) con datos de una plantación conífera en Gran Bretaña.

Entre los modelos mas conocidos de tipo estocástico, se encuentran el de Gash (1979) y el de Calder (1986,1996), Gash modificó el modelo de Rutter

para describir el comportamiento de una serie de eventos considerando que el tiempo entre eventos es suficiente para que se seque la superficie de la vegetación, además asume que la lluvia y la evaporación son constantes.

En cambio Calder utiliza la distribución de Poisson para modelar el mojado y secado de la superficie de la vegetación, Hall (1992) introduce el efecto de la distribución del tamaño de gotas para cuantificar el número de gotas que se tendrán por cada elemento de la superficie del follaje.

II.1. Horton, (1907).

Este autor es de los primeros que realizó investigaciones para estimar la interceptación de lluvia para diversas especies vegetales en la década de los 40's. Sin embargo, la relación que desarrolla es de origen semiempírico a partir de observaciones realizadas en diversos tipos de vegetación y la estimación del escurrimiento por el dosel y el fuste. Los registros del flujo de percolación los efectuó colocando recipientes abajo del dosel del árbol.

Durante la tormenta observó que las primeras gotas que se precipitan, son depositadas y retenidas en la superficie de las hojas del dosel, la cantidad retenida dependió de la forma y tamaño de las hojas. Una vez superada su capacidad de almacenamiento, es decir la fuerza de tensión que retiene temporalmente el agua en la superficie de las hojas, la lluvia retenida fluyó y fue drenada hacia la parte inferior del dosel la cual es propagada hacia otras hojas para finalmente llegar hacia el suelo.

Horton (1907) propuso que las pérdidas por interceptación, se explican como la suma de la capacidad de almacenamiento y la evaporación producida por unidad de superficie en su proyección horizontal, durante la duración del evento. El modelo de tipo lineal considera el dosel como una capa homogénea en su proyección horizontal. La interceptación igual a:

$$EI = kEt + S \quad (11)$$

Evidentemente la Ecuación 11 tiene el inconveniente de considerar la proyección horizontal del dosel como fuente de evaporación. También es importante destacar que el modelo de Horton es la base de las relaciones lineales que actualmente se utilizan en cálculo de las pérdidas por interceptación como un porcentaje de la precipitación.

II.2. Rutter, (1971)

El modelo por Rutter es uno de los primeros modelos de base física para estimar las pérdidas por Interceptación. Viene a cambiar el concepto propuesto por Horton (1907) al considerar el funcionamiento de la vegetación como un reservorio.

Establece que la superficie del dosel funciona como un reservorio, la cual se llena o vacía por evaporación o drenaje. De tal forma que el balance de masa es igual a:

$$EI = \sum E = \sum P_g - \sum T_h \quad (12)$$

Por otra parte también estableció α como la proporción de lluvia que pasa libremente sin tocar las hojas del dosel, de manera que la Ecuación 12 de balance de masa para cualquier periodo durante el evento es

$$(1-\alpha)\sum P_g = \sum D + \sum E \pm \Delta C \quad (13)$$

Notar que:

$$\sum T_h = \alpha P_g + \sum D \quad (14)$$

Asumió que se requiere un valor mínimo (S) de agua para humedecer toda la superficie del dosel. Valor que corresponde a la capacidad de almacenamiento definida por Horton (1919) y Zinke (1967) o valor de saturación propuesto por Leyton (1967). Definición comparable con la capacidad de campo del suelo. C puede ser más grande que S .

Cuando $C \leq S$ se tiene que la evaporación es igual

$$E = E_p \frac{C}{S} \quad (15)$$

Rutter propone que el drenaje D tiene un comportamiento de tipo exponencial en función de C :

$$D = \exp(-kC) + bC \quad (16)$$

Así rescribiendo la Ecuación 16 como:

$$-\frac{dC}{dt} = k \exp(-kC) \quad (17)$$

La cual al incluir la percolación resulta igual a:

$$-\frac{dC}{dt} = k \exp(-kC) - \alpha P_g \quad (18)$$

Cuando $C \geq S$ la Ecuación 15 incluye el termino de evaporación. Por el contrario cuando $C < S$ se tiene:

$$-\frac{dC}{dt} = k \exp(-kC) - \alpha P_g + E_p \frac{C}{S} \quad (19)$$

Es de suma importancia mencionar que Rutter y Horton, no consideran el efecto de la entrada de lluvia lateral motivo por el cual los resultados obtenidos pueden estar sobrestimados ya que este factor puede incrementar los valores de interceptación y además, fueron aplicados en bosques naturales donde la composición y estructura de la vegetación, pudieron haber influido en los valores obtenidos.

II.3. Gash, (1979).

En este modelo se considero la precipitación como una serie de eventos discretos durante los cuales el proceso de intercepción de lluvia pasa por tres fases:

- 1) Fase de mojado de dosel, donde P_g (mm), precipitación inferior al umbral para llegar a la saturación (P'_g)
- 2) Fase de saturación del dosel, la intensidad de la precipitación (R) excede la evaporación a partir de la superficie del dosel
- 3) Fase de secado, vaciado de la cubierta vegetal, la cual se presenta después de que finalizo el evento de lluvia

Asumió que el tiempo entre eventos es suficiente para secar el dosel. La estructura de la vegetación está definida en términos de la capacidad de almacenamiento (S) precisada como la cantidad de agua que sale del dosel en condiciones de saturación y evaporación nula, una vez terminado el evento.

$$EI = I_w + I_s + I_d \quad (20)$$

Para estar en condiciones de aplicar este modelo, es necesario conocer la tasa de evaporación (E) y la intensidad media (R).

La cantidad de lluvia interceptada en m eventos insuficientes para saturar la cubierta vegetal (I_c) es:

$$I_c = (1 - p - p_t) \sum_{j=1}^m P_{g,j} \quad (21)$$

Considerando eventos suficientes para saturar la cubierta vegetal, determinó la cantidad de lluvia (I_w) como:

$$I_w = n(1 - p - p_t)P'_g - nS \quad (22)$$

La evaporación en la etapa de saturación (I_s)

$$I_s = \left(\frac{\bar{E}}{R}\right) \sum_{j=1}^n P_{g,j} - P'_g \quad (23)$$

La evaporación después de la evaporación (I_d).

$$I_d = nS \quad (24)$$

Es decir, la intercepción de lluvia puede ser evaluada a través de la ecuación siguiente:

$$EI = I_w + I_s + I_d + I_c \quad (25)$$

Sustituyendo las ecuaciones 21, 22,23 Y 24 en la ecuación 25 se tendrá:

$$P^t = -\frac{\bar{R}S}{\bar{E}} \ln \left[1 - \frac{\bar{E}}{\bar{R}(-p - p_t)} \right] \quad (26)$$

Este modelo, puede aplicarse bajo las siguientes observaciones: la presencia de varios eventos de manera diaria y la condición de que entre uno y otro evento, el agua que fue almacenada haya sido evaporada. (Leyton *et al.*, 1967). Cuadro 6.

Las consideraciones del modelo pueden resumirse como sigue

1. La precipitación es una serie de eventos discretos, separados por periodos que garantizan el secado del dosel. Es por ello que los totales de la lluvia incidente (P_g), la percolación (T_h) y el flujo cortical (S_t) durante un evento pueden ser utilizados para modelar la interceptación
2. La tasa promedio de la evaporación \bar{E} es bien representada durante las tormentas. De igual la consideración implícita de la relación $\frac{\bar{E}}{\bar{R}}$ es igual para todas las tormentas.
3. No existe drenado por salpicado antes de alcanzar la capacidad S .
4. La evaporación de las ramas ocurre después de cesada la tormenta.

Las consideraciones 2 y 3 son claras simplificaciones que no producen buenos resultados mas allá de lo que se esperaba (Gash *et al.*, 1980). La consideración 3 puede resultar una sobreestimación de la porción (p) de la lluvia que pasa libremente a través del dosel, cuando ésta es calculada con la relación de la percolación y la precipitación menos P_g . La consideración 4 de origen mal concebida, usualmente es de poca importancia debido que es poco significativo la diferencia de almacenamiento en el tronco y el dosel, principalmente porque las tasas de evaporación del tronco son pequeñas.

Cuadro 6. Ecuación original, revisada y actualizada del modelo analítico de interceptación. (Gash, et al., 1979,1995)

Componentes de las pérdidas por interceptación	Modelo original de Gash, 1979	Modelo revisado por Gash, 1995.	Adaptación de Gash, 1995
Para m tormentas insuficientes para saturar la copa ($PG \leq P'G$)	$(1 - p - pt) \sum_{j=1}^m PG_j$	$c \sum_{j=1}^m PG_j$	$\sum_{j=1}^m c_j PG_j$
Para m tormentas suficientes para saturar la copa ($PG > P'G$)			
Mojado arriba de la copa	$n\{(1 - p - pt)PG - S\}$	$n\{cP'G - S\}$	$\sum_{j=1}^n \{c_j P'G_j - S_{vj}\}$
Mojado de la copa para evaporar durante tormenta	$E/R \sum_{j=1}^n (PG_j - P'G)$	$E/R \sum_{j=1}^n (PG_j - P'G)$	$\sum_{j=1}^n E_j / R (PG_j - P'G_j)$
Evaporación después de cesar la lluvia	nS	nS	$\sum_{j=1}^n S_{vj}$
Evaporación desde el fuste para q tormentas $> S \backslash Pt$ para cualquier saturación del fuste, en la columna izquierda para n+m-q, o bien, columna central para n-q cualquiera.	$qSt + pt \sum_{j=1}^{m+n-q} PG_j - P'G'$	$qSt + pt \sum_{j=1}^{n-q} PG_j - P'G'$	Incluidos todos los terminos superiores a la fracción S_{sj}/S_{vj} del total de las pérdidas por interceptación.
Parámetros			
Lluvia necesaria para saturar la copa	$P'G = -RS / E \ln \left[-E / (1 - p - pt) R \right]$	$P'G = -RS / E \ln \{1 - E / cR\}$	$P'G_j = -RS_{vj} / E_j \ln \{1 - E_j / c_j R\}$
Porcentaje de evaporación de la copa	$E = E_w$	$E = cE_c$	$E_j = (1 - e^{-aL_j}) E_a$
Capacidad de copa	S	$S = cS_c$	$S_{vj} = L_j S_L + S_{Sj}$
Fracción de copa cubierta	$1 - p$	c	$c_j = 1 - e^{-kL_j}$

Aduciendo a las concepciones inadecuadas del modelo original porque resultó inapropiada la aplicación en vegetaciones dispersas, (Teklehaimanot *et al.*, 1991. Gash *et al.*, 1995) reformularon el modelo original. Agregaron el parámetro adicional de cobertura (c) y propusieron una relación linealmente dependiente entre S y la evaporación del dosel.

De esta forma el error de considerar la evaporación relativa $\frac{\bar{E}}{\bar{R}}$ de forma independiente de $\overline{(-p - p_t)}$ lo cual produce un logaritmo negativo de la precipitación \bar{P}'_g necesaria para saturar el dosel en la condición de $\overline{(-p - p_t)} \bar{R} < \bar{E}$.

De la adaptación del modelo de Gash et al. (1976. 1995) propuesta por Van Dijk y Bruijnseel (2001) se concluye que:

1. La capacidad del dosel (S_L) esta linealmente relacionada con el índice foliar (LAI)
2. La evaporación relativa $\left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}} \right)$ puede expresarse en función de LAI
3. El agua retenida en las ramas puede tratarse en forma similar al agua retenida en el dosel, por ejemplo la evaporación en condiciones saturadas de las ramas durante la tormenta.

III. METODOLOGIA

III.1. Descripción del sitio de estudio.

El trabajo se desarrollo en la Ciudad de Santiago de Querétaro en el Estado de Querétaro, dentro de las instalaciones del centro universitario de la Universidad Autónoma de Querétaro el cual se localiza a un costado del parque urbano Cerro de las Campanas. Figura 5



Figura 5. Ubicación General del Estado de Querétaro, México. (Fuente: SEMARNAT, 2003)

La ciudad de Santiago de Querétaro se localiza en la región Centro del Estado del mismo nombre. Además de ser la capital, es el centro industrial más grande de la entidad, concentra más del 50% de la población, junto con las localidades de la Cañada y El Pueblito, cabeceras de los municipios de El Marques y Corregidora con los cuales integran la zona conurbada.

La extensión territorial municipal es 760 km², superficie que representa aproximadamente el 7 % del área estatal (Administración municipal 2000-2003), se ubica en la subprovincia fisiográfica del altiplano mexicano y de manera particular, se localiza entre el parteaguas continental que divide las regiones hidrológicas de los ríos Panuco y Balsas los que drenan sus aguas hacia el Golfo de México y el Pacífico respectivamente, esta condición origina que las lluvias que se presentan en su mayoría sean de tipo convectivo (González E. et al. 2000).

La ciudad de Santiago de Querétaro, se encuentra a una altitud promedio de 1820 msnm y cuenta con una población de 536,500 habitantes los cuales cuentan con 0.37 km² de áreas verdes (INEGI-2002), entre las que destacan las Alamedas Central, Norte y Sur, Cerro de las Campanas y el Parque Querétaro-2000, en esta área no se incluyen espacios ajardinados de calles y avenidas ya que estos, durante los recorridos efectuados por la ciudad, se observó que generalmente contienen pastizales y/o están desprovistos de vegetación; hasta el año 2003, la cifra representó un promedio de 0.69 m² de área verde por habitante, parámetro que esta por debajo de los 9 m²/habitante que recomienda la Organización Mundial de la Salud. (Caballero et al. 2002).Figura 6.

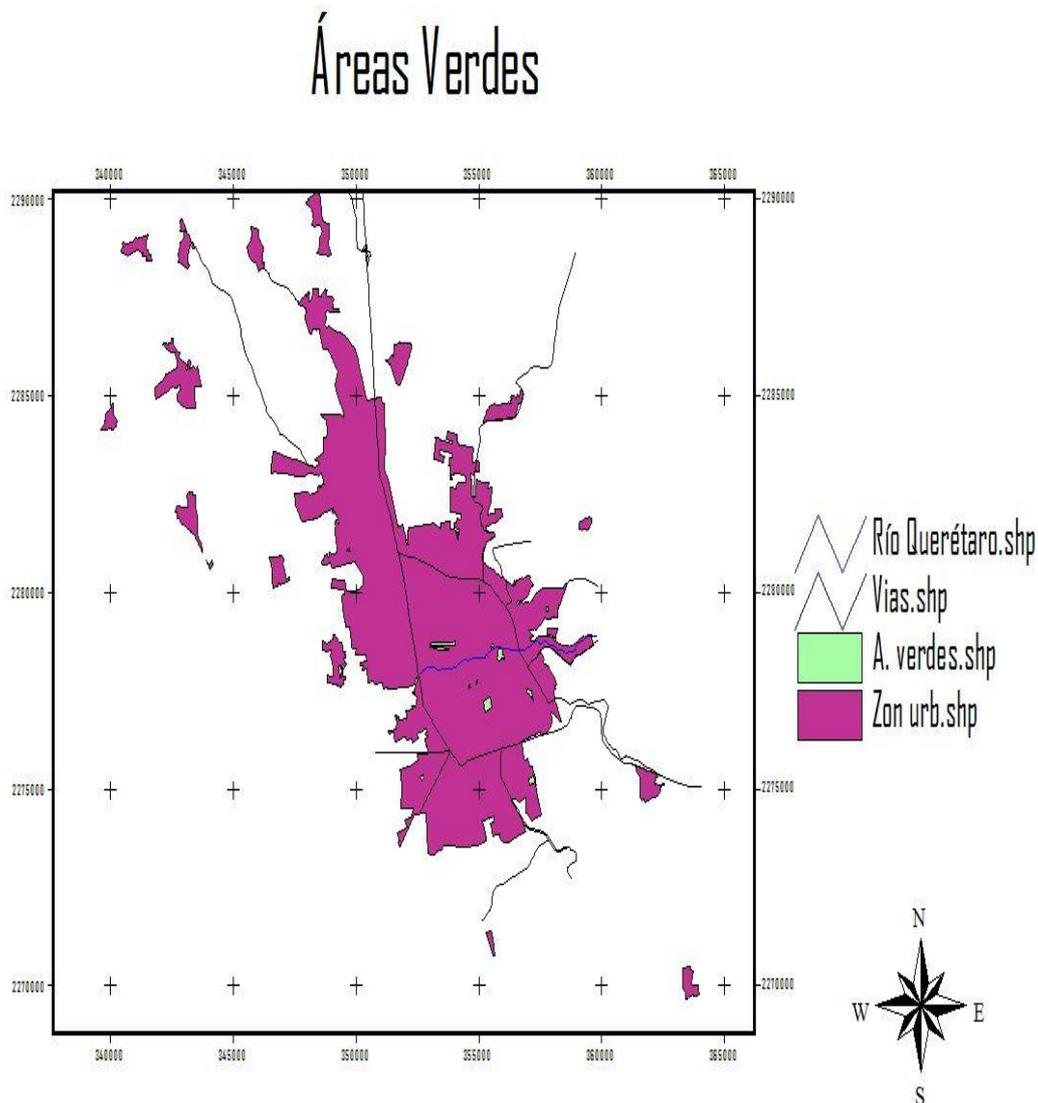


Figura 6. Ubicación de áreas verdes arboladas en la ciudad. (Fuente: INEGI-2002)

Por su ubicación geográfica en el centro del país, la zona urbana de Querétaro experimenta un continuo crecimiento poblacional que implica una demanda cada vez mayor de espacios para la instalación de industrias, conjuntos habitacionales, carreteras, etc., sin embargo, este desarrollo ha

traído consigo que muchas de las veces, la demanda de territorio sea satisfecha en detrimento de la vegetación nativa.

La presidencia municipal de Querétaro, (2003), reportó que en todo el territorio se cuenta con 4.50 m² de área verde por habitante que significa un déficit de 5.50 m². La diferencia entre la cantidad calculada (0.69 m²) con información del 2002 y la notificada por el municipio (4.50 m²) se atribuyó a que la presidencia municipal incorpora además de las áreas verdes municipales los espacios ajardinados, en cambio, el calculo efectuado se realizó únicamente para la ciudad y sin incluir estos espacios debido a que una gran cantidad de ellos están desprovistos de vegetación así como la dificultad que representa el cuantificar los árboles en calles y avenidas, tal es el caso de las avenida Corregidora que cuenta con abundantes especies arbóreas.

La Figura 7 ilustra que hasta el año de 1999 se tenía una superficie municipal urbanizada de 8,119 ha., y para el año 2005 esta cantidad tuvo un incremento, principalmente sobre terrenos de vocación forestal, de 3551 ha., sin embargo, según registros de SEMARNAT, hasta el año 2006, solamente se habían autorizado alrededor de 1,000 ha., cifra que muestra la fuerte presión antropogénica a que esta sometida la vegetación forestal. (Fuente: Calculo propio elaborado con datos del Inventario Nacional Forestal y de Suelos, 2000.SEMARNAT)

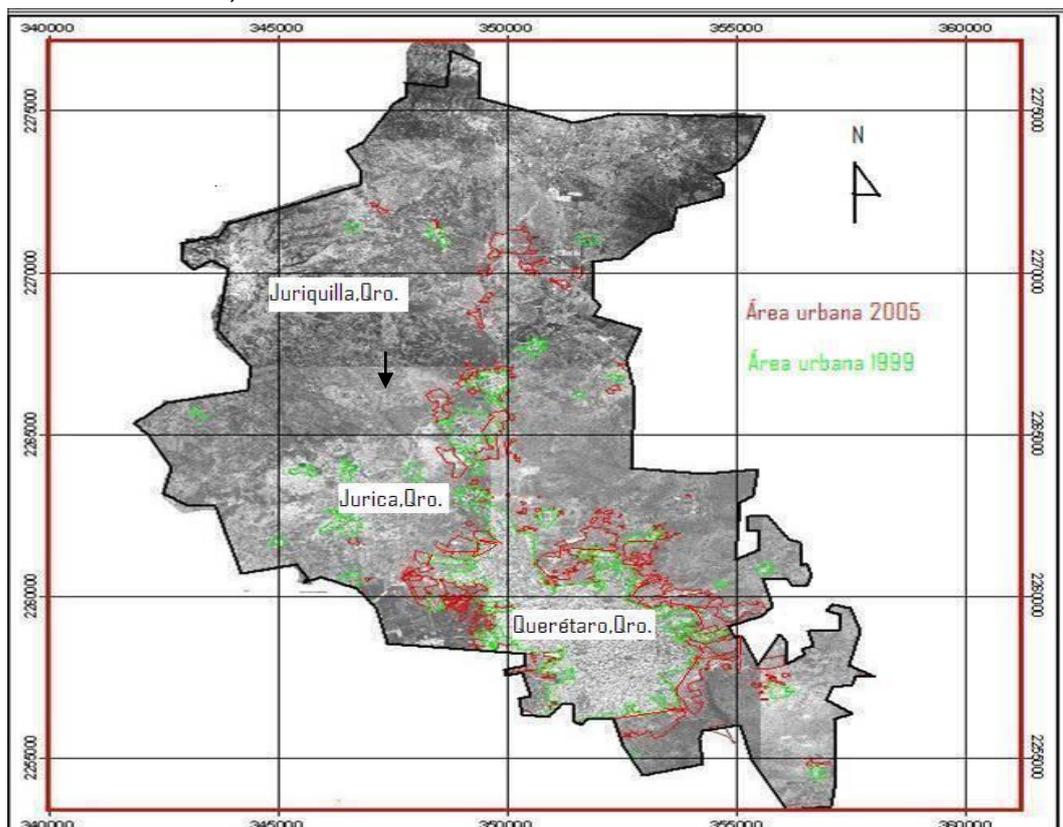


Figura 7. Imagen que muestra la evolución del crecimiento urbano de la ciudad y su zona conurbada sobre terrenos de vocación forestal durante el ciclo 1999-2005. La línea verde señala la superficie urbanizada que la ciudad tenía hasta el año de 1999, en color rojo se indica la expansión de la ciudad al año 2005.

Con base en datos de la Comisión Nacional del Agua, se tiene que la precipitación anual promedio histórica es de 548 mm, con una mínima 274.1 mm en el año de 1979 y una máxima de 999.2 mm en 1933, la temperatura promedio anual es de 18.7 °C, predominan los vientos originados del este y noreste. La evaporación potencial media anual oscila en el rango de los 2,050 a 2,200 mm, la zona urbana esta situada dentro de una micro cuenca semicerrada y asimétrica, cuyo principal corriente de agua de tipo permanente es el río Querétaro el cual se integra al río El pueblito, Figura 8. (González E. et al. 2005)

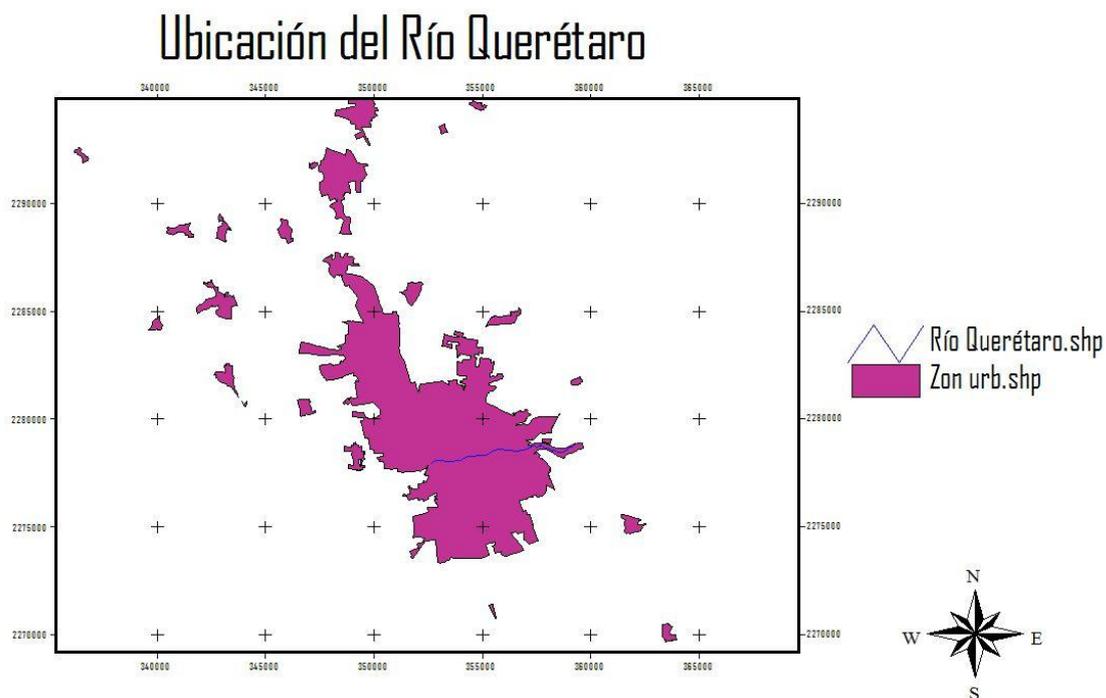


Figura 8. Ubicación del Río Querétaro.

III.2. Metodología

El método que se utiliza en este trabajo se basa en la metodología desarrollada por Guevara *et al.*, (2006) para medir la interceptación de un árbol aislado de la especie *Ficus benjamina* que es otra de las especies dominantes de la vegetación que conforma el bosque urbano de la ciudad. En particular la especie *Jacaranda mimosifolia* es una especie que abunda en las avenidas Corregidora Norte, en el B. Bernardo Quintana y en algunas colonias del centro histórico de la ciudad. En el anexo cuadro 20 se resumen las características de algunos ejemplares contabilizados en la Av. Bernardo Quintana.

La *Jacaranda mimosifolia* conocida comúnmente como “Jacaranda” es una especie perteneciente a la familia *Bignoniáceae*, misma que se caracteriza por alcanzar una altura de 10 a 15 m, caducifolio, originario de América del sur (Brasil, Argentina y Uruguay), actualmente se cultiva en algunas regiones tropicales y subtropicales de México, sensible a heladas y sequías, de copa

ancha, esférica e irregular, corteza fisurada, rugosa, oscura o de color verde-gris, es un árbol poco tolerante al smog ya que cuando este es excesivo, tira sus hojas. (Fuente: Árboles y Arbustos para el Municipio de Querétaro, Presidencia Municipal de Querétaro, Qro., 2002). La copa tiene una proyección de 4 a 6 m. con una sombra de mediana intensidad. Es un árbol de crecimiento medio y una longevidad de más de 100 años. La floración se produce de mayo a junio y a veces tiene una segunda floración, más escasa, hacia septiembre u octubre.

Utilización: veredas anchas de avenidas, parques y plazas, de crecimiento lento, raíces poco agresivas, bajo riesgo de desrame y sensible al ataque de la cochinilla. (Fuente: Subsecretaria de Agricultura y Economía Rural de la Republica de Argentina). Es un árbol al cual no se le da un uso industrial, solamente se utiliza como planta de ornato que proporciona sombra y que es muy utilizado en calles, parques y jardines por el colorido de sus flores de un tono morado-azul. Figura 11. (Roca N. *et al.* 1986)

Resistencia ambiental: resiste bien la contaminación urbana, pero no la industrial. En lugares muy contaminados el dosel se desgrena, pasando a un proceso de decrepitud. Por su aspecto las Jacarandas son interesantes en jardinería, para decorar, por la belleza de sus flores, en parques y jardines urbanos donde la contaminación es menor. Puede ser utilizado en calles y avenidas de bajo tránsito vehicular, pero en estas condiciones su tamaño se ve limitado. Especie utilizada como árbol de alineación, de forma aislada o formando grupos.

Enfermedades y plagas: en ocasiones es atacada por hongos como *Capnodium citri* (fumagina) y *Xanthomonas glandis*; también por pulgones. Aunque es bastante resistente a enfermedades de hongos e insectos. Tolera el desrame y tiene un buen comportamiento ante la poda. Requiere podas de limpieza y de forma. Árbol no demasiado exigente y de crecimiento relativamente rápido. Las heladas le perjudican, sobre todo a los ejemplares jóvenes, que llegan a morir. Florece abundantemente en exposición soleada. La reproducción es por semillas a fines de invierno o principios de primavera. Admite con dificultad el trasplante en primavera u otoño.

III.3. Diseño del experimento

El sistema experimental se diseñó en dos partes, la primera consistió en la medición de la precipitación con un pluviómetro manual. El pluviómetro se ubicó a una distancia aproximada de 300 m del ejemplar evaluado en una zona libre de obstáculos. La segunda parte fue con el fin de medir directamente y por evento el flujo cortical y de percolación. La relación de las dos partes sirvió de base para determinar las pérdidas por intercepción del ejemplar seleccionado.

Debido al conflicto para determinar, seleccionar y ubicar una especie aislada y representativa en condiciones naturales y la dificultad para medir los componentes del balance de masa durante cada evento, solamente se midió la intercepción total por evento y durante un periodo de cuatro meses en el periodo de lluvias del año 2005.

III.3.1. Recolección del flujo de percolación

Debido a la copa irregular del ejemplar seleccionado, el cálculo de de de la proyección de la superficie del dosel se realizó midiendo su radio y posteriormente, se proyectó el área a través de la sumatoria de las superficies obtenidas en cuatro trapecios y un triángulo, resultando esta en 23 m².

Para medir el flujo que percoló a través del dosel, el cual engloba al salpicado por las gotas de lluvia, el drenado y la lluvia que pasa libremente por los huecos del dosel, se construyó un contenedor abierto tipo sombrilla que cubrió toda la proyección del dosel.

El contenedor de captación fue formado por áreas irregulares de plástico transparente con el fin de bordear toda el dosel y para evitar acumulación de calor que acelere la evaporación y provoque turbulencia adicional a la inducida en forma natural por el viento, el contenedor tiene una pendiente de 30° hacia el centro del árbol para drenar el agua captada y dirigirla mediante una canaleta de PVC hacia un recipiente con capacidad de 100 l. Figura 9.

III.3.2. Recolección del flujo cortical

El flujo cortical fue colectado mediante un collarín de plástico colocado a una altura de 1 m. con un desarrollo de una vuelta y media sobre el diámetro del tronco, el flujo se concentró en un recipiente con capacidad de 50 l. El volumen almacenado al final de cada evento fue convertido a lámina de lluvia.

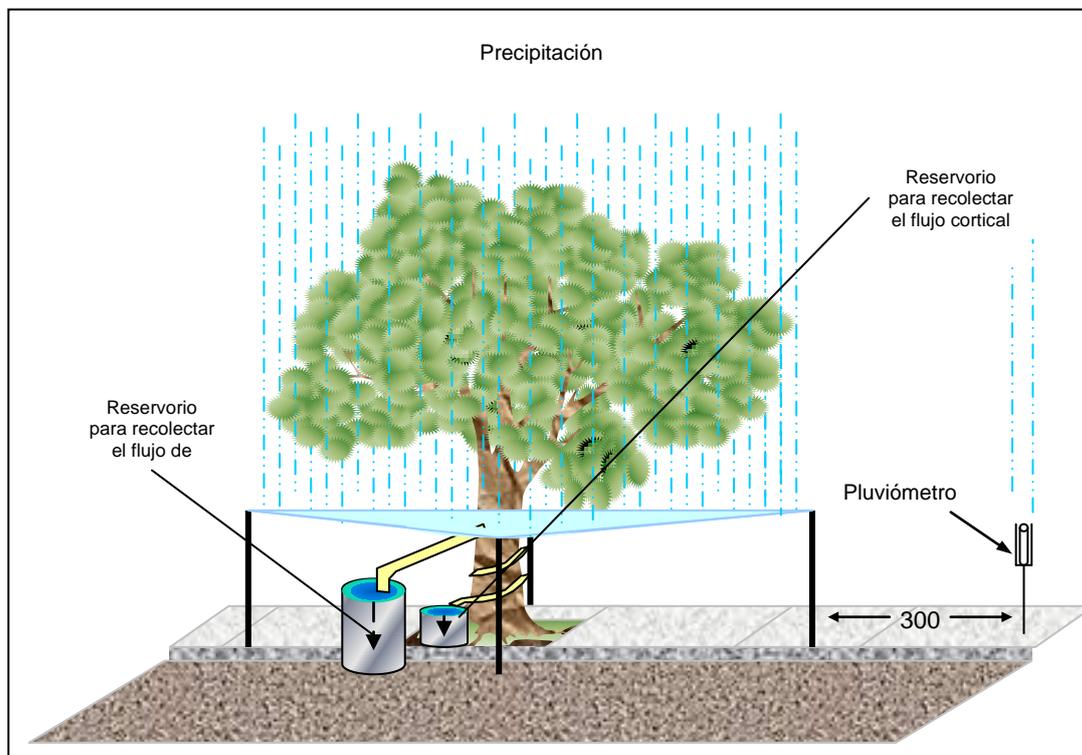


Figura 9. Esquema del sistema de medición de las pérdidas por interceptación.

III.3.3. Caracterización del árbol *Jacaranda mimosifolia*

El árbol seleccionado se localiza en el costado poniente del cerro de las campanas y en el circuito principal de CU, topográficamente se encuentra sobre una ladera de aproximadamente 30°, el árbol corresponde a la especie de *Jacaranda mimosifolia*, con una altura de 5 m., una edad aproximada de 9 años y un DAP de 0.28 m. La corona presentó un área de 23 m² y no existe un obstáculo cercano que provoque sombra, la superficie de rodamiento esta compuesta de asfalto. Se desconoce si el árbol ha sido podado en diferentes años. En la parte inferior no existe vegetación arbustiva, no obstante se encuentran mas ejemplares de esta especie en los alrededores del sitio experimental. Durante el periodo de evaluación, el área del dosel no fue alterada. Figura 10

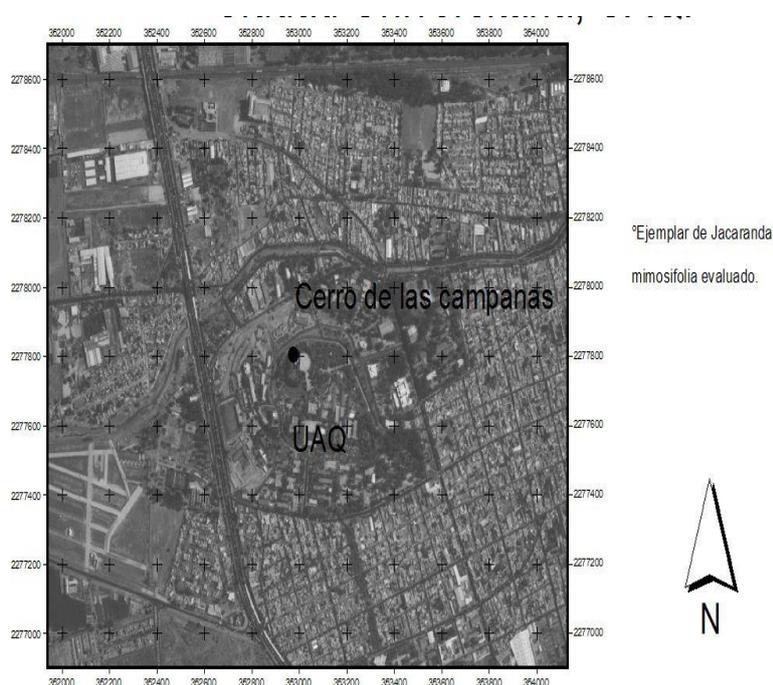


Figura 10. Localización general del sitio experimental dentro de las instalaciones de la UAQ.

Así mismo, se efectuó un muestreo de las características del dosel y de su estructura obteniendo los siguientes resultados en 50 muestras tomadas al azar. Cuadro 7.

Cuadro 7. Características fenotípicas de *Jacaranda mimosifolia*.

Altitud	1827 msnm
Exposición	N
Ubicación Geográfica:	227788 (N) 352914 (E)
Dendrómetricas	
Altura Total (m)	5
Edad (años)	9
DAP (m)	0.28
Altura de Ramificación (m)	1.25
Forma de la Copa	Irregular
Cobertura de copa (%)	Media (50-75)
Superficie de Copa Cubierta (m ²)	23
Número de Brazos	Cuatro
*Diámetro de los brazos (m)	0.17, 0.13, 0.21 y 0.17

*Nota: Se entiende como brazo a las extensiones vegetales que se originan directamente del fuste.



Figura 11. Vista general del árbol de la especie *Jacaranda mimosifolia*.

Para clasificar la copa superior, media y baja, la altura de la copa (3.75 m) se fraccionó en tres segmentos de 1.25 m. cada uno asignándole a los primeros 1.25 m. que existen a partir del primer brazo el nombre de copa baja, la siguiente distancia copa media y finalmente los últimos 1.25 m. el de copa superior. Cuadro 8.

Cuadro 8. Características de la densidad de dosel.

Atributo cuantitativo	Copa Superior	Copa Media	Copa Baja
Longitud Promedio de Ramillas (mm)	56.66	98.33	76.66
Promedio de Hojas por Ramillas (mm)	38	47	32
Promedio de la Longitud de Hojas:	5	15	10
Promedio del ancho de Hojas :	2	4	5

El nombre de ramillas se refiere a las extensiones del follaje que tienen su origen en las ramas las que a su vez parten de los brazos. Figura 12

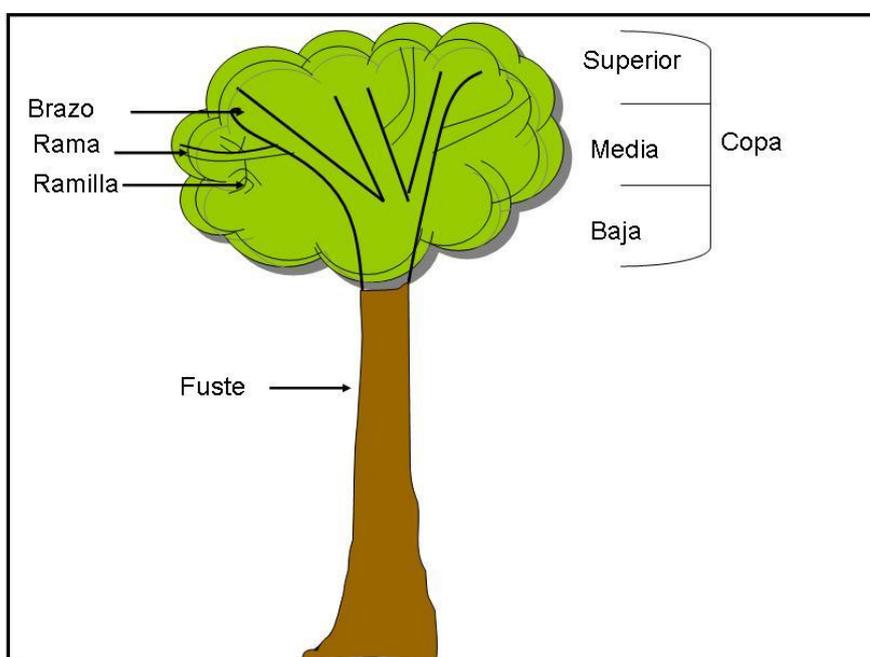


Figura 12. Esquema que muestra la clasificación de copa superior, media y baja así como el de brazos, ramas y ramillas.

III.3.4. Precipitación

La precipitación fue registrada por evento mediante un pluviómetro totalizador ubicado a una distancia aproximada de 300 m del sitio experimental, misma que se cuantificó de manera inmediata al término de cada evento. La base de datos comprendió 28 eventos que ocurrieron entre el día 18 de julio y el 10 de octubre de 2005.

En la Figura 13 se muestra el comportamiento de la duración contra la precipitación generada en cada evento.

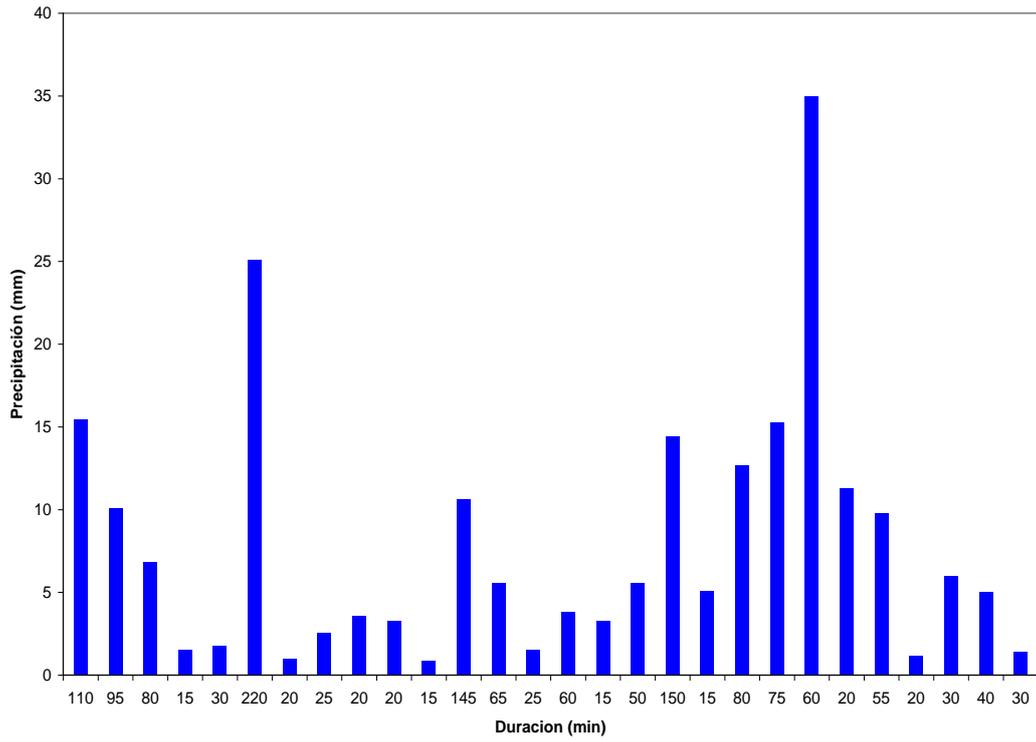


Figura 13. Relación precipitación-duración para los eventos de lluvia registrados.

V. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

IV.1. Precipitación histórica.

De la figura 14 se determinó que el 64.35 % de los eventos de lluvia que se registraron durante el periodo 1982-2004, oscilaron en el rango de entre 0.1 y 10 mm. De manera inversa, se observa que los mayores valores de agua precipitada (superiores a 10 mm.) representaron aproximadamente el 35 % de la lamina total, esta situación indica que el comportamiento del régimen de lluvias, esta sujeto a constantes variaciones en el tiempo y espacio. (Fuente: Estación Climatológica Centro de la CNA)

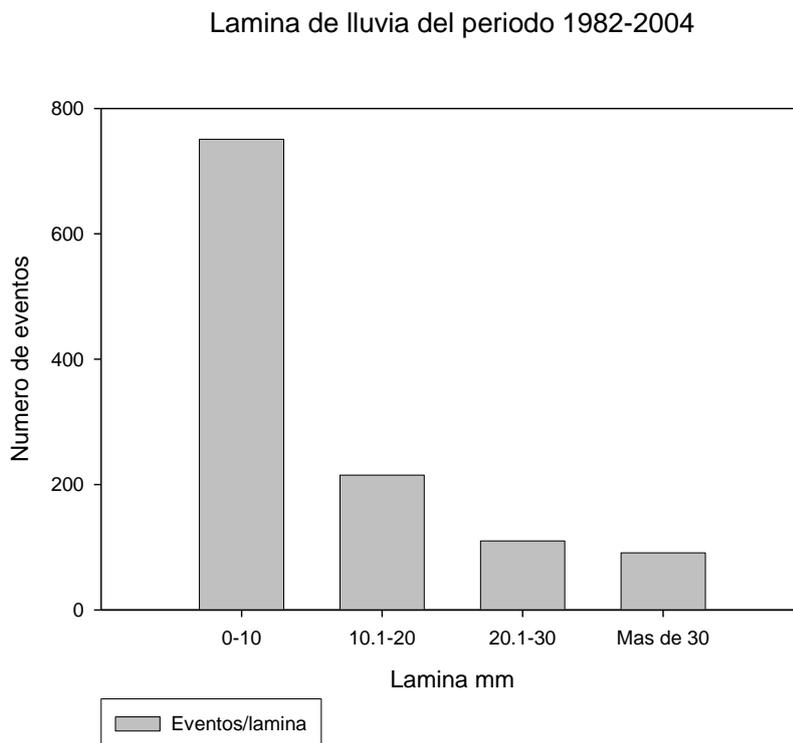


Figura 14. Distribución de la frecuencia de las precipitaciones mensuales en la ciudad de Querétaro durante el periodo 1982-2004 (CNA).

Esta variabilidad anual de la lluvia, se corrobora con los datos del cuadro 18 en la cual se asientan registros de precipitaciones mensuales en la zona urbana del periodo 1923-1995 donde se observó que se han presentado meses de hasta 401 mm (julio de 1933) y de manera opuesta, solamente 0.3 mm en junio de 1936. (Fuente: Estación Climatológica Centro de la CNA.)

IV.2. Precipitación

Durante el periodo de observación de julio a octubre del 2005 ocurrieron 28 eventos que generaron una precipitación de 219 mm la cual represento el 40% de la precipitación media anual (548 mm). Con excepción de los registrados los días 26 de Julio y 31 de agosto, la precipitación oscilo entre 1 y 37 mm y una duración de 15 minutos a 3 h 40 minutos, con valores promedio de 7.8 mm y 56 minutos, respectivamente. Agosto fue el mes más lluvioso con 123 mm (56

%) producto de 15 eventos, seguido de julio con 7 eventos que produjeron 61.8 mm (28%), los cuales, entre ambos, representan el 84% de la precipitación registrada durante el estudio. La mayor precipitación ocurrió el 31 de agosto con 35 mm y una duración de una hora.

El 17 % de los eventos fueron menores de 1.5 mm y de igual forma aconteció para precipitaciones entre 1.5-3 mm, de manera que mas de la mitad de los eventos fueron superiores a 3 mm.

La intensidad promedio por evento fue de 9.3 mm h^{-1} y vario de 2.8 a 35 mm h^{-1} , de tal forma que el 29 % de los eventos fue $i < 5 \text{ mm h}^{-1}$, el 65 % de ellos con $5 \text{ mm h}^{-1} < i < 15 \text{ mm h}^{-1}$ y 2 eventos que representa el 7% con una $i > 30 \text{ mm h}^{-1}$.

IV.3. Intercepción

Las pérdidas por intercepción fueron calculadas mediante las ecuaciones 4 y 5, ya que conociendo la lluvia que se precipito sobre la copa del árbol (P_i), y la lluvia percolada (Th) mas el flujo de escurrimiento de fuste y brazos, se obtiene por balance de masa la lluvia interceptada (EI) para cada evento. Cuadro 9

Cuadro 9. Valores de perdidas y escurrimientos obtenidos en los 28 eventos de lluvia analizados.

Mes	Día de Lluvia	Tiempo Min.	Día de lectura	P mm	Esc. Fuste mm	%	Esc. Follaje mm	%	Esc. Total mm	Esc. Total %	Perdidas Totales Mm	%
Julio	18	110.00	18	15.46	0.37	2.36	7.04	45.56	7.41	47.92	8.05	52.08
	19	95.00	19	10.11	0.21	2.11	4.70	46.45	4.91	48.55	5.20	51.45
	20	80.00	20	6.83	0.14	2.04	2.83	41.38	2.97	43.41	3.86	56.59
	21	15.00	21	1.52	0.01	0.34	0.22	14.30	0.22	14.65	1.30	85.35
	25	30.00	25	1.76	0.00	0.25	0.27	15.56	0.28	15.81	1.48	84.19
	26	220.00	26	25.12	0.65	2.60	9.48	37.73	10.13	40.33	14.99	59.67
	27	20.00	27	1.00	0.01	1.09	0.22	21.74	0.23	22.83	0.77	77.17
Agosto	2	25.00	2	2.53	0.08	3.27	0.91	36.09	1.00	39.35	1.53	60.65
	8	20.00	8	3.60	0.03	0.72	0.78	21.74	0.81	22.46	2.79	77.54
	9	20.00	9	3.30	0.03	1.05	1.17	35.57	1.21	36.63	2.09	63.37
	11	15.00	11	0.90	0.00	0.00	0.33	36.23	0.33	36.23	0.57	63.77
	11	145.00	11	10.60	0.26	2.46	4.17	39.38	4.43	41.84	6.17	58.16
	14	65.00	14	5.60	0.14	2.48	2.74	48.91	2.88	51.40	2.72	48.60
	15	25.00	15	1.50	0.00	0.00	0.35	23.19	0.35	23.19	1.15	76.81
	21	60.00	21	3.80	0.06	1.49	2.30	60.64	2.36	62.13	1.44	37.87
	22	15.00	22	3.30	0.08	2.37	2.39	72.46	2.47	74.84	0.83	25.16
	25	50.00	25	5.57	0.14	2.58	3.35	60.10	3.49	62.68	2.08	37.32
	26	150.00	26	14.42	0.57	3.95	7.17	49.75	7.74	53.70	6.68	46.30
	28	15.00	28	5.08	0.12	2.31	3.09	60.77	3.20	63.08	1.88	36.92
	29	80.00	29	12.69	0.27	2.09	5.26	41.46	5.53	43.55	7.16	56.45
	30	75.00	31	15.30	0.55	3.61	6.48	42.34	7.03	45.95	8.27	54.05
31	60.00	31	35.00	1.52	4.35	15.87	45.34	17.39	49.69	17.61	50.31	
Septiembre	1	20.00	2	11.30	0.19	1.69	4.39	38.86	4.58	40.55	6.72	59.45
	12	55.00	12	9.80	0.19	1.91	4.96	50.58	5.14	52.48	4.66	47.52
	13	20.00	13	1.20	0.00	0.00	0.13	10.51	0.13	10.51	1.07	89.49
Octubre	6	30.00	7	6.00	0.06	0.98	2.91	48.55	2.97	49.53	3.03	50.47
	7	40.00	8	5.00	0.01	0.19	2.04	40.87	2.05	41.06	2.95	58.94
	10	30.00	10	1.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.40	100.00
Promedio		56.61		7.85	0.20	1.72	3.41	38.79	3.62	40.51	4.23	59.49

Del cuadro 9, se observa que las perdidas fueron 118 mm, es decir el 54% de la precipitación total durante el periodo de estudio.

Los dos únicos eventos que presentaron valores diferentes al promedio de interceptación, fueron los que se presentaron los días 26 de julio y 31 de agosto, situación que se atribuye al tiempo de lluvia pero, principalmente, a una humedad antecedente suficiente y continua. Figura 14

Relación pérdidas-escurrimiento (mm)

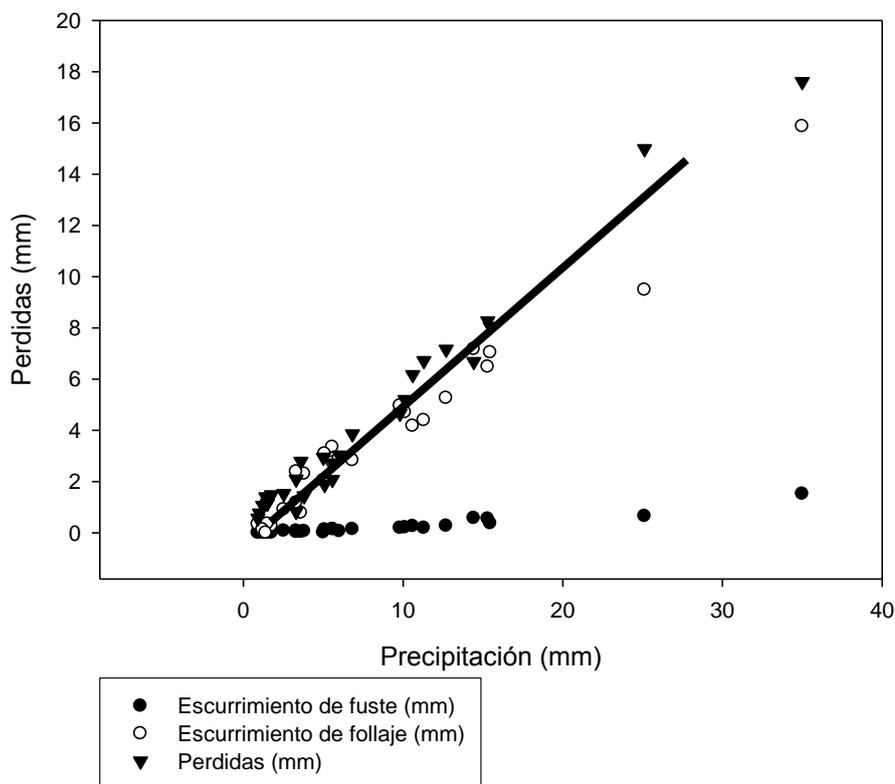


Figura 15. Relación precipitación-pérdidas para los 28 eventos de lluvia evaluados donde se observa que las mayores pérdidas en proporción a la precipitación fueron para aquellos eventos donde $5 < P_g < 15$ mm interceptando 66.48 mm (56%), el 28% (17.61 mm) correspondió a 2 eventos con $P_g > 30$ mm y el restante 16% (19.4 mm) para $P_g < 3$ mm.

La participación de la especie arbórea *Jacaranda mimosifolia* en la intercepción de lluvia, en términos porcentuales, se determinó que fluctúa desde un 25 % para lluvias ubicadas en el rango de entre 15 y 35 mm hasta un 100 % en tormentas con valores de 1 a 4 mm, con promedio para los eventos analizados de un 33 %, valor semejante al reportado por otros autores (Xiao Q. y Pherson E.G. 2002) quienes determinaron para un ejemplar de *Jacaranda sp.* con DAP de 3.5 cm. una tasa de intercepción del 15 % cifra que si comparamos en términos lineales con el DAP del ejemplar objeto del presente trabajo (0.28 m.) y el promedio de intercepción (33 %) brinda un valioso grado de reciprocidad.

El escurrimiento de fuste y brazos fue reducido en lluvias con valores de hasta 5 mm, hasta alcanzar una cifra de 3 % en eventos de 15 a 35 mm, cifra normal si consideramos que la corteza al absorber o retener el agua permite un escurrimiento lento y una mayor tasa de absorción de humedad.

El dosel, una vez satisfecha su capacidad de almacenamiento, participó en la aportación de volumen al escurrimiento al generar en promedio el 55 % del volumen precipitado.

Se concluyó que a menor intensidad se incrementa la intercepción, ya que si consideramos que los eventos de lluvia analizados fueron de poco vigor lo que aunado a una temperatura estable (19 °C) permitió que la tasa de evaporación no creciera sustancialmente (ya que la mayoría de los eventos registrados se presentaron durante la tarde y noche) y una velocidad de viento poco significativa, son factores que contribuyeron a que se incrementara la tasa de intercepción de lluvia.

Los resultados obtenidos se realizaron asumiendo una precipitación vertical sobre una superficie de 23 m²., siendo que como se puede deducir de la estructura del individuo de estudio es sumamente irregular, esta situación pudo haber influido en la obtención de los valores de pérdidas por intercepción.

Se calculó un valor de pérdidas por intercepción de lluvia, desde 25.42 % para eventos de corta duración y mediana y alta intensidad, hasta 75 % en promedio para aquellas lluvias de poca magnitud y diferidas en un tiempo extenso.

El modelo no está calibrado ni se ha validado con datos de árboles de igual o semejante especie y con características fenotípicas diferentes así como con sus respectivos registros de escurrimiento y pérdidas por intercepción.

IV.4. Análisis precipitación-pérdidas

Una vez deducidas las pérdidas mediante el sistema indicado en las Figuras 9 y 12 y la aplicación de conservación de masa (Ecuación 1) se efectuó una regresión lineal por evento entre la precipitación y las pérdidas, esto con el objetivo de confrontar los valores observados y determinar su confiabilidad

$$EI = 0.128 + 0.522P_g \quad (27)$$

En la ecuación 27 EI son las pérdidas por intercepción, la ordenada corresponde a la capacidad de almacenamiento, (0.128 mm), la pendiente (0.552 mm) a la proporción de las pérdidas por evaporación por evento de precipitación y P_g a la precipitación total.

La regresión lineal con un nivel de confianza del 95 %, arroja un valor para el coeficiente de correlación de Pearson (r) de 0.97, este coeficiente nos indica el grado de relación entre las dos variables analizadas (intercepción y precipitación), la desviación estándar (desviación de valores obtenidos respecto a la media) para el conjunto de las observaciones se calculó en 4.169, número que nos indica una baja dispersión de resultados. Cuadro 10

Cuadro 10. Pérdidas calculadas por regresión lineal.

P (mm)	Perdidas (mm)
15.46	8.20
10.11	5.41
6.83	3.69
1.52	0.92
1.76	1.05
25.12	13.24
1.00	0.65
2.53	1.45
3.60	2.01
3.30	1.85
0.90	0.60
10.60	5.66
5.60	3.05
1.50	0.91
3.80	2.11
3.30	1.85
5.57	3.04
14.42	7.66
5.08	2.78
12.69	6.75
15.30	8.11
35.00	18.40
11.30	6.03
9.80	5.24
1.20	0.75
6.00	3.26
5.00	2.74
1.40	0.86

Con relación al coeficiente de asimetría, se obtuvo un valor de 1.79 positivo que nos lleva a concluir que la distribución de los resultados de intercepción, con los datos de lluvia registrados, tienden de manera gradual a que una vez satisfecha la capacidad de almacenamiento, se generara un escurrimiento, tal y como quedo evidenciado en los eventos de lluvia con intensidades superiores a los 10 mm. donde comenzó a incrementarse de manera significativa el volumen de escurrimiento.

IV.5. Perdidas obtenidas con modelo de Gash.

Haciendo uso de un programa desarrollado por estudiantes del Posgrado en recursos hídricos y medio ambiente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (Brehon D. 2006), se realizo un ejercicio para estimar las pérdidas con el modelo de Gash,1995. (Cuadro 11). Este modelo permite calcular la intercepción de la lluvia durante el periodo de estudio. Supone que solo ocurre un evento por día. Es recomendable conocer la temperatura media por día para obtener mejores resultados así como la humedad relativa [%], la altura de la vegetación [m], la altitud del dispositivo

que mide el viento [m], la cantidad de lluvia que atraviesa la cubierta vegetal [%], la temperatura del punto de condensación [°C], la capacidad máxima de almacenamiento de la cubierta vegetal, [mm] , el flujo de calor latente [MJ/m²/día], la lluvia necesaria para saturar la vegetación [mm], el flujo por el tronco o “steamflow” [mm]. Al final, el programa calcula la interceptación total mediante la suma de lluvia interceptada por la cubierta vegetal (dosel) y el tronco (fuste) para cada evento.

En el cuadro 11 se indican los valores promedio de la velocidad del viento y la humedad relativa que se utilizaron para el calculo de las perdidas por interceptación.

Cuadro 11. Valores de velocidad del viento y humedad relativa utilizados para realizar el calculo de las perdidas por interceptación haciendo uso del modelo de Gash. (Fuente: SEDESU, 2005)

P	Velocidad del viento, m/s	Humedad relativa %
15.46	1.916	57.513
10.11	0.864	64.039
6.83	0.978	64.434
1.52	1.653	61.398
1.76	0.504	79.865
25.12	1.126	75.440
1.00	0.364	79.860
2.53	0.000	67.083
3.60	1.076	62.988
3.30	1.839	60.475
0.90	0.972	77.786
10.60	0.972	77.786
5.60	1.789	76.397
1.50	2.750	73.795
3.80	3.807	69.543
3.30	2.236	71.515
5.57	3.749	65.655
14.42	1.686	68.690
5.08	0.973	65.508
12.69	1.220	67.895
15.30	1.582	68.784
35.00	1.820	73.650
11.30	2.283	74.608
9.80	0.756	59.679
1.20	0.816	58.718
6.00	0.877	64.152
5.00	0.893	77.004
1.40	0.556	60.725

Al analizar los resultados de las perdidas obtenidas por balance de masa y el modelo de Gash, se observa que los últimos difieren en un 35 % respecto a las perdidas observadas, esta situación se atribuye a que al hacer uso del modelo de Gash, se asumió que los eventos de lluvia fueron continuos.

Debido a la dificultad para medir el resto de los parámetros, estos no se incluyeron en el análisis motivo por el cual el programa sugirió los valores para efectuar el cálculo. Cuadro 12

Cuadro 12. Diferencias numéricas entre las pérdidas observadas y las calculadas con el modelo de Gash.

Precipitación (mm)	Pérdidas observadas	Pérdidas obtenidas con modelo de Gash	Diferencia (mm)	Similitud %
15.46	8.05	4.61	3.44	57.27
10.11	5.2	3.57	1.63	68.65
6.83	3.86	2.88	0.98	74.61
1.52	1.3	0.45	0.85	34.62
1.76	1.48	0.5	0.98	33.78
25.12	14.99	4.71	10.28	31.42
1	0.77	0.3	0.47	38.96
2.53	1.53	0.75	0.78	49.02
3.6	2.79	1.08	1.71	38.71
3.3	2.09	0.9	1.19	43.06
0.9	0.57	0.27	0.3	47.37
10.6	6.17	3.67	2.5	59.48
5.6	2.72	2.62	0.1	96.32
1.5	1.15	0.45	0.7	39.13
3.8	1.44	1.14	0.3	79.17
3.3	0.83	0.99	-0.16	119.28
5.57	2.08	2.61	-0.53	125.48
14.42	6.68	4.48	2.2	67.07
5.08	1.88	2.51	-0.63	133.51
12.69	7.16	4.11	3.05	57.40
15.3	8.27	4.6	3.67	55.62
35	17.61	4.79	12.82	27.20
11.3	6.72	3.81	2.91	56.70
9.8	4.66	3.51	1.15	75.32
1.2	1.07	0.36	0.71	33.64
6	3.03	2.71	0.32	89.44
5	2.95	2.5	0.45	84.75
1.4	1.4	0.42	0.98	30.00
Promedio	4.23	2.33	1.90	62.39

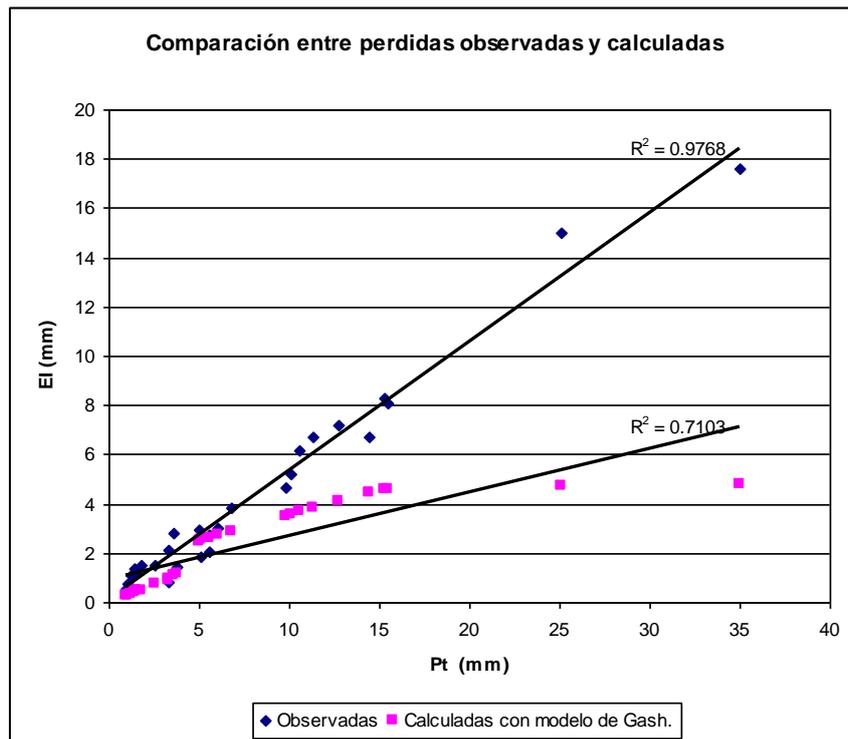


Figura 16. Comparación entre las pérdidas observadas y las calculadas con el modelo de Gash.

V.6. Escurrimientos en el Boulevard Bernardo Quintana

Con el fin de apreciar el valor de la vegetación en la zona urbana de Querétaro se realizó una aplicación para un tramo del Boulevard Bernardo Quintana, localizado entre las coordenadas extremas (UTM) de inicio (X) 353711 con (Y) 2280432 y término 356960 con 2278141, debido a que la vegetación esta compuesta en su mayoría por *Jacaranda mimosifolia*. Figura 17. Para ello se extrapolaron los resultados de las pérdidas obtenidas mediante la Ecuación 27 partiendo de la base que las pérdidas son semejantes por unidad de superficie. El cálculo contempló dos escenarios:

- Escenario 1. Volumen generado sin considerar la vegetación.
- Escenario 2. Volumen afectado por las pérdidas que produce la superficie arbórea compuesta por *Jacaranda mimosifolia*

I

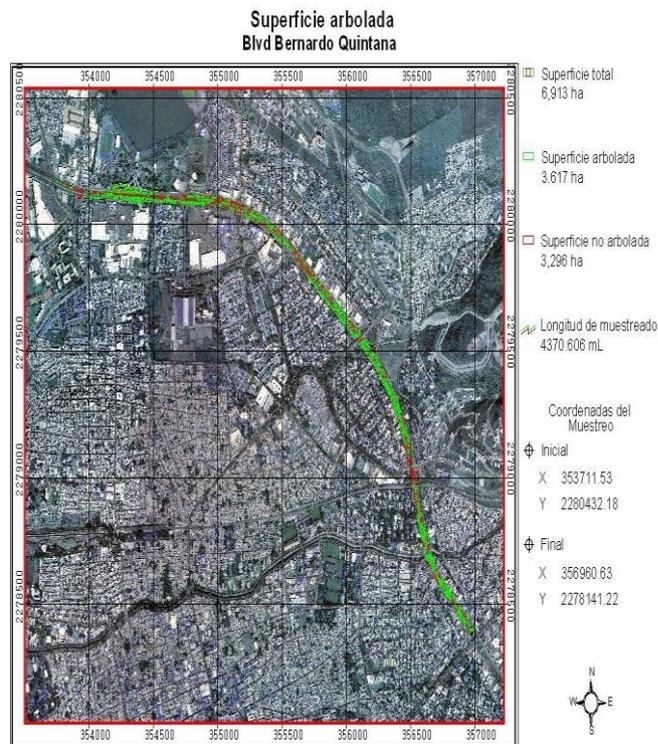


Figura 17. Transecto efectuado sobre el B. Bernardo Quintana donde se realizó el muestreo de Jacarandas.

Cuadro 13. Características del tramo de estudio ubicado sobre el B. Bernardo Quintana mismo que inicia en el parque Querétaro 2000 y termina en el puente del ferrocarril con dirección norte-sur.

Elemento	Área m ²
Camellón central y laterales con vegetación	62,500
Superficie rodante de carril central y lateral sin vegetación	82,500
Total	145,000

La composición de la superficie del tramo se obtuvo a partir de una ortofoto del año 2006, En el cuadro 13 se indican la composición de las 14.50 ha. que se consideraron para el cálculo.

Para el transecto muestreado en el B. Bernardo Quintana, se determinó que sin incluir el costo económico por daños a la infraestructura, el volumen de escurrimiento superficial para la superficie carente de vegetación (8.25 ha.), fue de 31,855.05 m³ y para el área cubierta de vegetación (6.25 ha.) de 24,463.66 m³. cifras que representan una disminución de volumen en términos globales del 23 %. Cuadro 14.

Cuadro 14. Participación de la vegetación en el escurrimiento superficial.

Evento No.	Pt (mm)	Perdidas (mm)	Pn efectiva (mm)	Escurrimiento (m ³) con vegetación (Rt)	Escurrimiento (m ³) sin vegetación (Rt)	Diferencia (m ³)
1	15.46	8.20	7.26	1729.318	2241.700	512.383
2	10.11	5.41	4.70	1128.111	1465.950	337.839
3	6.83	3.69	3.14	759.521	990.350	230.829
4	1.52	0.92	0.60	162.810	220.400	57.590
5	1.76	1.05	0.71	189.780	255.200	65.420
6	25.12	13.24	11.88	2814.860	3642.400	827.540
7	1.00	0.65	0.35	104.375	145.000	40.625
8	2.53	1.45	1.08	276.309	366.850	90.541
9	3.60	2.01	1.59	396.550	522.000	125.450
10	3.30	1.85	1.45	362.838	478.500	115.663
11	0.90	0.60	0.30	93.138	130.500	37.363
12	10.60	5.66	4.94	1183.175	1537.000	353.825
13	5.60	3.05	2.55	621.300	812.000	190.700
14	1.50	0.91	0.59	160.563	217.500	56.938
15	3.80	2.11	1.69	419.025	551.000	131.975
16	3.30	1.85	1.45	362.838	478.500	115.663
17	5.57	3.04	2.53	617.929	807.650	189.721
18	14.42	7.66	6.76	1612.448	2090.900	478.453
19	5.08	2.78	2.30	562.865	736.600	173.735
20	12.69	6.75	5.94	1418.039	1840.050	422.011
21	15.30	8.11	7.19	1711.338	2218.500	507.163
22	35.00	18.40	16.60	3925.125	5075.000	1149.875
23	11.30	6.03	5.27	1261.838	1638.500	376.663
24	9.80	5.24	4.56	1093.275	1421.000	327.725
25	1.20	0.75	0.45	126.850	174.000	47.150
26	6.00	3.26	2.74	666.250	870.000	203.750
27	5.00	2.74	2.26	553.875	725.000	171.125
28	1.40	0.86	0.54	149.325	203.000	53.675
Total	219.69	118.26	101.43	24463.664	31855.050	7391.386

Respecto a la intervención de la vegetación en los costos de tratamiento de agua, se tomó como base en el precio económico de \$ 4.70 pesos m⁻³ (CEAQRO), resultando el costo de tratamiento para el volumen generado en la superficie sin vegetación (8.25 ha) de \$ 149,718.73 pesos gasto que se reduce a \$ 114,979.22 al tomar en cuenta el área de la vegetación (6.25 ha), valor que representa un ahorro global para las instituciones publicas de \$34,739.51 pesos. Cuadro 15.

Cuadro 15. Participación de la vegetación en los costos por el tratamiento de agua superficial.

No.	P (mm)	Escurrimiento (m ³) Con vegetación (Rt)	Escurrimiento (m ³) sin vegetación (Rt)	Costo de tratamiento con vegetación (\$)	Costo de tratamiento sin vegetación (\$)	Diferencia (\$)
1	15.46	1729.318	2241.700	8127.79	10535.99	2408.198
2	10.11	1128.111	1465.950	5302.12	6889.97	1587.842
3	6.83	759.521	990.350	3569.75	4654.65	1084.895
4	1.52	162.810	220.400	765.21	1035.88	270.673
5	1.76	189.780	255.200	891.97	1199.44	307.474
6	25.12	2814.860	3642.400	13229.84	17119.28	3889.438
7	1	104.375	145.000	490.56	681.50	190.938
8	2.53	276.309	366.850	1298.65	1724.20	425.544
9	3.6	396.550	522.000	1863.79	2453.40	589.615
10	3.3	362.838	478.500	1705.34	2248.95	543.614
11	0.9	93.138	130.500	437.75	613.35	175.604
12	10.6	1183.175	1537.000	5560.92	7223.90	1662.978
13	5.6	621.300	812.000	2920.11	3816.40	896.290
14	1.5	160.563	217.500	754.64	1022.25	267.606
15	3.8	419.025	551.000	1969.42	2589.70	620.283
16	3.3	362.838	478.500	1705.34	2248.95	543.614
17	5.57	617.929	807.650	2904.27	3795.96	891.690
18	14.42	1612.448	2090.900	7578.50	9827.23	2248.727
19	5.08	562.865	736.600	2645.47	3462.02	816.555
20	12.69	1418.039	1840.050	6664.78	8648.24	1983.453
21	15.3	1711.338	2218.500	8043.29	10426.95	2383.664
22	35	3925.125	5075.000	18448.09	23852.50	5404.413
23	11.3	1261.838	1638.500	5930.64	7700.95	1770.314
24	9.8	1093.275	1421.000	5138.39	6678.70	1540.308
25	1.2	126.850	174.000	596.20	817.80	221.605
26	6	666.250	870.000	3131.38	4089.00	957.625
27	5	553.875	725.000	2603.21	3407.50	804.288
28	1.4	149.325	203.000	701.83	954.10	252.273
Total	219.7	24463.664	31855.050	114979.220	149718.735	34739.515

En promedio cada metro cuadrado de copa de los ejemplares de *Jacaranda mimosifolia* representó un ahorro por concepto de tratamiento de agua superficial de \$ 0.55 pesos M/N equivalente a una economía de 0.1182 m³/m² de vegetación para el total de los eventos analizados. Figura 18

Influencia de la vegetación en el escurrimiento superficial

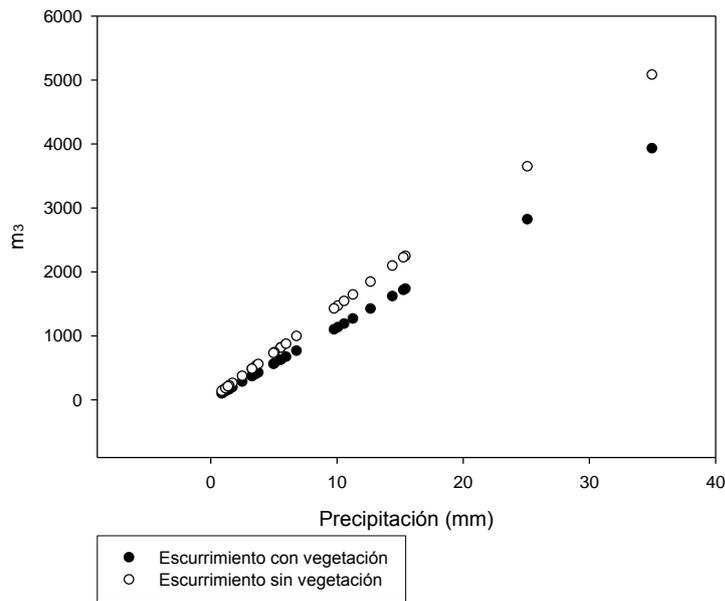


Figura 18. Esquema que muestra la influencia de la vegetación en la generación de escurrimiento superficial en la ciudad para el transecto muestreado.

Una vez que se calcularon las pérdidas y el escurrimiento superficial, se procedió a estimar el promedio del gasto pico máximo (m^3/s) mediante el método racional para los 28 eventos, a fin de ponderar su efecto en el funcionamiento del sistema de drenaje en la zona de influencia del tramo de aplicación. Con base en la composición de la superficie del B.B. Quintana se asignó un coeficiente de escurrimiento de 0.70 para el área de rodamiento (revestida de asfalto) y de 0.20 para la que está cubierta de vegetación.

El método racional se aplicó bajo las consideraciones siguientes:

- No se consideran las pérdidas por interceptación.
- Solamente se presenta el valor máximo de escurrimiento cuando la lluvia es mayor o igual al tiempo de concentración.
- El valor numérico del tiempo de concentración se toma constante
- Se asume que a mayor duración de la lluvia, se tendrá una menor intensidad y viceversa.

Se concluyó que el gasto máximo por segundo en promedio por efecto de la vegetación presente en dicha avenida, se reduce un 37 %, así mismo, destaca la disminución del gasto en el evento de lluvia donde se precipitó una lámina de 35 mm ya que el gasto máximo sin vegetación se comprime de $0.9876 m^3/s$ a solamente $0.6196 m^3/s$ debido al efecto de la vegetación, cifra que demuestra la importancia de la superficie arbolada en la disminución del escurrimiento superficial. Cuadro 16.

Cuadro 16. Valores calculados de gastos máximos obtenidos con el método racional para los 28 eventos de lluvia.

Pt mm	Perdidas (mm)	t minutos	Q max. m ³ /s con vegetación	Q max. m ³ /s sin vegetación	i mm/h sin vegetación	i mm/h con vegetación	Diferencia %
15.46	8.2	110	0.1491	0.2379	8.43	3.96	37.3202
10.11	5.41	95	0.1128	0.1802	6.39	2.97	37.3782
6.83	3.69	80	0.0904	0.1445	5.12	2.36	37.4417
1.52	0.92	15	0.1060	0.1716	6.08	2.40	38.2422
1.76	1.05	30	0.0614	0.0993	3.52	1.42	38.1354
25.12	13.24	220	0.1212	0.1933	6.85	3.24	37.2792
1	0.65	20	0.0518	0.0847	3.00	1.05	38.7931
2.53	1.45	25	0.1065	0.1713	6.07	2.59	37.8463
3.6	2.01	20	0.1900	0.3047	10.80	4.77	37.6642
3.3	1.85	20	0.1741	0.2793	9.90	4.35	37.6922
0.9	0.6	15	0.0620	0.1016	3.60	1.20	38.9984
10.6	5.66	145	0.0775	0.1238	4.39	2.04	37.3641
5.6	3.05	65	0.0912	0.1459	5.17	2.35	37.4956
1.5	0.91	25	0.0627	0.1016	3.60	1.42	38.2594
3.8	2.11	60	0.0669	0.1072	3.80	1.69	37.6264
3.3	1.85	15	0.2321	0.3725	13.20	5.80	37.6922
5.57	3.04	50	0.1179	0.1886	6.68	3.04	37.5096
14.42	7.66	150	0.1020	0.1628	5.77	2.70	37.3301
5.08	2.78	15	0.3582	0.5734	20.32	9.20	37.5276
12.69	6.75	80	0.1683	0.2686	9.52	4.46	37.3389
15.3	8.11	75	0.2165	0.3454	12.24	5.75	37.3161
35	18.4	60	0.6196	0.9876	35.00	16.60	37.2625
11.3	6.03	20	0.5992	0.9566	33.90	15.81	37.3600
9.8	5.24	55	0.1889	0.3017	10.69	4.97	37.3731
1.2	0.75	20	0.0625	0.1016	3.60	1.35	38.4852
6	3.26	30	0.2117	0.3386	12.00	5.48	37.4795
5	2.74	40	0.1322	0.2116	7.50	3.39	37.5369
1.4	0.86	30	0.0487	0.0790	2.80	1.08	38.3533
219.7	118.26						37.7179

V. CONCLUSIONES

La evaluación y pronóstico de las pérdidas de lluvia por intercepción para la especie de *Jacaranda mimosifolia* en la zona urbana, se efectuó a través de un método indirecto consistente en registrar la lluvia incidente sobre la cobertura arbórea y el escurrimiento de dosel, fuste y brazos o flujos traslócales.

La vegetación presente en la ciudad, tiene un efecto adicional de ahorro económico para las instituciones gubernamentales y la población en general, ya que esta al participar en la intercepción de lluvia, para el transecto muestreado, se determinó que reduce en promedio el escurrimiento y el costo de tratamiento de agua en un 23 %.

La densidad de cobertura vegetal presente en la ciudad, es una de las variables que intervienen en el proceso de escurrimiento superficial y en consecuencia, en el retardo del tiempo de concentración de la microcuenca ya que el caudal se reducirá cuantiosamente si se promueve y fomenta la forestación o creación de zonas verdes compactas en la zona urbana, por tal motivo, las podas deben realizarse en periodos posteriores a la temporada de lluvias.

Según se establece en el “Manual para las Instalaciones de Agua Potable, Agua Tratada, Drenaje Sanitario y Drenaje Pluvial de los Fraccionamientos y Condominios de la Ciudad de Querétaro y Zona Conurbada” editado por la CEA en el año 2002, en los proyectos que se realizan para construir las obras de drenaje pluvial en condominios y fraccionamientos, prácticamente se ignora la intercepción de lluvia, situación que conduce a que, al no considerar esta variable en el diseño de obras de conducción y desalojo se sobreestimen los valores y en consecuencia, se continúe despreciando no solo el beneficio de la vegetación en la reducción de los escurrimientos y su impacto ambiental en la calidad de vida de la población, sino que además, da la pauta para que al ignorarse los beneficios, se prefiera privilegiar la construcción de obras físicas de alto costo económico e impacto puntual, sin acompañarlas de prácticas vegetativas.

Finalmente, se concluyó que la estructura forestal arbórea indudablemente que influye en el medio ambiente de la ciudad, pero, se requiere promover estudios que permitan cuantificar el impacto ambiental y económico que esta trae sobre la calidad de vida de la población.

VI. RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos de intercepción de lluvia en la especie *Jacaranda mimosifolia*, son una referencia para ser utilizada en los programas de revegetación y/o reforestación en la zona urbana.

Debido a que los únicos valores discrepantes en la curva de ajuste con los tres procedimientos, correspondieron a los eventos donde se cuantificaron las mayores intensidades (25 y 35 mm), es necesario la calibración del modelo motivo por el cual los resultados para eventos con estas precipitaciones, deben ser tomados como aproximaciones.

En los registros de escurrimiento y precipitación, no se analizó el efecto de la entrada de lluvia lateral en la superficie de copa ni la que ingreso por este mismo efecto, en el pluviómetro, en consecuencia, en futuros trabajos es necesario que se considere el efecto de la entrada de lluvia lateral a fin de evitar sean sobreestimados los valores de intercepción.

Para la presente investigación, no se evaluaron los efectos que sobre el proceso de intercepción de lluvia, tienen los factores climáticos tales como la continuidad de la tormenta, velocidad y dirección del viento, índice foliar y humedad del aire, entre otros, siendo necesario que con el objetivo de determinar la influencia de estos factores y su comportamiento en el proceso de intercepción de lluvia, deben ser incorporados al análisis.

Con el propósito de determinar de manera integral el influjo de la vegetación arbórea en la calidad de vida de la población y primordialmente, en el escurrimiento superficial de la zona urbana de la ciudad de Santiago de Querétaro, se deberán promover estudios y/o trabajos que permitan cuantificar su impacto específico como pueden ser, entre otros, el ahorro y consumo de energía, contaminación y tratamiento de aguas superficiales, etc., como ejemplo de ello, se afirma que cuando la vegetación absorbe energía, la temperatura máxima se puede reducir hasta en 3°C y en consecuencia, se tendrá una demanda menor de energía eléctrica lo que a su vez, se traducirá en una reducción en el pago del servicio de energía eléctrica, emisión de bióxido de carbono y consumo de combustibles fósiles, etc. (Salto, Ishihara y Katayama et al. 1991)

Haciendo eco de la afirmación de que la influencia de la vegetación forestal en zonas áridas es mas pronunciada que en áreas templadas y que, por consiguiente, se hace en ellas más imperiosa la necesidad de una acertada y minuciosa ordenación de la vegetación forestal que conduzca a una regulación óptima de las aguas y a la estabilidad del suelo. (H.G. Wilm et al., 2003), se deberá promover un proceso de gestión interinstitucional para la aplicación de políticas ambientales que contribuyan a incrementar y conservar la vegetación forestal en zonas urbanas misma que muchas de las veces, es despreciada por autoridades e inclusive, ignorada por la misma sociedad.

De igual forma, es necesario impulsar investigación específica que permita cuantificar los beneficios que sobre el comportamiento hidrológico de la ciudad, traerá la plantación de árboles, ya que como es sabido, el continuo

riesgo de que la ciudad sea objeto de inundaciones cada temporada de lluvias, no hace sino afianzar la urgente necesidad de contar con distintas alternativas que sumadas a otras, conduzcan no solo a reducir los riesgos, sino también a prevenirlos y reducir los costos que por concepto de rescate a la población afectada y/o rehabilitación de obras, tendrán las autoridades que realizar.

La utilización de especies en los programas de forestación urbana, debe guiarse bajo los siguientes atributos: adaptada al clima y condiciones de suelo de la ciudad, con estructura idónea al lugar de plantación, y principalmente, que contribuya a la intercepción de lluvia utilizando especies preferentemente de tipo caducifolio ya que de esta forma interceptara un mayor volumen en temporada de lluvias cuando la planta esta en pleno proceso de crecimiento y por ende, con mayor densidad de copa.

Según datos de la presidencia municipal de Querétaro (2003), se tiene un déficit de 7.5 m² por habitante ya que la norma establecida por la organización de las Naciones Unidas señala 12 m², sin embargo, para la ciudad solamente se tiene la cifra de 4.50 m² por habitante, esta cifra aunada al constante crecimiento de áreas urbanizadas, no hace mas que evidenciar la necesidad de incrementar las áreas verdes dentro de la ciudad, ya que esta relación deja ver que mientras la población crece de manera exponencial la vegetación lo hace de forma aritmética.

Por ultimo, se debe tener presente la particularidad de que las conclusiones y recomendaciones aquí vertidas, están orientadas únicamente al proceso de intercepción de lluvia en zonas urbanas y están formuladas con el objetivo de incidir en el proceso de los fenómenos hidrometeorológicos extremos a que esta sometida la ciudad, situación u opiniones contrarias resultarían si el fin lo fuera la captación de agua de lluvia donde seguramente, al ubicarse la región en una zona semiárida, el propósito fundamental seria promover un almacenamiento que condujera a tener una mayor disponibilidad de agua.

VII. LITERATURA CITADA

Administración Municipal 2000-2003. Dirección de Ecología. Árboles y arbustos para el Municipio de Querétaro.

American Forests. 1996. Urban ecological analysis report, Phase 1: Economic benefits and costs of the urban forests in low income and non-low income communities. Final report NA-94-0297. American Forests, Washington, DC.

Caballero M., Unasylyva, 2003. FAO». *Silvicultura Urbana en la Ciudad de México,

Calder I.R. 1994. Dependence of rainfall interception on drop size. Development of the two-layer. Stochastic model. Institute of Hydrology, Wallingford, UK.

Cantu S. y González H., 2002. Propiedades Hidrológicas del Dosel de los Bosques de Pino Encino en el Noreste de México. Revista Ciencia UANL, Vol. V, Enero-Marzo.

Center for Urban Forest Research, 2002. ¿IS all your rain going down the drain? Urban forest Research. University of California.

Cevallos L. y Fernández de C. 2003. Vocabulario Forestal.

Comisión Estatal de Aguas del Estado de Querétaro, 2003. Manual para las instalaciones de agua potable, agua tratada y drenaje sanitario.

Environmental Protection Agency. 1994. The quality of our nation's water: 1992. United States Environmental Protect Agency, #EPA-841-S-94-002. USEPA Office of Water, Washington, DC.

González, E., Véliz, C., Luna, F., Ramos, N., 2004. Efecto de la distribución espacio-temporal de la precipitación en zonas altamente urbanizadas. Congreso internacional de ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro. UAQ-FI. Impreso en México. ISBN 968-845-275-0.

G. R. Trimble, Jr., and S. Weitzman, April 1954. Effect of a Hardwood Forest Canopy on Rainfall Intensities, Trans. Am. Geophysics. Union, vol. 5, pp. 226-234.

Hernández G. D., 2004. Experimentación y modelación numérica de la intercepción de la precipitación de un lecho de residuos vegetales o Mulch. Tesis para obtener el Grado de M. en C. con Línea Terminal en Hidráulica. UAQ.

Hudson R. 2004. Interception, effects of forestry on snow hydrology. Presentation.

Horton R., Rainfall Interception, 1919. Weather Rev., vol. 47, pp.603-623.

Instituto Nacional de Ecología, 1999. SEMARNAT-UNAM.

- Johnston R. 1971. Rainfall Interception in a Dense UTA Aspen Clone, U.F.S.
- Linsley, Kohler y Paulus, .1994. Hidrología para Ingenieros, Ed. McGraw Hill, México, DF.
- Lormand, J.R., 1988. The effects of urban vegetation on stormwater runoff in an arid environment. Master's thesis, School of Renewable National Resources, Univ. Ariz., Tucson, AZ.100 pp.
- McPherson, 2004. Benefits of trees. Continuing Education unit. Volume 13, No. 16.
- Monsalve S.1999. Hidrología para Ingenieros. Ed. Alfa omega. 2da. Edición.
- Notas del curso de Hidrología, 2003. Facultad de Ingeniería, Div. de Estudios de Posgrado. Universidad Autónoma de Querétaro, México.
- Notas del curso de Introducción a los Sistemas de Información Geográfica, 2005. Facultad de Ingeniería, Div. de Estudios de Posgrado. Universidad Autónoma de Querétaro, México.
- Nowak D. and E.G. McPherson, 1992. Quantifying the Impact of Trees: The Chicago Urban Forest Climate Project. Department of Agriculture Forest Service.
- Robb A., 2002. Diccionario Ingles-Español para Ingenieros. Ed. Continental. 7ma. Reimpresión.
- Rutter, J., Kershaw, K., Robins, P., Morton, A. J., 1971. A predictive model of rainfall interception in forest, I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. Agric. Meteorol., 9, 367-84.
- Salinas A., 2003. Aplicaciones de la simulación hidrológica en zonas áridas. Departamento de Ingeniería Rural, Universidad de Almeida.
- “Scientific Hydrology”, 1962. Federal Council for Science and Technology.
- Vázquez Y., Batís A., Muñoz, M. I. Alcocer S., Gual D., y Sánchez C., 2003. Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación. Reporte técnico del proyecto J084.
- Véliz Ch. C., González S. E., Guevara E. A. y Barajas O. R. Intercepción de la Vegetación en Cuencas Urbanas, 2005. Ponencia presentada en la XII Reunión Nacional y II de América Latina y el Caribe, sobre Sistemas de Captación y Aprovechamiento del Agua de Lluvia.Facultad de Ingeniería. Div. De Estudios de Posgrado. Universidad Autónoma de Querétaro. México.
- Wilm H. G. Influencia de la vegetación forestal sobre el suelo y agua, 2002. Escuela de Montes de la Universidad del Estado, Siracusa, Nueva Cork.

Xiao, Q. and McPherson, E., 2002. Rainfall interception by Santa Monica's municipal urban forest. *Urban Ecosystems*, 6, 291-302.

Xiao, Q., McPherson E., Simpson, 998. Rainfall interception by Sacramento's urban forest. *J. of Arboriculture*.

Xiao Q, E. Gregory Mc., S.L. Austin and M.E. Grismer. 2000. A new approach to modeling rainfall interception, *Journal of Geophysical Research*. Vol. 105, No. D23, Pages 29,173-29,188.

Zeng, N., Shuttleworth, J., Gash, J., 2000. Influence of temporal variability of rainfall on interception loss. Part I. Point Analysis. *J. Hydrol.* 228, 228-241

Zinke, P.J. 1967. Forest interception studies in the United States, pp 137-161. In Sopper, W.E., and Lull, H.W. (Eds.). *Forest Hydrology*. Pergamon Press, Oxford, England.

PAGINAS ELECTRONICAS CONSULTADAS.

www.cstars.ucdavis.edu/papers.

www.epa.gov/heatisland/strategies/vegetation

www.ine.gob.mx/cambioclimatico.2005

www.semarnat.gob.mx

www.usal.es/hidro.

www.urbanforestrysouth.org/resources/Library/Citation.

VIII. ACRONIMOS

Acrónimo	Descripción
CEA	Comisión Estatal de Aguas del Estado de Querétaro
CNA	Comisión Nacional del Agua
CONCYTEQ	Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro
CATIE	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Desarrollo de Costa Rica
DAP	Diámetro del arbolado a la altura del pecho (1.30 m.)
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
UAQ	Universidad Autónoma de Querétaro
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos de Norteamérica
USC	Servicio de Conservación de los Estados Unidos de Norteamérica

IX. ABREVIATURAS

Símbolo	Descripción	Unidad
As	Área sin vegetación	Ha.
Av	Área con vegetación	Ha.
a	Constante	mm
b	Constante	mm
c y s	Capacidad de almacenamiento de la lluvia en la cubierta vegetal	mm
C	Coeficiente de escorrentía	
DAP	Diámetro a la altura del pecho.	m
D	Agua que fluye por gravedad por el follaje	mm
d	Valor derivado del fenotipo de la vegetación	
Ep	Índice de evaporación potencial	mm
fg	Cantidad de lluvia que atraviesa por los espacios del follaje	mm
fs	Parte de lluvia que origina el escurrimiento de fuste y brazos	mm
f	Intercepción en el piso o sotobosque	mm
i	Intensidad de la lluvia neta	mm/h
EI	Pérdidas por intercepción	mm
K	Tasa de evaporación desde la superficie por área proyectada.	m ²
P	Precipitación	mm
Pg	Lluvia total	mm
Pn	Lluvia neta o precipitación en exceso	mm
Qmax	Gasto máximo	m ³ /s
Qp	Caudal pico	m ³ /s
R	Intensidad media	mm/h
Rt	Escurrimiento	m ³
st	Escurrimiento de fuste y brazos	mm
S	Capacidad de almacenamiento en el dosel	mm
t	Tiempo	s
tp	Tiempo pico	s
Th	Escurrimiento de follaje	mm

X. APENDICE

Cuadro 17. Eventos de lluvia analizados.

Mes	Día	Duración/min.	P(mm)
Julio	18	110.00	15.46
	19	95.00	10.11
	20	80.00	6.83
	21	15.00	1.52
	25	30.00	1.76
	26	220.00	25.12
	27	20.00	1.00
Agosto	2	25.00	2.53
	8	20.00	3.60
	9	20.00	3.30
	11	15.00	0.90
	11	145.00	10.60
	14	65.00	5.60
	15	25.00	1.50
	21	60.00	3.80
	22	15.00	3.30
	25	50.00	5.57
	26	150.00	14.42
	28	15.00	5.08
	29	80.00	12.69
	30	75.00	15.30
31	60.00	35.00	
Septiembre	1	20.00	11.30
	12	55.00	9.80
	13	20.00	1.20
Octubre	6	30.00	6.00
	7	40.00	5.00
	10	30.00	1.40
Media		56.61	7.85

Cuadro 18. Registro histórico de precipitaciones del periodo 1923-1995.
(Fuente, CNA)

Año/mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total anual mm.
1923	0	3.6	6.5	10.5	36.3	107.7	100.9	47.5	188.5	62.5	10.3	3.3	577.6
1924	4	0	0	15.8	28.2	102.2	15.2	90.6	113.1	0	0.5	0	369.6
1925	8.9	11	8.2	35.8	7.5	162.6	106.3	23.4	160.2	48.9	33	82.2	688
1926	0.5	1.6	0.7	5.1	11.5	108.8	133.8	100.5	137.6	13.6	0	0	513.7
1927	0	3.3	2	17.3	17.4	153.5	95.9	62.5	202.1	1	2.5	20.4	577.9
1928	19.4	0	16.7	12.2	41.6	28.2	115.1	51.2	76	22.2	14.3	0	396.9
1929	19	0	0	0	19.1	25.3	119.6	35.4	60.6	14.7	8.5	1.7	303.9
1930	0.3	3.6	0	13.1	64	84.4	84.6	61.2	15.2	148.5	31.4	6.2	512.5
1931	43.9	11.8	0	2.4	41.6	39.3	53.3	163.3	58.8	8.6	0	18.1	441.1
1933	9.7	3.6	6.5	15.3	4	21	401	250.6	269	18	0	0	998.7
1934	33	3	0	9.8	30	53.8	38	103.3	111.9	43.3	1	10.3	437.4
1935	0	17.5	12.5	0	51.4	163.9	98.7	88.1	131.9	14	0	4.6	582.6
1936	4	1	11.5	14.1	44.5	0.3	148.9	96.3	74.4	36.9	11.3	0	443.2
1937	0.8	0	25.3	27.4	49.2	107.7	205.3	118.5	105.7	2.5	0	9.1	651.5
1938	0	0	2.8	5	29.7	99.5	152.8	41.2	11.8	15.5	11	0	369.3
1939	15.5	0	3	7	25.9	88	105	63	60.5	78	0	1.5	447.4
1940	4.3	0.5	13	0	15	91	138	102	12	4	12	14	405.8
1941	5.5	2.7	24.5	45	41	166	68	23.4	78	129	16	8.3	607.4
1942	0	6.3	0	0	13	93.5	94.9	67.2	99	37.7	25	0	436.6
1943	1.8	0	0	22.1	39	198	59.3	96.7	176.7	83.2	15.8	27.2	719.8
1944	8.2	0	8.1	1	26.2	30.3	178.9	244.5	133.3	0.7	12.1	0	643.3
1945	1.8	0	1.3	0	22.9	103.9	130.9	66.7	17	3.9	11.6	0	360
1946	12.7	5	1.8	26.1	14.8	99.2	111	101.8	55.9	53.7	14	11.7	507.7
1947	21.7	3.6	0	9	60.1	91.3	132.4	98.9	59.2	29	25.3	39	569.5
1948	41.1	7.2	1.5	8.2	56.5	22.1	144.5	40	67.9	26.5	37	0	452.5
1949	0	0	0	1.1	14	112.1	121.6	50.6	111.9	16.5	0	0	427.8
1950	0	0	2	31.1	29.1	144.5	161.5	45	112.5	0	0	0	525.7
1951	0	0	0	14.5	53.9	126.5	133.6	85.9	123	34.1	5.2	0.3	577
1952	9.2	1.1	0	56.5	119.4	227.5	46.6	102.4	159.9	1.8	0	4.3	728.7
1953	0	0	6.2	0	5.4	61.1	134.8	161.8	60	47.4	46.7	45.6	569
1954	0	16.9	3	37	57.8	191.3	189.9	82.8	55.5	83.8	8.5	0	726.5
1955	0	0	2	0	25.5	68.7	191.8	183.2	144.6	48.5	18.4	0	682.7
1956	0	0	8.8	38.9	36	90.8	235.6	118.5	29.8	18	1	2.2	579.6
1957	3.6	2.5	0	0.7	43.2	27.2	34.1	100.3	138.2	34.6	0	5	389.4
1958	9.7	0.5	6	0	87.7	124	165.4	37.2	103.6	69.3	68.6	10.2	682.2
1959	17.5	1	7.5	74.5	22.6	196.9	143.5	83.9	90.5	36.8	2	2	678.7
1960	28.8	0	0	0	11.9	6.1	83.8	135.4	7	30	0.6	1.5	305.1
1961	13.4	8.2	4.5	35.5	22.5	147.4	132.7	9.2	44.7	19	97	0	534.1
1962	0	0	0	27.7	15.3	183.7	28	90.2	92.2	46	0	0	483.1
1963	0	0	23.5	20.7	41.3	162.5	241.6	116.6	34.5	60	0	17.4	718.1
1964	42.7	4.2	23	1.7	82.9	59.4	138.5	57.8	167.3	36.5	14.3	46.4	674.7
1965	0.4	16.4	0	15.1	90.3	63	104.5	133.5	130.9	85	0	16.5	655.6
1966	36	16.8	25.3	22	43	123	290.9	206	20	50	0	3.4	836.4
1967	64.7	1.9	51.4	22	15.3	204	70	239.4	200.5	74.4	0	2.6	946.2
1968	2.5	17.8	23	54.3	10	124	60.7	75	167	22.5	12.5	2	571.3
1969	10.2	3	3.4	9	4.2	151.6	99.6	113.8	8	12.4	3.4	10.4	429
1970	0	7.5	0	0	12	234.9	277.2	105	89.5	0	4.4	0	730.5
1971	0.3	0	4.7	1.5	95.7	211.7	44	117.1	198.7	24	3	11.6	712.3

1972	1	1	2.7	4.3	121.4	34	82.8	25.7	96.7	11.5	33.5	4.2	418.8
1973	0	1.8	0	13.5	28.5	150.2	142.3	11.1	89.1	18.5	0	6	461
1974	1.5	1.3	23.8	18.6	3.8	84.2	132.8	37.7	70.5	24	3.8	14.6	416.6
1975	45	1.3	0	0	31.7	157.7	124.1	140.2	42.6	53	0	12	607.6
1976	0	0	5.1	9.4	38.4	12.1	322	65.8	68.4	64.8	26.7	18.7	631.4
1977	0	1.6	2.3	37.1	56	83.6	78.2	83.5	96.6	28.5	1.6	19	488
1978	10	10.3	13.8	0	10	70.1	148.4	62.4	93.6	72.1	8.1	0.3	499.1
1979	0	21.9	19.8	8.2	6.1	34	82.2	27.3	39.9	0	1.7	28	269.1
1980	43.7	6	0	9.8	24.6	103.3	67.4	139.2	66.6	87.7	13.2	0.2	561.7
1981	39.8	8.6	24	66.8	37.2	100.2	71.6	153.8	11.1	69.3	0	5.7	588.1
1982	0	5	1.3	32.1	44.4	41.3	83.8	53.4	20.2	75.2	1	26.3	384
1983	20.6	5.6	16.9	0	16.9	16.7	235.2	62.1	76.8	25.2	63.6	0	539.6
1984	18.4	18.4	0	0	13.8	44.6	185.3	69	73.7	16.3	2.3	19.2	461
1985	3.2	2	0	90.3	100.9	222.9	139.9	69.3	24.3	42.1	8.5	8.2	711.6
1986	0	8	16.1	54.4	23.6	248.4	119.3	62.7	57.8	220.8	46.1	3.8	861
1987	0	4	3.4	44.3	13.6	124.9	151.5	71.1	9.2	0	16.1	0	438.1
1988	7.6	1	17.8	12.4	13	119.3	154.1	224.7	29.7	0.3	1.7	0	581.6
1989	1.2	13.6	0	2.1	43	84.2	159.5	125.6	32.5	2	3.5	21	488.2
1990	0	16.3	5.4	0	63.4	31.1	180.7	76.6	56.5	81.2	14.6	1.6	527.4
1991	7.5	4.8	0	1	65	293.5	134.9	12.1	121.5	21.6	4.3	14.9	681.1
1992	93.8	22.3	6.6	11.4	54.5	292.4	150.5	130.2	139.1	85.2	10.2	0	996.2
1993	5.7	1.2	6.8	12.1	11.3	151	143.6	18.5	59.1	20.2	28.5	0	458
1994	9.7	0	6.7	36.6	27.5	85.3	149.7	99.8	97.7	30	0	0	543
1995	5.9	1.8	0	10.2	115	108.3	25	162.8	107.9	27.5	13.3	32.3	610
Media	11.25	4.73	7.12	17.23	37.40	110.79	130.93	92.68	88.16	39.22	12.23	9.38	561.11
Máxima	93.80	22.30	51.40	90.30	121.40	293.50	401.00	250.60	269.00	220.80	97.00	82.20	998.70
Mínima	0	0	0	0	3.8	0.3	15.2	9.2	7	0	0	0	269.1

Cuadro 19. Registro Histórico de Precipitaciones Mensuales 1982-2004.
(Fuente: CNA-2005)

Año	Precipitación mm	Máxima Mm	Mes	Mínima mm	Mes	Media mm	Mediana mm	No. de días con lluvia/año
1982	413	44	5	0.2	11	6	10.32	40
1983	523	94	7	0.1	9	5	10.46	50
1984	440	60	7	1	8	5.6	8.3	53
1985	699	89	6	0.2	6	4.2	9.32	75
1987	357	54	7	0.3	8	3	4.69	76
1988	314	43	7	1.1	2	6.25	13.08	24
1989	297	41	8	0.2	8	6.3	8.25	36
1990	133.2	25	6	0.6	6	4.65	5.55	24
1991	630	56	6	1	4	7.2	11.66	54
1992	800	48	7	0.2	10	6.75	10	80
1993	409	40	6	1	6	4.4	8.52	48
1994	433	31	9	0.2	7	4.2	6.98	62
1995	589	32	8	0.4	7	4	8.79	67
1996	474	63	9	0.2	9	5.35	10.77	44
1997	360	60	9	0.1	7	4.9	7.82	46
1998	701	51	6	0.5	9	9	12.29	57
1999	392	32	7	0.3	7	5.1	9.56	41
2000	228	20	6	0.2	7	3.35	5.18	44
2001	492	54	6	0.1	5	5.9	10.46	47
2002	570	47	9	0.2	7	6	10	57
2003	916	87	9	0.1	9	8	14.77	62
2004	786	50	6	0.2	8	3.75	9.82	80
Total	10956.2							1167

Cuadro 20. Registro del arbolado muestreado en un transecto del B. Bernardo Quintana.

No.	DAP (m)	Altura de ramificación.(m)	Altura total.(m)	Superficie de copa (m ²)
1	0.29	1.90	6.00	50.27
2	0.29	2.00	6.00	50.27
3	0.39	1.77	7.00	50.27
4	0.47	1.38	7.00	50.27
5	0.40	0.67	7.00	78.54
6	0.27	2.30	7.00	28.27
7	0.32	0.80	7.00	50.27
8	0.31			0.00
9	0.13	2.20	3.00	28.27
10	0.13			0.00
11	0.10	2.00	3.50	38.48
12	0.10	1.55	3.00	28.27
13	0.41	2.20	7.00	50.27
14	0.30	2.80	7.00	50.27
15	0.40	2.40	8.00	50.27
16	0.41	1.44	7.00	78.54
17	0.32	2.00	7.00	78.54
18	0.42	1.90	8.00	78.54
18	0.16	1.90	4.00	50.27
20	0.13	2.10	4.00	50.27
21	0.21	1.30	4.00	50.27
22	0.26	1.83	4.00	50.27
23	0.16	1.64	5.00	28.27
24	0.40	2.30	6.00	78.54
25	0.43	2.05	6.00	78.54
26	0.52	2.00	6.00	78.54
27	0.18	2.45	6.00	50.27
28	0.20	2.30	6.00	113.10
29	0.12	2.55	7.00	78.54
30	0.25	1.35	5.00	78.54
31	0.23	2.30	6.00	78.54
32	0.18	1.85	8.00	113.10
33	0.20	2.20		0.00
34	0.15	1.42	7.00	113.10
35	0.40	1.52	7.00	28.27
36	0.34	1.54	7.00	50.27
37	0.37	2.40	7.00	50.27
38	0.39	1.38	7.00	28.27
39	0.18	1.90	6.00	78.54
40	0.34	2.50	8.00	28.27
41	0.41	1.25	7.00	78.54
42	0.28	1.10	7.00	28.27
43	0.36	1.45	7.00	50.27
44	0.24	1.90	6.00	78.54
45	0.25	1.30		0.00
46	0.18	1.70	7.00	50.27
47	0.22	1.40		0.00
48	0.21	1.75		0.00

49	0.38	1.56	7.00	78.54
50	0.42	1.80	7.00	50.27
51	0.15	2.50	6.00	50.27
52	0.12	1.90	3.00	28.27
53	0.11	2.00	3.00	28.27
54	0.11	1.34		0.00
55	0.23	1.26	4.00	28.27
56	0.08	1.90	3.00	28.27
57	0.15	1.52	4.00	28.27
Promedio	0.27	1.81	5.95	49.12