

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE LOS TIEMPOS DE
CONCENTRACIÓN EN DIFERENTES MICROCUENCAS DEL
URUGUAY

por

María Lisette BENTANCOR CASSOU

TESIS presentada como uno
de los requisitos para obtener
el título de *Magister* en
Ciencias Agrarias opción
Ciencias del Suelo

MONTEVIDEO
URUGUAY
marzo 2012

Tesis aprobada por el tribunal integrado por: Dr. Mario Pérez Bidegain, Dr. Jorge Sawchick, Dr. George Chescheir y Dr. Christian Chreties, el 20 de agosto de 2012. Autora: Ing. Agr. María Lissette Bentancor Cassou. Director Dr. Luis Silveira, Co-director Dr. Mario García.

Dedico este trabajo a mi hija Paula,
por todo lo que tenemos por
aprender...

AGRADECIMIENTOS

Muchas personas me han ayudado, de una u otra forma, a la realización de este trabajo, a todas ellas quiero expresar mi sincero agradecimiento.

Quisiera agradecer en primer lugar a Luis Silveira y Mario García, quienes fueron mis tutores de tesis, por contribuir en mi formación como profesional. Agradezco su apoyo y direccionamiento que ha sido fundamental para el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. George Chescheir por proporcionar parte de los datos de esta investigación la cual permitió la concreción de la misma.

A mis compañeros y amigos de la cátedra de Hidrología Lucía Puppo, Pablo Morales y Raquel Hayashi por su comprensión, sus aportes, solidaridad y sobre todo su paciencia, sin los cuales este trabajo no hubiera sido posible.

A Leticia Martinez por su valiosa colaboración en el relevamiento de los datos de campo y por compartir eternas y amenas jornadas de trabajo.

A Oscar Bentancur del Departamento de Estadística y Cómputos de la Facultad de Agronomía por su apoyo en el análisis estadístico.

A Andrés Beretta por su significativo asesoramiento en el ajuste del modelo.

A Gabriela Jorge por su valiosa colaboración en la traducción de los resúmenes.

A mis padres que no se rinden y siguen siendo un ejemplo de vida.

A todos... GRACIAS

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN.....	VI
SUMMARY.....	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1. ANTECEDENTES.....	3
1.1.1. <u>Factores que afectan el tc</u>	9
1.1.1.1. Intensidad y duración de la precipitación.....	9
1.1.1.2. Pendiente y Rugosidad.....	11
1.1.1.3. Longitud de flujo.....	12
1.1.2. <u>Métodos para estimar el tiempo de concentración</u>	13
1.1.2.1. Métodos empíricos.....	13
1.1.2.2. Métodos experimentales.....	17
1.2 HIPÓTESIS DE TRABAJO.....	21
1.3 OBJETIVO GENERAL.....	21
1.3.1 <u>Objetivos específicos</u>	21
2. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	22
2.1. ÁREA DE ESTUDIO.....	22
2.1.1. <u>Microcuencas apareadas</u>	22
2.1.1.1. Microcuencas Paysandú.....	22
2.1.1.2. Microcuencas Tacuarembó.....	26
2.2. METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE HIDROGRAMAS...28	
2.3. METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE HIETOGRAMAS DE LLUVIA EFECTIVA.....	29
2.4. METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN.....	30
2.5 METODOLOGÍA PARA DETERMINAR EL PERÍODO DE	

RETORNO.....	31
2.6 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	32
3. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>.....	36
3.1. EVENTOS ANALIZADOS.....	36
3.2 PERÍODOS DE RETORNO Y TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN....	36
3.3 INTENSIDAD DE LLUVIA.....	41
3.4 DURACIÓN DE LA TORMENTA.....	43
3.5 VOLUMEN DE PRECIPITACIÓN Y CAUDAL PICO.....	45
3.6 ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA.....	46
3.7 ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN.....	47
3.6.1. <u>Ecuaciones seleccionadas para la estimación del tc</u>	50
3.6.2 <u>Ajuste de las ecuaciones comparadas</u>	52
4. <u>CONCLUSIONES</u>.....	53
5. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>.....	55
6. <u>ANEXOS</u>.....	62
6.1. INCIDENCIA DE LA INTENSIDAD DE LLUVIA EN EL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN DE MICROCUENCAS DEL URUGUAY.....	62
6.2. COMPARACIÓN ENTRE EL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO Y OBSERVADO ENTRE DOS MICROCUENCAS DEL URUGUAY.....	97

RESUMEN

El tiempo de concentración (t_c) de la cuenca es el parámetro que más incertidumbre tiene en su determinación, cuando se trata de diseñar obras de evacuación de agua. Para calcularlo se aplican ecuaciones empíricas desarrolladas en otras regiones, con distintos suelos, topografía y clima, que han sido validadas en el ámbito nacional en forma indirecta y parcial. Este trabajo compara los t_c obtenidos por formulas empíricas y los observados, y analiza su relación con la intensidad de precipitación y el período de retorno asociado a las tormentas. La información base se obtuvo de cuatro microcuencas experimentales apareadas, dos de uso forestal y sus testigos con praderas naturales para uso ganadero. Se trabajó con datos de eventos registrados entre 2001 y 2009. Se determinaron los t_c reales de los hidrogramas de un solo pico de caudal de aquellos eventos que superaran los 25 mm de precipitación. Además, se calcularon otros parámetros característicos como intensidad máxima de lluvia, volumen de precipitación, caudal máximo y períodos de retorno. Los resultados permiten identificar que: 1) El t_c varía con la intensidad y/o volumen de lluvia precipitado. 2) El t_c observado disminuye a medida que crece el período de retorno. 3) Para estas microcuencas estudiadas, todas las ecuaciones contrastadas, sobreestiman el t_c para períodos de retorno mayores a 1,5 años. 4) El tiempo de concentración estimado por las ecuaciones de Izzard y la ecuación general, no presenta un ajuste satisfactorio.

Palabras claves: tiempo de concentración, hidrología de microcuencas.

THEORETICAL-EXPERIMENTAL ANALYSES OF TIMES OF CONCENTRATION IN DIFFERENT MICRO-BASINS IN URUGUAY

SUMMARY

Watershed time of concentration (t_c) is the parameter with the most uncertain determination, when designing water conservation structures. It is calculated by applying empirical equations developed in other regions, and has been only indirectly or partially validated at the national level. This research compares values for observed t_c with those obtained by empirical formulas, and analyzes the relationship of t_c to precipitation intensities and return periods associated with storms. The basic information was obtained from four paired experimental watersheds, two with forestry use, and two natural pastures for cattle use. We worked with event data recorded between 2001 and 2009. The observed t_c was determined for single peak flow hydrographs of events that exceeded 25 mm of precipitation. Other characteristic parameters calculated were maximum rainfall intensity, rainfall volume, maximum flow, and return periods. The results from the studied watersheds show that: 1) t_c varies with rain intensity and/or volume. 2) observed t_c decreases as the return period increases. 3) all of the standard t_c equations studied overestimate t_c for return periods greater than 1.5 years. 4) t_c estimated with the Izzard equation and the general equation, does not present a satisfactory fit.

Keywords: time of concentration, watershed hydrology

1. INTRODUCCIÓN

El agua constituye un recurso decisivo para la producción agropecuaria. El mayor conocimiento de las características del recurso, esencialmente la relación lluvia escurrimiento, permite un mejor aprovechamiento del mismo.

El Plan Nacional de Gestión Integrada de Recursos Hídricos en el Uruguay (MVOTMA, DINAGUA 2009), plantea que el agua es un recurso escaso y vital, genera la necesidad de planificar su uso, siendo ésta una actividad dirigida básicamente a garantizar en una forma integrada, racional y sostenible ambientalmente, de forma que sea el promotor del desarrollo productivo y social del país. En el mismo documento se sostiene que, los gobiernos departamentales ante la variabilidad y el cambio climático han identificado el exceso o el déficit de agua como el principal problema en 15 departamentos.

Según estudios basados en el censo agropecuario del 2000 el 89 % del agua de uso agropecuario se destina al riego y el 11 % restante están destinados al abrevadero del ganado, suministro a los tambos y otras instalaciones productivas y abastecimiento de la población asentada en el medio rural. Estos usos son exigentes en cuanto a la calidad y estabilidad del suministro e imprescindibles para la viabilidad productiva. Con motivo del cambio climático las sequías aumentan su frecuencia e intensidad en el país afectando el uso del agua por parte del sector agropecuario requiriendo una consideración y atención especial (MVOTMA, DINAGUA 2009).

La ausencia prolongada de precipitaciones provoca limitantes en la producción agrícola – ganadera entre las que se destacan: insuficiencia de agua para riego, insuficiencia de agua para abrevaderos y déficit hídrico en cultivos de secano. Estas limitantes afectan principalmente al sector

agropecuaria dado que disminuyen la cantidad y calidad del agua para abrevadero del ganado así como la producción de forraje.

La producción agropecuaria necesita de un abastecimiento seguro de agua de calidad. La disponibilidad de agua mensual en el Uruguay tiene una alta incertidumbre, al tener una alta variabilidad Interanual. Esta incertidumbre se puede suplir con la construcción de embalses (Genta y Failache, 2007).

En el país el monitoreo sistemático ha estado asociado a grandes cuencas (de tamaños mayores a 100km^2). El foco de atención en este trabajo es en pequeñas cuencas (tamaños entre $1,5$ a $2,0\text{ km}^2$) para usos agropecuarios en donde se necesita información para el diseño de obras como tajamares o presas para riego. El levantamiento de información a nivel nacional en pequeñas cuencas es escaso y muy reciente.

Para el diseño de obras de evacuación de agua como: aliviadero de tajamares y presas de tierra, alcantarillas, desagües empastados, cunetas, terrazas, etc. se debe determinar el caudal máximo instantáneo, o punta de la crecida, para el período de retorno seleccionado en función de la vida útil de la obra y el riesgo asumido. Dos de las metodologías más utilizadas para su estimación, son: el Método Racional (Chow, 1964) y el Método del Hidrograma Unitario Triangular (USDA NRCS, 2007) Para aplicar estas metodologías, es necesario conocer el *tiempo de concentración* (t_c) de la cuenca. Representa, el tiempo de viaje de una gota de lluvia que cae en el punto hidráulicamente más alejado de la cuenca y escurre superficialmente hasta su salida, o bien, el tiempo a partir del cual toda la cuenca contribuye al caudal en el punto de salida de la cuenca. Por lo tanto, suponiendo una lluvia de intensidad constante, el t_c es el tiempo de equilibrio o duración necesaria, para que se alcance el caudal máximo.

A nivel nacional, para determinar el t_c , se aplican ecuaciones empíricas: Kirpich (1940), para flujo concentrado; y el método de velocidad del Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS) de los Estados Unidos (2007) para flujo no concentrado. La aplicación de estos métodos, en nuestro país, han sido validadas en forma indirecta y parcial, para grandes cuencas (Silveira *et al.*, 2000).

En el cálculo de la tormenta de diseño, la estimación correcta del t_c es fundamental. Bondelid *et al.* (1982) sostienen que el 75 % de los errores al estimar el caudal máximo, puede provenir de errores en la estimación del tiempo de concentración.

1.1 ANTECEDENTES

La importancia del t_c es descrita en toda la literatura hidrológica. El t_c es un parámetro de la cuenca que representa el tiempo de respuesta del sistema lluvia escurrentía (Akan, 1986). La precisión de la estimación del caudal pico es sensible a la exactitud de la estimación del t_c (Mc Cuen *et al.*, 1984). El t_c es un parámetro de entrada importante en la estimación de la tormenta de diseño (Akan, 1984). Sin embargo se ha definido de manera muy informal en la literatura y se ha calculado subjetivamente en la práctica (Akan, 1986)

Hotchkiss y Mc Callum (1995) buscaban encontrar un método de estimación del t_c aceptable en pequeñas cuencas agrícolas de Nebraska y los compararon con siete ecuaciones. Utilizaron cuencas de 100 a 450 hectáreas y pendientes menores a 2.2 %. Los t_c variaron entre 40 y 110 min. y los derivaron del análisis de hietogramas e hidrogramas. Las ecuaciones que ajustaron fueron la de Kirpich y la ecuación de promedio de velocidades de SCS.

Para determinar el t_c es necesario conocer el gasto, (definido como volumen de escurrimiento por unidad de tiempo) que pasa de manera continua durante un período de tiempo, por una determinada sección transversal de un curso. Si se grafican los valores en función del tiempo se obtiene una gráfica denominada *hidrograma*. También es necesario conocer el exceso de precipitación o precipitación efectiva que es la precipitación que no se retiene en la superficie terrestre y tampoco infiltra en el suelo. Si se grafican los valores en función del tiempo se obtiene una grafica llamada *hietograma* (Chow *et al.*, 1994).

La mayoría de los antecedentes revisados estudian los caudales pico y dentro de estos el t_c , analizando los hidrogramas e hietogramas. A la hora de determinar el t_c por medio de hietogramas de tormenta e hidrogramas de escurrimiento, se encuentra en la bibliografía diferentes maneras de medirlo (Mc Cuen, 2009; Abustan *et al.*, 2008; Viessman *et al.*, 1989; Gupta, 1989; Mc Cuen, 1989; Snyder, 1958):

- 1- desde el final de la lluvia efectiva hasta el punto de inflexión de la curva de descenso del hidrograma
- 2- desde el centro de masa de la lluvia efectiva hasta el punto de inflexión de la curva de descenso del hidrograma y
- 3- desde en centro de masa de la lluvia efectiva, al centro de masa del escurrimiento directo.

¿Cual de estas metodologías para medir el t_c se corresponde con la definición del t_c descripta antes?

En la figura N° 1 se representa el hietograma de lluvia neta o efectiva de una cuenca y su correspondiente hidrograma de escurrimiento superficial, se representa además el escurrimiento directo separado del subterráneo y del escurrimiento subsuperficial o hipodérmico, se destaca el punto de inflexión

que es donde termina el escurrimiento directo y comienza la descarga del flujo subsuperficial y flujo base.

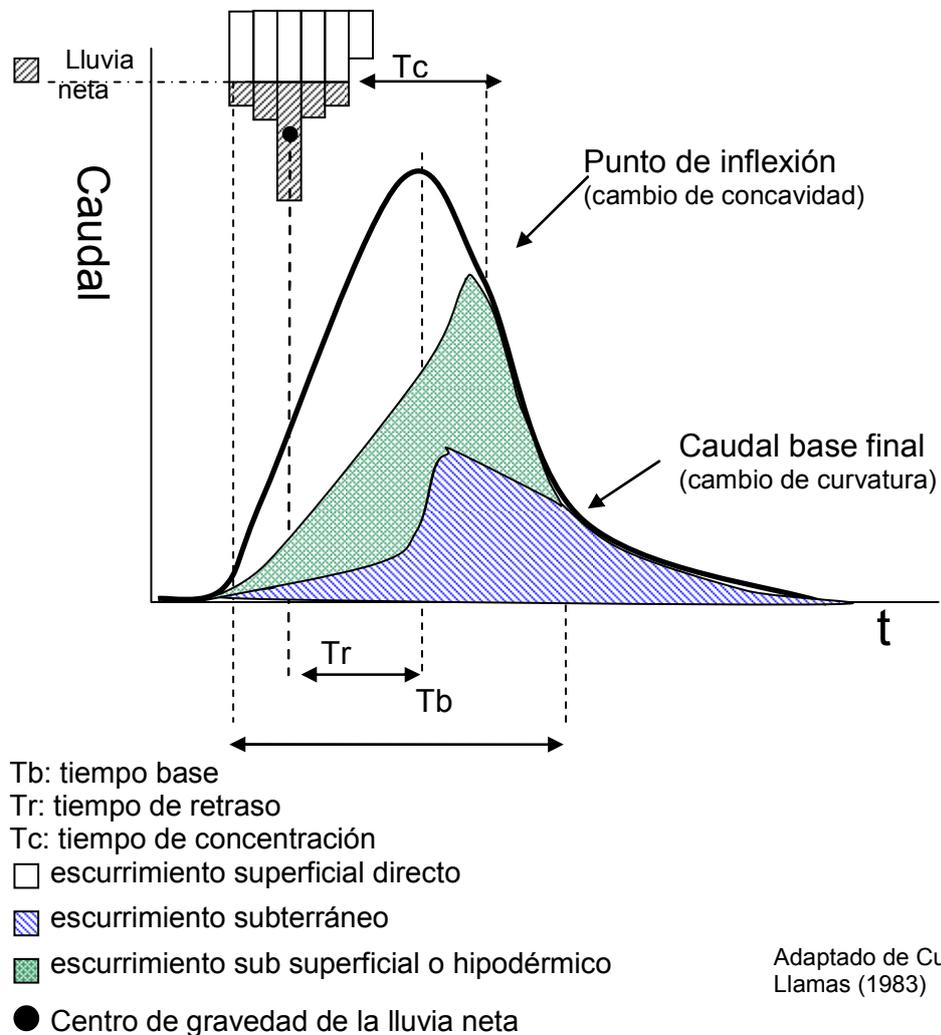


Figura.-1 Hietograma y su correspondiente hidrograma de una cuenca.

La metodología numero 1 se corresponde con el Tc de la figura 1.

Snyder (1958) sostiene que el t_c tomado desde el final de la lluvia efectiva al punto de inflexión es el mismo que el tiempo de escurrimiento desde la parte más remota de la cuenca hasta el punto de interés. Según Ferrer (1993) el tiempo más usado en hidrología es el t_c y lo considera como el tiempo desde el final de la lluvia neta al punto de inflexión que sería el final

del escurrimiento superficial, ya que a partir de ese punto se daría el vaciado del volumen almacenado en la cuenca y este vaciado no se corresponde con el tiempo de recorrido o de viaje como se definió antes. Hotchkiss y Mc Callum, (1995) midieron el t_c a partir de hietogramas e hidrogramas considerándolo desde el final de la lluvia efectiva hasta el punto de inflexión de la curva de descenso del hidrograma, y sostiene que el punto de inflexión es el final del escurrimiento directo.

Mc Cuen (1989) plantea la metodología descrita en el punto 2, considerando que la diferencia con la metodología 1 es pequeña para tormentas cortas. Por otro lado, Abustan *et al.* (2008) usan esta metodología y obtienen resultados satisfactorios, pero para cuencas urbanas donde tiene un 77 % del área es impermeable, por lo tanto la diferencia entre el centro de masa y el final de la lluvia efectiva lo compensa por que el punto de inflexión se acerca mas al escurrimiento pico.

La metodología descrita en el punto 3, se corresponde con el tiempo de retraso (T_r) planteada en la figura 1, denominada por algunos como “Lag” o desfase, (Orsolini *et al.*, 2000). Ferrer (1993) lo plantea como un tiempo intrínseco de la cuenca o sea que no depende el hietograma. Este método es usado por USDA NRCS, (2007) para estimar el t_c , considerando que $T_r = 0.6 t_c$.

Mc Cuen (2009), usó diferentes metodologías para compararlos con los tiempos de viaje de la esorrentía, y encontró que la planteada en el punto 3 era la más estable ya que refleja un valor medio, las variables de tiempo basadas en centros de masa son probablemente valores más estables que las variables tomadas de otros tiempos. Por otro lado sostiene que el punto de inflexión es una variable muy subjetiva y por lo tanto tiene una distribución con alta varianza.

Medir el tiempo de concentración ha sido trabajo de numerosos investigadores, pero algunos parten de definiciones diferentes y de metodologías que no se corresponden con esa definición, por lo tanto se obtienen resultados inciertos, lo que lleva a estimaciones inciertas del escurrimiento máximo.

El proceso de transformación de una lluvia en escorrentía considera habitualmente dos aspectos. El primero es hidrológico y se refiere a lo que ocurre con la lluvia sobre la superficie de la cuenca, hasta generar un hidrograma a la salida de la misma. El segundo es hidráulico y considera el transporte y almacenamiento en la red de drenaje. Por lo tanto los componentes que hacen variar el tiempo de concentración son fisiográficos y climáticos.

Dentro de los fisiográficos encontramos: tamaño de la cuenca, topografía, geología, permeabilidad, longitud de flujo, tipo de flujo (concentrado y/o laminar) y uso de la cuenca entre otros.

Dentro de los climáticos encontramos volumen de precipitación, intensidad de lluvia, duración y frecuencia.

La obtención del tc basado en el concepto de tiempo de recorrido como en las relaciones entre el hietograma e hidrograma plantean dificultades, en cuanto a la reproducibilidad de los datos de entrada, diferentes usuarios de un método, pueden seleccionar diferentes valores de entradas de las variables, (Mc Cuen, *et al.*, 1984).

Los métodos basados en características físicas, deben usar valores medios y constantes y los basados en datos de lluvia y escorrentía tienen que asumir las incertidumbres basadas en el cálculo previo de lluvia y el escurrimiento superficial. Al emplearse las fórmulas empíricas obtenidas del estudio de cuencas experimentales, hay que tener en cuenta dos cosas: 1) la

definición del t_c utilizado en la obtención de la ecuación puede no coincidir con la del método de cálculo empleado. 2) Las características de las cuencas en estudio puede ser diferente a las de las cuencas para la obtención de la fórmula (flujo laminar o encauzado o cuencas de pendientes suaves o fuertes, cuencas grandes o microcuencas) (Ferrer, 1993).

El escurrimiento en una cuenca es un proceso complejo que varía en tres dimensiones espaciales y en el tiempo. Se pueden distinguir dos tipos de escurrimiento: escurrimiento superficial y escurrimiento en canal. El primero es una capa delgada de agua que escurre en forma laminar en la parte superior de las pendientes que luego se concentra formando una corriente angosta que fluye con una trayectoria confinada, (Chow *et al.*, 1994).

Según Chow *et al.* (1994), el tiempo de recorrido del flujo desde un punto a otro de la cuenca, puede deducirse a partir de la distancia y la velocidad de flujo. Supone, que la velocidad es constante en un incremento de longitud:

$$t = \sum_{i=1}^I \frac{\Delta l_i}{v_i} \quad [1]$$

Donde:

t - tiempo

Δl_i - incremento de longitud

v_i - velocidad

Los distintos intervalos de tiempo, pueden tener diferentes velocidades y esto afecta la forma del hidrograma.

La velocidad de escurrimiento es muy difícil de medir directamente. Pilgrim (1977) trabajando con trazadores radiactivos en pequeñas cuencas, determinó las variaciones de la velocidad a través de la cuenca y concluye que las velocidades promedio se incrementan ligeramente hacia la

desembocadura de la cuenca, independientemente que las pendientes disminuyan.

Se sostiene además que, cuencas de diferentes configuraciones y diferentes longitudes de flujo pueden tener el mismo t_c , mientras que cuencas de la misma longitud de recorrido de flujo pueden tener diferentes tiempos de concentración, y concluye que el t_c es función de la resistencia al flujo, de la configuración, e inversamente proporcional a la intensidad de la lluvia y la pendiente de la cuenca (Ben Zvi, 1984).

El t_c no tendría un valor único para la cuenca, Bell y Om Kar (1969) encuentran que se dan diferentes t_c con los distintos tipos de tormenta.

Pilgrim (1966) en Sydney, describe otra metodología para determinar el t_c que son los trazadores radioactivos (oro 198 y cromo 51 EDTA) y los usó tanto en parcelas de escurrimiento como en cuencas reales forestales. Colocó los trazadores en el punto más remoto de la cuenca y lo midió en diferentes puntos y en la desembocadura.

1.1.1 Factores que afectan el t_c

1.1.1.1 Intensidad y duración de la precipitación

Después de comparar el t_c con 11 métodos utilizando los datos recopilados a partir de 48 cuencas urbanas, McCuen *et al.* (1984) encontraron que las intensidades de las precipitaciones es el parámetro más importante de entrada.

Algunos autores demuestran que el t_c se determina, además de las características físicas de las cuencas por la duración de la precipitación (Singh, 1976) y la intensidad de las tormentas (Bell y Om Kar, 1969).

Wong (2005) comparó nueve ecuaciones con datos experimentales y concluyó que, las formulas que no tienen en cuenta la intensidad de precipitación son válidas para un rango limitado de intensidades de precipitación. Sus resultados muestran que obtiene t_c menores con los incrementos de intensidad de lluvia.

La intensidad de precipitación que se considera para determinar el t_c es la precipitación efectiva, la que produce escurrimiento, según Ben-Zevi (1984) esta determinación introduce una variación además de las variaciones temporales y espaciales que tiene la precipitación.

Para determinar el t_c , la elección de la serie de datos de precipitación a analizar es importante ya que sólo para el caso de tiempos de retorno altos se puede comprobar que el tiempo de respuesta de la cuenca no varía con la intensidad de precipitación (Grimaldi *et al.* 2010).

En el diseño hidrológico se supone que la duración de la lluvia máxima o de diseño coincide con el t_c de la cuenca, las lluvias de mayores duraciones no producen aumentos en el caudal pico. Teméz (2003) plantea una diferencia importante, destacando que el t_c es la fase de la tormenta que determina el caudal máximo y esta fase puede ser o no igual a la duración de la tormenta. Por lo tanto la duración total de la tormenta no depende del tamaño de la cuenca y si es dependiente de variables climáticas. Por que la lluvia asociada a los caudales máximos se refiere al intervalo más intenso de duración igual al t_c , pero esa duración no equivale a la duración total de la tormenta ya que solo una fase de la tormenta puede ser suficiente para generar un exceso si el suelo se encuentra saturado.

1.1.1.2 Pendiente y rugosidad

Dooge (1973) sostiene que la pendiente es la segunda característica de las cuencas más usada en las ecuaciones.

De acuerdo a la ecuación de Manning la velocidad de flujo esta en función de la relación entre la pendiente y la rugosidad. Darboux *et al.* (2002) investigaron el flujo superficial y encontraron que la relación entre la pendiente y la rugosidad es importante en el control del mismo.

En cuanto a la rugosidad hay que diferenciar el escurrimiento en forma laminar del escurrimiento concentrado. El escurrimiento en forma laminar se da generalmente en las cabeceras de las cuencas, donde influye un coeficiente de rugosidad, por el efecto de la vegetación, erosión etc., donde USDA NRCS, (2007) recomienda usar la rugosidad efectiva de Manning. Selling *et al.* (2003) trabajaron con modelos físicos de cursos y llanuras de inundación y concluyeron que un único valor de “n” de Manning no es adecuado porque depende de la profundidad de flujo, de la velocidad, del tipo de vegetación, densidad y a su vez dependen de la edad y época del año. Wong y Chen (1997) sostienen que el t_c varía en el escurrimiento superficial al variar la velocidad y la profundidad de flujo y porque lo que cambia es el régimen de flujo de laminar a transicional y turbulento.

Chow (1998) sostiene que en el diseño de obras se usa un único valor de n en todo el canal, pero este valor es muy variable, dependiendo de una serie de factores que a su vez están interrelacionados entre si. Dentro de los factores se destacan:

a) Rugosidad superficial representa el tamaño y la forma de los granos del material que forma el perímetro mojado, los granos finos dan una valor bajo de n y los granos gruesos un valor alto.

b) La vegetación, retarda el flujo y el efecto depende principalmente de la altura, densidad, distribución y tipo de vegetación, el valor de n puede variar entre 0,033 a 0,15.

c) Irregularidades en el canal se refiere a variaciones en las secciones transversales de los canales, su forma y su perímetro mojado a lo largo de su eje longitudinal. Cambios abruptos o alteraciones de secciones pequeñas y grandes requieren el uso de un valor grande de n .

e) Alineamiento del canal, curvas suaves con radios grandes producirán valores de n relativamente bajos, en tanto que curvas bruscas con meandros severos incrementarán el n .

d) Sedimentación y erosión, en general la sedimentación y erosión activa, dan variaciones al canal que ocasionan un incremento en el valor de n .

f) Obstrucción la presencia de troncos de árbol, desechos de flujos, atascamientos, pueden tener un impacto significativo sobre el valor de n .

g) Nivel y caudal en la mayoría de las corrientes el valor de n disminuye con el aumento del nivel y del caudal. Cuando el caudal es alto, la corriente llega a la planicie de inundación y el valor de n en esta zona es mayor que en el canal, pero hasta cierto nivel, las variaciones para profundidades de 0,6m es de 0,05 y por encima de esa altura de 0,04 (tabla 5-4 Chow, 1998).

1.1.1.3 Longitud de flujo

Sheridan (1994) trabajando en nueve cuencas de llanura y relacionando las características físicas de las cuencas con los tiempos del hidrograma, encontró que el parámetro longitud del cauce principal era el que mejor explicaba la variación observada del t_c . Pilgrim (1977) trabajó con isócronas para determinar los tiempos de viaje en una pequeña cuenca de Australia y encontró que el parámetro longitud de flujo dio buenos resultados.

1.1.2 Métodos para estimar el tiempo de concentración

1.1.2.1 Métodos empíricos

Numerosas fórmulas empíricas han sido desarrolladas, en este trabajo se describen algunas de las más usadas.

Las diferentes fórmulas se agrupan en dos grandes grupos: las desarrolladas para flujo encauzado y flujo laminar y dentro de estos grupos, las que tienen en cuenta además de características físicas, la intensidad de lluvia.

Ramser en 1927 fue el primero en definir el tiempo de concentración pero sin describir ninguna fórmula de cálculo. Luego Kirpich en 1940 analizó los datos tomados por Ramser y desarrolló una ecuación usando siete cuencas agrícolas de 0,4 a 81 ha, pendientes entre 2,74 a 10 %, con canales definidos y cobertura de árboles entre 0 y 56 % (Hotchkiss y Mc Callum, 1995).

$$tc = 0.3989L^{0.77}S^{-0.385} \quad [2]$$

tc = tiempo de concentración (h)

L = longitud del canal (Km)

S = pendiente en % (de la longitud total, incluyendo el escurrimiento laminar).

Kirpich difiere de Ramser en la definición de pendiente, donde incluye toda la pendiente, desde el parteaguas a la desembocadura. La longitud que usó fue al igual que Ramser, la longitud del canal (Hotchkiss y Mc Callum, 1995). La ecuación de Kirpich es la ecuación más usada tanto en la bibliografía internacional como en la regional. Esto se debe a que es muy sencilla de usar y requiere parámetros que se obtienen a partir de una carta topográfica.

La ecuación de California Culverts Practice (1942) es esencialmente la ecuación de Kirpich desarrollada para pequeñas cuencas montañosas (Chow *et al.*, 1994).

$$tc = 60(0.87L^3 / H)^{0.385} \quad [3]$$

tc – tiempo de concentración (min.)

L – longitud del curso de agua más largo (m)

H – diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida (m)

El método Federal Aviation Agency (1970) fue desarrollado a partir de información de drenaje en aeropuertos recopilada por el Corps of Engineers, pero ha sido usada frecuentemente para flujos superficiales en cuencas urbanas (Chow *et al.*, 1994).

$$tc = 3.26(1.1 - C)L^{0.50} / S^{0.333} \quad [4]$$

tc – tiempo de concentración (min.)

C – coeficiente de escorrentía del método Racional.

L – longitud de flujo superficial (m)

S – pendiente de la superficie (%).

La ecuación de onda cinemática Morgali y Linsley (1965), Aron y Erborge (1973) es para flujo superficial, desarrollada a partir de análisis de onda cinemática del escurrimiento superficial, lo que implica que un objeto se desplaza a una velocidad dependiendo de la profundidad de flujo, el que se incrementa con la intensidad de lluvia y el tiempo de viaje de ese flujo. El método requiere iteraciones debido a que tc e intensidad de lluvia son desconocidos (Chow *et al.*, 1994).

$$tc = \frac{441L^{0.6}n^{0.6}}{(i^{0.4}S^{0.3})} \quad [5]$$

tc – tiempo de concentración (min)

L – Longitud de flujo superficial en (Km)

n – coeficiente de rugosidad de Manning ($m^{-1/3}s$)

i – intensidad de lluvia (mmh^{-1})

S – Pendiente promedio del terreno ($m m^{-1}$)

En este trabajo se consideró un coeficiente n de 0,03 para pastura y 0,075 para forestal (Chow, 1998)

El método del NRCS (1975-1986) plantea que el tc es la relación entre la velocidad y la longitud de flujo, por lo que se calcula como la suma de los tiempos de viaje para cada tramo de viaje. Los tipos de flujo considerados son: superficial, en caminos empastados, sobre áreas pavimentadas y a través de pequeñas cárcavas o barrancas (Chow *et al.*, 1994).

La velocidad del flujo superficial varía con la cobertura del suelo. En el flujo a través de canales la velocidad se asume 0,45 m/s como velocidad promedio. El método debería ser limitado a cuencas menores a 8 km².

$$tc = 0.91134 \sum_{i=1}^n \frac{kL_i}{S_i^{0.5}} \quad [6]$$

tc – tiempo de concentración (horas)

L – longitud hidráulica de la cuenca (km), mayor trayectoria de flujo.

k - coeficiente de cobertura del suelo

S – pendiente (%)

El coeficiente k de cobertura de suelo es (National Engineering Handbook, 1985):

	K
Bosque con espeso mantillo sobre el suelo	3.95
Barbecho de hojarasca o cultivos de mínimo arado	2.02
Pasturas	1.41
Cultivos en línea recta	1.11
Suelo prácticamente desnudo y sin arar	1.00
Vías de agua empastadas	0.67
Área impermeables	0.50

En 1988 Chow *et al.*, citado por Hotchkiss y Mc Callum, (1995) determinan el t_c , haciendo la suma de los tiempos de viaje, en intervalos de 61m a lo largo del flujo principal de la cuenca. Define al flujo como concentrado y no concentrado, determinado velocidades para diferentes superficies y pendientes, (Chow *et al.*, 1994).

$$t_c = \frac{1}{60} \sum_{i=1}^L \frac{l_i}{v_i} \quad [7]$$

t_c – tiempo de concentración (min)

L – longitud de flujo (m)

V – velocidad de flujo (ms^{-1}) (tabla 5.7.1 Chow *et al.*, 1994)

El método de Izzard fue desarrollado experimentalmente en laboratorio, para flujo superficial en caminos y áreas empastadas. La restricción de éste método es que el producto de la intensidad por la longitud de flujo tiene que ser menor a 3870. La solución de éste método, requiere de procesos iterativos (Chow *et al.*, 1994).

$$t_c = 526.74 \left(\frac{(0.0000276i + c)L^{1/3}}{S^{1/3}i^{2/3}} \right) \quad [8]$$

- t_c = tiempo de concentración (min)
 i = intensidad de lluvia (mmh^{-1})
 c = coeficiente de retardo,
 L = longitud hidráulica de la cuenca (m)
 S = pendiente (m/m)
 $i \cdot L < 3870$

Li y Chibber (2008) tratando de determinar el t_c de terrenos planos, revisaron catorce ecuaciones y llegaron a que están integradas por cuatro variables: longitud del flujo, rugosidad de la superficie, pendiente e intensidad de lluvia y proponen una ecuación general que se expresa como:

$$t_c = kL^a n^b S^y i^z \quad [9]$$

- t_c = tiempo de concentración
 k = constante
 a, b, y, z = exponentes

Las variables intensidad y pendiente son inversamente proporcionales al t_c , por lo que se encuentran normalmente con exponentes negativos.

1.1.2.2 Métodos experimentales

Para determinar en forma experimental el t_c de una cuenca, se debe conocer el escurrimiento de la misma y por tanto el volumen e intensidad de la lluvia precipitada.

La lluvia que no sufre alguno de los fenómenos como evaporación, intercepción, infiltración o almacenamiento en depresiones y que llega en un

tiempo relativamente corto a una determinada sección de control del canal, recibe el nombre de *escorrentía rápida* o también *escorrentía directa*. La cantidad de lluvia que produce la escorrentía rápida o directa se denomina *precipitación efectiva* o *precipitación neta*. La evolución temporal de la precipitación efectiva o neta se denomina *Hietograma de Precipitación Efectiva* y la del caudal rápido *Hidrograma de Escorrentía Rápida o Directa*.

El USDA NRCS (2007) desarrolló un método para determinar el agua que no participa del escurrimiento superficial de una tormenta a lo que llama abstracciones. Considera que la precipitación efectiva P_e , es siempre menor o igual a la precipitación P y de manera similar luego que el escurrimiento comienza, el agua retenida en la cuenca F_a , es menor o igual a la retención potencial máxima S . Existe una cierta cantidad de precipitación I_a , que no produce escorrentía y la escorrentía potencial es $P-I_a$ (Chow *et al.*, 1994).

La ecuación básica del modelo es:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad [10]$$

F_a precipitación retenida.

S máxima retención posible de la cuenca.

P_e escorrentía rápida.

P precipitación acumulada.

I_a cantidad de lluvia inicialmente perdida antes de producirse escurrimiento.

Así, la ecuación [10] expresa que la relación entre la cantidad de lluvia retenida y la capacidad de retención máxima de la cuenca es la misma que la existente entre la escorrentía o lluvia efectiva y la lluvia susceptible de escurrir $P-I_a$.

Según la ecuación de continuidad:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad [11]$$

Sustituyendo [11] en [10] se obtiene y resolviendo para P_e :

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad [12]$$

De los trabajos realizados por el USDA NRCS (2007) para muchas cuencas se obtiene la siguiente relación:

$$I_a = 0.2 S \quad [13]$$

Sustituyendo:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad [14]$$

El problema se centra en hallar el valor de S. Existe una relación entre S y el llamado número de curva CN. El CN es un número adimensional cuyo valor está comprendido entre 100, para superficies totalmente impermeables y 0, para las totalmente permeables. El valor de CN depende del uso del suelo, del tipo del suelo y de las condiciones antecedentes de humedad en la cuenca. Los suelos se clasifican en cuatro tipos que van desde el tipo A para suelos arenosos y muy permeables hasta el D para suelos arcillosos poco permeables. El CN puede obtenerse en unas tablas elaboradas por el USDA NRCS (2007) en base al uso y el tipo del suelo. En el caso de cuencas con diferentes usos y/o tipos de suelos ha de calcularse un CN ponderado. El CN obtenido corresponde a condiciones antecedentes de humedad normales lo cual se denota añadiendo el número romano II: CN(II). Si las condiciones antecedentes de humedad son secas (I) o húmedas (III) los CN correspondientes han de estimarse en base al valor de CN(II). Los criterios de clasificación de las condiciones antecedentes de humedad dependen de la cantidad de lluvia caída los cinco días anteriores al evento y de las condiciones de crecimiento de las plantas (Chow *et al.*, 1994).

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)} \quad [15]$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)} \quad [16]$$

Una vez obtenido el CN puede obtenerse S mediante la siguiente expresión:

$$S(mm) = \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) 25.4 \quad [17]$$

Un hidrograma de crecida grafica el caudal (Q) que aporta una cuenca en función del tiempo. El área comprendida bajo la curva corresponde al volumen de agua que ha pasado por el punto de aforo en el intervalo de tiempo considerado.

Al hidrograma de caudal de una tormenta se le debe separar el flujo base del escurrimiento directo, Chow *et al.* (1994) proponen la metodología de línea recta para cursos efímeros, que consiste en dibujar una línea recta en el hidrograma desde el punto donde empieza el escurrimiento superficial hasta la intersección con el segmento de recesión; de esta manera se obtiene el hidrograma de escurrimiento directo.

Es del análisis de este hidrograma de escurrimiento directo e hidrograma de lluvia efectiva, que se determina en forma experimental el t_c .

Considerando la definición del t_c expresada en el punto 1 de esta tesis, una solución experimental es estimar gráficamente la distancia en tiempo entre el final de la lluvia efectiva y el final de la escorrentía directa (Tucci, 2000), el final de la escorrentía directa es el punto de inflexión de la caída del hidrograma (Hotchkiss y Mc Callum, 1995). Estos autores reconocen que existe un margen de error en la medición del t_c a partir de datos de

campo, puesto que en hidrogramas observados existe una incertidumbre en la determinación del punto de inflexión.

1.2 HIPÓTESIS DE TRABAJO

- El tiempo de concentración varía en microcuencas sometidas a distinto uso de suelos
- El tiempo de concentración varía con la magnitud o lluvia acumulada e intensidad del evento.

1.3 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de esta tesis es el análisis teórico-experimental de los tiempos de concentración en microcuencas del Uruguay sometidas a diferentes usos de suelos.

1.3.1 Objetivos específicos

- Analizar cómo incide la intensidad o la magnitud del agua precipitada en el tiempo de concentración.
- Comparar resultados experimentales o reales con valores obtenidos a partir de las ecuaciones empíricas.
- Comparar y ajustar las ecuaciones empíricas usadas

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDIO

Se trabajó con información de dos pares de micro-cuencas instrumentadas, ubicadas en Paysandú y Tacuarembó, utilizándose cierres con vertederos como secciones de aforo.

2.1.1 Microcuencas apareadas

El estudio de pares de cuencas implica el uso de dos cuencas con características similares en términos de pendiente, tipos de suelos, forma, clima y vegetación, ubicadas al lado o muy cerca una de otra. Después de un periodo de calibración, donde ambas cuencas son monitoreados, una de las cuencas es sometida a un tratamiento y la otra permanece como control. La variabilidad climática es la misma en ambas, por lo tanto cambios en el rendimiento del escurrimiento pueden atribuirse a cambios en la vegetación (Brown *et al.*, 2005).

2.1.1.1 Microcuencas Paysandú

Las microcuencas instrumentadas en el marco del proyecto PDT 32/03 se ubican en el departamento de Paysandú, entrada por el Km 48,500 de ruta 90, a unos 15 km de la localidad de Piedras Coloradas. La microcuenca forestal está situada en el predio “Don Tomás”, sobre la Cañada Baygorria, y la microcuenca de pastura está situada en el predio “La Cantero”, sobre la cañada de La Quinta. Ambos cauces son afluentes del Arroyo Capilla Vieja en su margen izquierda.

Los principales parámetros físicos de las microcuencas se presentan en el cuadro 1.

Cuadro 1. Parámetros de las microcuencas de Paysandú

<i>Parámetros físicos</i>	<i>Microcuenca forestal</i>	<i>Microcuenca campo natural</i>
<i>Área (km²)</i>	2,12	1,20
<i>Long. cauce (Km)</i>	1,78	2,17
<i>Pend. cauce</i>	0,90 %	1,58 %
<i>Pend. media de la cuenca</i>	4,68 %	5,92 %
<i>Tiempo de conc. (min)*</i>	39,0	36,5

(*) Estimado por el método de Kirpich

Se destaca de ambas microcuencas que el escurrimiento se tomó como concentrado, ya que la zona de influencia del escurrimiento laminar es menor al 3 % del total de la cuenca, considerándose no representativa.

Las características geomorfológicas y de distribución de los suelos en ambas microcuencas son muy semejantes, lo que aporta solidez a la comparación de los diferentes usos de los suelos. Los materiales generadores, en ambas microcuencas, son sedimentos cretácicos con relieve escarpado y valles disectados, formando lomadas fuertes y suaves.

En las cabeceras de las microcuencas de las Cañadas de la Quinta y Baygorria, los interfluvios aplanados se encuentran asociaciones de suelos que clasifican como Brunosoles Subéutricos Típicos/Lúvicos y Vertisoles Rúpticos Lúvicos como suelos accesorios, siendo los primeros la asociación dominante.

Por debajo del interfluvio aplanado, en ambas microcuencas se encuentran sucesivos niveles de escarpas formadas por materiales cretácicos consolidados con afloramientos rocosos. Las pendientes son del 1 % y menores. Unidad IAp(L)K de la Figura 2.

El nivel superior de escarpas por debajo del interfluvio está constituido por materiales con alto contenido de calizas, en cuyas áreas de retroceso se desarrollan suelos francos a arenoso francos profundos, negros asociados a suelos más superficiales, Brunosoles subéutricos típicos. Las pendientes oscilan entre 3y 5 %. Unidad LcK de la Figura 2.

Por debajo otro nivel de escarpas formado por areniscas silicificadas de la Formación Guichón en cuyas áreas de retroceso se encuentran suelos pardos muy diferenciados texturalmente y bajo contenido de materia orgánica, Argisoles Dístricos Melánicos Abrúpticos, a ellos se encuentran asociados suelos superficiales o muy superficiales, Litosoles Subéutricos Ocricos. A diferencia de lo que ocurre en la microcuenca de la Cañada de la Quinta, en la cual esta unidad de suelos llega hasta el valle que acompaña la vía de drenaje, en la microcuenca de la cañada de Baygorria existe un nivel inferior de escarpas que da lugar a una unidad de suelos con una asociación muy similar a la que está en posición altimétricamente superior, compuesta por Litosoles y Argisoles. Unidad Esc K, Figura 2.

Estas microcuencas difieren en la metodología de cuencas apareadas en que no se monitorearon en igualdad de condiciones previo al cambio de cobertura, pero si el resto de las características (forma, pendiente tipo de suelos y ubicación) son similares. Durante el período de análisis de datos (6/2006 a 12/2009), la microcuenca La Cantera permaneció cubierta por pasturas, en cambio la microcuenca Don Tomás fue plantada en otoño-primavera de 1998 con *Eucalyptus globulus* ssp. *Maidennii*, con una densidad de 895 árboles ha⁻¹.

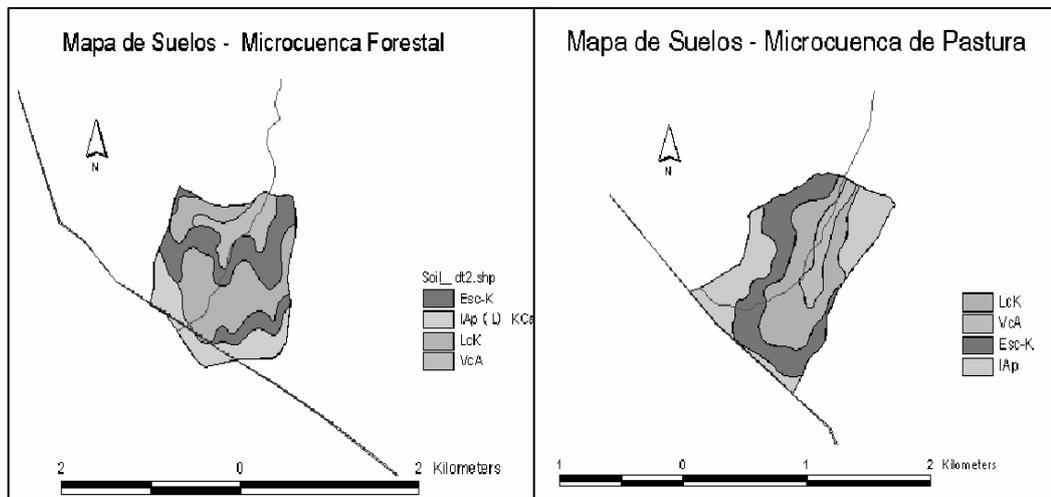


Figura 2. Mapa de suelos de la microcuenca Don Tomás (forestal) y La Cantera (pastura).

La instrumentación de las microcuencas consiste en cierres del curso principal con vertederos de cresta delgada, de escotadura en v con limnógrafos digitales, tipo Thalimedes, marca Ott. La precipitación total incidente sobre la microcuenca forestal se registró con un pluviógrafo digital, marca Rainwise, instalado en un claro, en la zona central de la microcuenca. En el mismo sitio, se instaló también una estación meteorológica, que registra velocidad y dirección de viento, datos estos que se utilizan para corregir la precipitación por la acción de los vientos (Musy y Laglaine, 1992). Puesto que la distancia entre baricentros de las microcuencas es de 5 km, se colocó otro pluviógrafo en la microcuenca con pastura natural para el registro de la precipitación total incidente sobre la misma.

La serie de datos analizados se extiende desde mayo del 2006 a diciembre de 2009 de caudales y precipitación registrados cada 5 minutos. Esta serie presenta algunas discontinuidades, con pérdida de algunos eventos extremos.

2.1.1.2 Microcuencas Tacuarembó

Estas dos microcuencas se encuentran en el establecimiento de “La Corona”, propiedad de la Empresa Weyerhaeuser, Uruguay, en el departamento de Tacuarembó. Las microcuencas apareadas, se encuentran instrumentadas desde 2000, el monitoreo lo lleva a cabo la Universidad Estatal de Carolina del Norte, cediendo los datos obtenidos para esta tesis.

Cuadro 2. Parámetros de las microcuencas de Tacuarembó

<i>Parámetros físicos</i>	<i>Microcuenca forestal (La Cantera)</i>	<i>Microcuenca campo natural (La Corona)</i>
<i>Área (km²)</i>	1,08	0,69
<i>Long. cauce (Km)</i>	1,9	1,5
<i>Pend. cauce</i>	2,3 %	4,9 %
<i>Pend. media de la cuenca</i>	3,9 %	6,7 %
<i>Tiempo de conc. (min)*</i>	28,0	17,7

(*) Estimado por el método de Kirpich

El escurrimiento superficial de éstas microcuencas se tomó como concentrado ya que la zona de influencia del escurrimiento laminar es entre 5 y 7 % considerándose no representativa.

Los suelos en las zonas baja y medias de ambas cuencas están dominados por arenas margas y material arenoso franco arcillosos a diferente profundidad. Las zonas más altas se encuentran aflorando el basalto y la arenisca con un suelo muy superficial. El mapa de suelos fue elaborado por Molfino (2000), la caracterización física y química de los suelos fue elaborada por García Prechach *et al.* (2004), Figura 3. Los suelos representativos de las lomas y laderas son Acrisoles Ocrícos Típicos, Acrisoles y Luvisoles y Luvisoles Albícos y acrisoles Abrúpticos. En el interfluvio que separa ambas cuencas aparece un Inceptisol es un suelo muy similar al que aparece en las lomadas pero sin horizonte B.

En la cuenca D2 forestal existe porcentualmente una mayor área de mesetas de Basalto y en general pendientes mas fuertes (Unidad C de colinas fuertes con pendientes de 12 a 15 %), (Molfino, 2000).

En la cuenca D1 de pasturas dominan las lomadas (Unidad DL) y lomadas suaves (Unidad F), (Molfino, 2000).

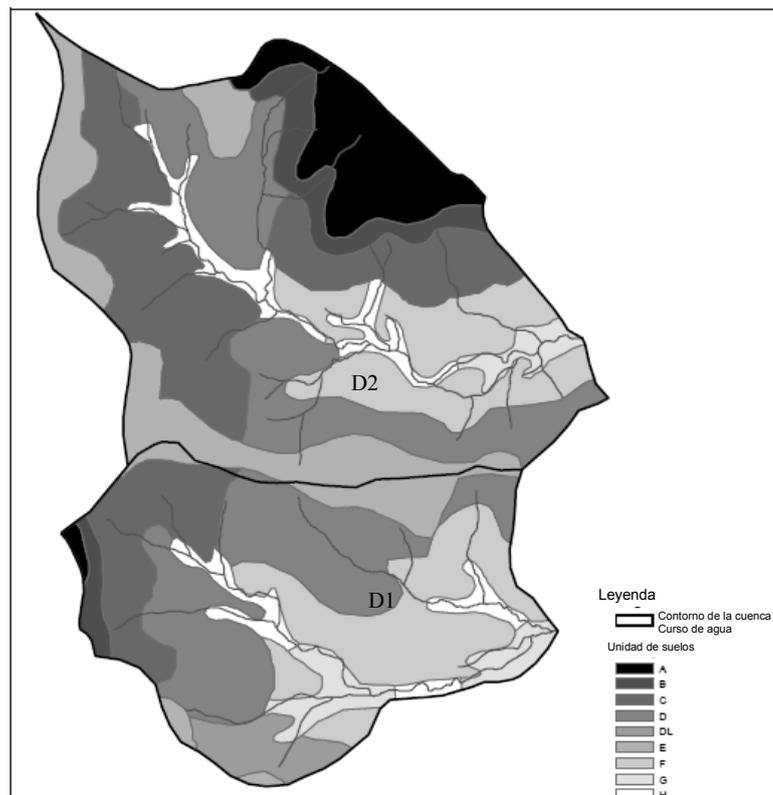


Figura 3 Mapa de suelos de las microcuencas Weyerhaeuser, Uruguay, La Corona. Cuenca D1 pasturas, cuenca D2 forestal.

Durante todo el período analizado (02/2001-04/2007), la cuenca D1 permaneció como testigo con la vegetación original de campo natural. La cuencas D2 en cambio, permaneció con campo natural hasta julio del 2003 (período de calibración), donde fue plantada con *Pinus taeda* el 57 % del área. Los plantines fueron trasplantados en surcos (aproximadamente de 0,1 m de profundidad y 0,7 m de ancho) en curvas a nivel y separados entre si

2,5 m. La densidad de plantación fue de 1000 árboles ha⁻¹. Las prácticas de poda y raleo fueron las estándares para la empresa.

Para instrumentar las microcuencas se cerró el curso principal construyendo canales a superficie libre (HL flumes, en inglés) (Chescheir *et al.*, 2003). Para medir la altura de agua se instaló un módulo Onset (HOBO U12) con capacidad de registro automático de flujo cada 2 minutos (Chescheir *et al.*, 2004). En el límite de ambas cuencas se instaló una estación meteorológica automática Campbell Scientific, equipada con sensores y registradores automáticos de lluvia, temperatura y humedad relativa del aire.

La serie de datos suministrada por la Universidad Estatal de Carolina del Norte no es continua, constando de los siguientes períodos:

- año 2001, febrero, marzo, abril y junio
- año 2002, octubre
- año 2003, enero y marzo
- año 2005, abril, mayo y junio
- año 2007, abril

El registro de esta serie de datos es cada 2 a 3 minutos, tanto para mm limnigráficos como precipitación.

2.2 METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LOS HIDROGRAMAS

La elección de los episodios requiere la observación de los limnigramas procedentes de las estaciones de aforos. Estos limnigramas proporcionan la evolución temporal de los niveles de agua de los cursos. Es necesario transformar los niveles en caudales mediante una curva de gastos.

Para las microcuencas apareadas Don Tomás y la Cantera, la información ya estaba generada en forma de caudal (m^3s^{-1}) cada 5 minutos, se les restó el caudal base, usándose el promedio de caudales estabilizados en el período.

En las microcuencas de La Corona, el limnigrama se llevó a valores de caudal y se le restó el caudal base con la misma metodología que en las microcuencas anteriores. Los datos del limnigrama estaban generados, en intervalos que diferían en dos a tres minutos. A la serie se la unificó generándola a un minuto, para llevarla cada cinco minutos y luego se graficó.

2.3 METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LOS HIETOGRAMAS DE LLUVIA EFECTIVA

Se analizan los pluviogramas con una resolución temporal de 5 minutos para todas las microcuencas. En esta tesis se trabajó con la evolución temporal de la lluvia efectiva o neta que se denomina Hietograma de Lluvia Efectiva, propuesta por Soil Conservation Service (1972), (Chow *et al.* (1994). La lluvia efectiva o neta (Pe) es la que escurre en superficie.

En todas las microcuencas se partía del conocimiento de la cantidad total de escorrentía rápida, que se corresponde con Pe y de la precipitación total P . Conociendo estos parámetros, se despeja S de la ecuación [14].

$$S = 5P + 10Pe - 10\sqrt{Pe^2 + 1.25P * Pe} \quad [18]$$

Con el valor de S se determina nuevamente para cada intervalo de la tormenta el valor de Pe , que se acumula en el tiempo para toda la tormenta, pudiéndose graficar el hietograma de lluvia efectiva.

Conociendo S se determinó con la metodología propuesta por Soil Conservation Service (1972), el valor de CN para cada tormenta (Chow *et al.*, 1994).

2.4 METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

Para la determinación del t_c , se aplicó la metodología descrita por Hotchkiss y Mc Callum (1995) y Tucci (2000) a partir de los hietogramas de lluvia efectiva e hidrogramas de escurrimiento directo.

Los t_c de campo se derivan del análisis de los hidrogramas y hietogramas de todos los eventos disponibles para todas las microcuencas, con una resolución de 5 minutos. De ellos, se seleccionaron los hidrogramas de los eventos que superaran los 25mm de precipitación, caracterizados por presentar un solo pico de caudal (Castiglioni *et al.*, 2006).

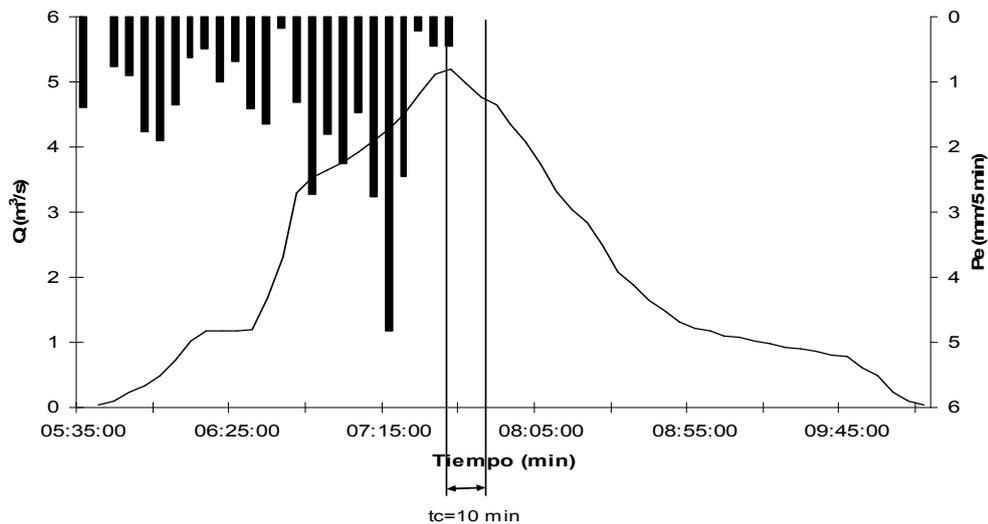


Figura 4.- Hidrograma e hietograma de una tormenta

Se presenta en figura 4, un hidrograma e hietograma correspondiente a una tormenta del 19 de noviembre del 2009 de la cuenca de La Cantera, donde se determinó un tc de 10 minutos.

2.5 METODOLOGÍA PARA DETERMINAR EL PERÍODO DE RETORNO

Se determinó el periodo de retorno de cada tormenta, según la metodología descrita por Silveira *et al.* (2000). Conocida la duración d (h) y la precipitación acumulada de cada evento, así como la precipitación de 3 horas y 10 años de período de retorno (curvas IDF, Genta *et al.*, 1998), se determinó el período de retorno aplicando las siguientes ecuaciones:

$$P_{(d,Tr,p)} = P_{(3,10,p)} \cdot CT_{(Tr)} \cdot CD_{(d)} \quad [19]$$

Donde:

$P_{(d,Tr,p)}$ es la precipitación (mm), de duración d y período de retorno Tr , en el punto p .

$P_{(3,10,p)}$ es la precipitación de 3 horas de duración y 10 años de periodo de retorno en el punto (p), según Figura 5.

CT - Coeficiente de corrección según el período de retorno

CD - Coeficiente de corrección según duración d de la tormenta

Tr - Período de retorno (años)

d - duración de la tormenta (horas)

$$\text{Para } d < 3 \text{ horas } \quad CD = \frac{0.6208 \cdot d}{(d + 0.0137)^{0.5639}} \quad [20]$$

$$\text{Para } d > 3 \text{ horas } \quad CD = \frac{1.0287 \cdot d}{(d + 1.0293)^{0.8083}} \quad [21]$$

$$CT(Tr) = 0.578 - 0.4312 \log \left[\ln \left[\frac{Tr}{Tr - 1} \right] \right] \quad [22]$$

Luego de calcular el coeficiente de corrección según la duración de la tormenta (ecuaciones [20] y [21]) y el coeficiente de corrección para el período de retorno (ecuación [19]), el período de retorno es la única incógnita en la ecuación [22].

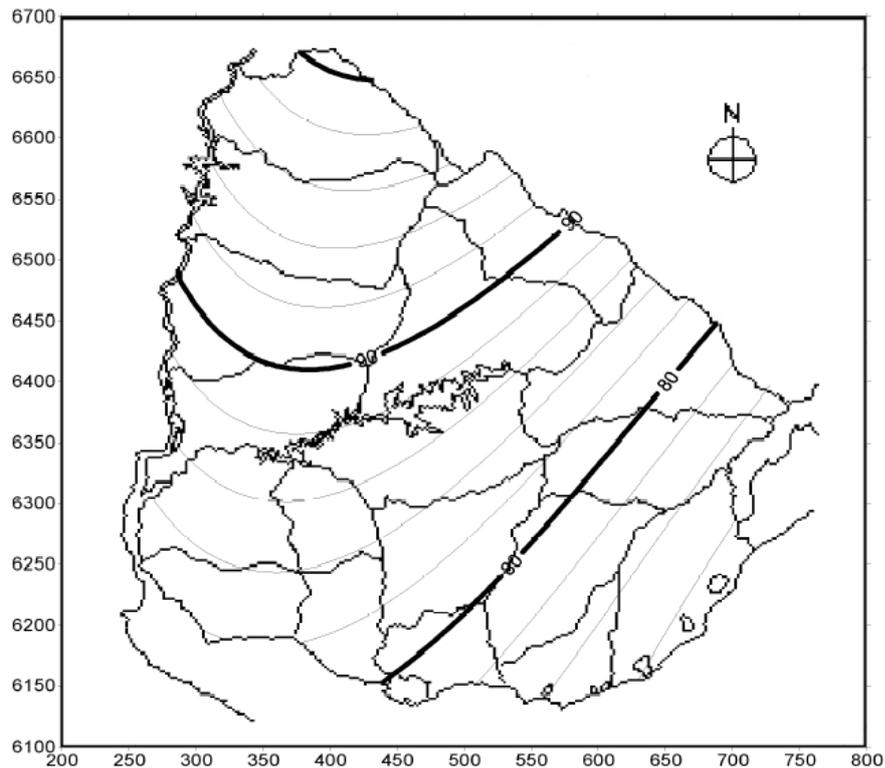


Figura 5.-Isoyetas de lluvias extremas en el Uruguay. Precipitación de 3 horas de Duración y 10 años de Período de Retorno. Fuente: Genta *et al.* (1998)

2.6 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA:

1. Se eligieron los eventos o tormentas que cumplan las siguientes condiciones: episodios de lluvia escorrentía de crecidas importantes con picos definidos (Sheridan 1994).
2. Se seleccionaron las tormentas de precipitación superior a 25mm.
3. Se determinaron las abstracciones y los números adimensional de curva (CN) por el método del Soil Conservation Service (1972), para cada tormenta (Chow *et al.*, 1994).

4. Se obtuvieron los hietogramas de lluvia efectiva.
5. A los datos de caudal recabado en el campo, se le extrajo el caudal base, de forma de obtener el escurrimiento directo.
6. Se obtuvieron los hidrogramas de transformación de lluvia neta en escorrentía directa.
7. Se midieron los tiempos de concentración en los hidrogramas e hietogramas.
8. Se determinó la intensidad máxima de lluvia para los tiempos de concentración medidos, el caudal máximo, el volumen escurrido y la duración de la precipitación efectiva, para cada tormenta.
9. Se calcularon los tiempos de concentración, mediante las ecuaciones empíricas.
10. Se realizaron los análisis de regresión para obtener el mejor ajuste entre los datos empíricos y los experimentales
11. Se calcularon los tiempos de retorno de las tormentas elegidas.
12. Se compararon los t_c observados y calculados.

Las ecuaciones propuestas a comparar son: Kirpich (1940), California Culverts Practice (1942), Federal Aviation Agency (1970), Izzard (1946), Ecuaciones de onda cinemática Morgarelli y Linsley (1965) y Aron y Erborge (1973), Ecuación de retardo SCS (1973), Método del NRCS (1975, 1986), y Método de Chow (1988), (Chow *et al.*, 1994).

Los métodos que se adaptan a las condiciones de las microcuencas estudiadas son: el método de Kirpich (1940), Método de Izzard (1946) y Onda Cinemática Morgali y Linsley (1965), (Chow *et al.*, 1994).

Se seleccionó la ecuación de Kirpich por ser una de las más utilizadas a nivel nacional, puesto que requiere dos parámetros, sencillos de determinar, y es la más citada en la bibliografía revisada (Tucci, 2000; Castiglioni, 1999; Hotchkissy McCallum, 1995; Sheridan, 1994 y McCuen *et al.*, 1984). Las

características de las cuencas estudiadas coinciden con las características de las cuencas en donde fue desarrollada la ecuación, cuencas rurales entre 3 y 10% con flujo encauzado (Tucci, 2000; Chow *et al.*, 1994). Tucci (2000) sostiene que cuando el valor de L supera los 10 Km la fórmula subestima el t_c .

Singh (1976) demuestra en su trabajo que en el t_c , además de las características físicas de las cuencas, incide la distribución espacio-temporal de las precipitaciones. El método de Izzard se consideró para este trabajo, ya que dentro de sus parámetros tiene en cuenta la intensidad de lluvia, además de pendiente y longitud de flujo ya consideradas por la ecuación de Kirpich. Conviene notar que la intensidad de la lluvia no es considerada en las ecuaciones que se usan a nivel nacional. Si bien este método, plantea una restricción que el producto de la intensidad por la longitud de flujo tiene que ser a menor a 3870, condición que no cumplen las microcuencas bajo estudio, pero al ser desarrollado experimentalmente en laboratorio, para flujos en caminos y áreas empastadas (Chow *et al.*, 1994), se optó por compararlo con los datos experimentales, puesto que la hipótesis de este estudio es que el t_c no es constante. El método requiere iteraciones debido a que t_c e intensidad de lluvia son desconocidos. El valor de coeficiente de retardo varía para pavimentos lisos a rugosos entre 0,007 a 0,012 y para pasto es de 0,06.

La ecuación desarrollado por Morgali y Linsley (1965) (Chow *et al.*, 1994), es para flujo superficial, a partir de análisis de onda cinemática, lo que implica que un objeto se desplaza a una velocidad dependiendo de la profundidad de flujo, el que se incrementa con la intensidad de lluvia y el tiempo de viaje de ese flujo. Este método se seleccionó para esta investigación, por que al igual que la ecuación de Izzard considera la intensidad de lluvia, un coeficiente de rugosidad del terreno y requiere iteraciones debido a que t_c e intensidad de lluvia son desconocidos.

13. Se tomó la formula general planteada por Li y Chibber (2008) y se ajustó por regresión no lineal mediante el programa XLSTAT-Pro (versión de prueba) la constante, los exponentes de cada uno de los parámetros y la n de Manning como coeficiente de rugosidad, diferente de acuerdo a la cobertura.

Se usó la misma metodología para la ecuación de Izzard, ajustándose los exponentes de cada uno de los parámetros y el coeficiente de rugosidad c , para cada cobertura.

Se realizó un análisis de regresión de los tiempos de concentración calculados con respecto a los observados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 EVENTOS ANALIZADOS

Los datos disponibles para todas las cuencas se representan en el cuadro 3. Del número de eventos totales, se seleccionaron para el análisis, los eventos que superaron las restricciones metodológicas descritas en el apartado 3.7. El número de eventos que fueron utilizados para el análisis no superan el 50 % de los eventos totales (cuadro 3).

Cuadro 3.- Total de eventos analizados

Cuencas	Nº de Eventos totales	Nº de eventos analizados
Don Tomás forestal	31	17
La Cantera pastura	43	16
La Corona forestal	41	18
La Corona pastura	39	17

Para las microcuencas de Paysandú (Don Tomás y La Cantera) el 45 % de los eventos levantaron las restricciones metodológicas, considerando que el período de datos es desde 2006 al 2009. Para las microcuencas de Tacuarembó (La Corona forestal y pasturas) el 44 % cumplían con las restricciones metodológicas, a pesar que el período es mas prolongado (2001al 2007) se contaba con algunos meses de cada año.

3.2 PERÍODOS DE RETORNO Y TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN

De acuerdo a la información histórica del país, se determinó el tiempo de retorno de los eventos disponibles, constatándose que en su mayoría son de baja recurrencia. Se tienen 4 eventos con períodos de retorno superiores a 2 años, para la microcuenca Don Tomás y 5 eventos con períodos de

retorno mayores a 2 años para la microcuenca La Cantera (cuadro 4). Mientras que para la microcuenca de La Corona, los eventos que superan los 2 años de períodos de retorno, son 16 del total de tormentas tanto en la microcuencas forestal como la de pastura (cuadro 5).

Cuadro 4.- Tiempos de concentración medidos y períodos de retorno de las tormentas respectivas para las microcuencas Don Tomás y La Cantera

DON TOMÁS (forestal)			LA CANTERA (pastura)		
Fecha	tc (min)	Tr años)	Fecha	tc (min)	Tr años)
17/06/2006	55	1,7	17/06/2006	105	1,5
04/10/2006	15	1,3	04/10/2006	10	2,4
05/11/2006	130	1,0	14/10/2006	75	1,0
16/11/2006	40	1,2	21/02/2007	90	2,3
20/12/2006	30	2,3	01/03/2007	45	1,0
27/02/2007	115	1,1	06/03/2007	15	1,3
02/03/2007	150	1,0	18/11/2007	15	1,3
06/10/2007	70	1,0	27/03/2008	90	1,1
29/02/2008	110	1,0	21/07/2008	140	1,0
11/10/2009	115	1,2	17/11/2009	25	1,7
17/11/2009	30	1,2	18/11/2009	75	1,1
18/11/2009	30	1,2	19/11/2009	10	3,9
19/11/2009	20	4,3	21/11/2009	40	1,2
21/11/2009	60	1,3	27/11/2009	35	1,8
27/11/2009	70	1,2	30/11/2009	30	3,8
29/11/2009	25	4,1	02/12/2009	10	2,2
02/12/2009	10	2,3			

Los períodos de retorno de las tormentas que se trabajó variaron entre 1 y 25 años, constatándose que para las microcuencas de La Corona, el 50% se encuentra entre 2 y 4 años y para las microcuencas de Don Tomás 23% y La Cantera 37% respectivamente. El tc se usa en la determinación del caudal máximo para el diseño de obras de infraestructura, por lo que las tormentas para determinarlo deberían ser de períodos de recurrencia altos, se cuenta solo con un evento de 25 años para las microcuencas de Tacuarembó y el resto son eventos entre 2 y 4 años.

Los datos disponibles corresponden al período Febrero de 2001 a Diciembre de 2009 y no se contó con una serie continua de datos. Este período, que se caracterizó además, por déficit de precipitaciones con relación a la media histórica, con excepción del año 2001 y los periodos Marzo, Abril y Octubre del 2002, Octubre de 2006 a Abril de 2007 y Noviembre y Diciembre 2009.

Cuadro 5.- Tiempos de concentración y sus respectivos períodos de retorno para las microcuencas de Tacuarembó

LA CORONA (forestal)			LA CORONA (pastura)		
Fecha	tc (min)	Tr años)	Fecha	tc (min)	Tr años)
24/02/2001	10	2,9	24/02/2001	5	3,0
17/03/2001	10	3,9	17/03/2001	10	3,0
08/04/2001	5	1,4	08/04/2001	10	1,4
23/04/2001	10	1,1	23/04/2001	15	1,1
30/04/2001	10	1,3	30/04/2001	15	1,3
06/10/2002	5	24,6	06/10/2002	5	24,6
09/10/2002	10	1,0	09/10/2002	15	1,0
19/10/2002	10	1,7	19/10/2002	15	1,7
27/10/2002	15	2,1	27/10/2002	10	2,1
28/10/2002	15	3,1	28/10/2002	5	3,2
02/03/2003	20	1,1	02/03/2003	15	1,0
11/03/2003	30	1,4	20/03/2003	10	2,2
20/03/2003	5	1,5	07/04/2005	15	2,2
07/04/2005	20	1,7	13/05/2005	10	1,9
13/05/2005	10	1,5	13/05/2005	10	1,3
13/05/2005	10	1,9	04/06/2005	10	1,3
04/06/2005	10	2,1	23/04/2007	10	4,5
23/04/2007	10	2,4			

Los tc observados en la microcuenca Don Tomás (forestal), variaron entre 10 y 150 minutos, y en la microcuenca La Cantera (pasturas) entre 10 y 140 minutos (cuadro 4). Mientras que para las microcuencas de La Corona los tc observados vararon entre 5 y 15 minutos en la microcuenca de pastura y entre 5 y 30 para la forestal (cuadro 5).

Los tc observados en las microcuencas de La Corona, son menores que los tc de las cuencas de Don Tomás y La Cantera. La serie de datos usada para las microcuencas de Don Tomás y la Cantera va del 2006 al 2009, en donde se analizan la mayoría de las tormentas, en cambio para las microcuencas de La Corona se contó con una serie discontinua del 2001 al 2007 en donde se seleccionaron los meses más lluviosos de la serie. Sin embargo, en La Corona, salvo una sola tormenta, los períodos de retorno de las tormentas se parecen a los de las cuencas de Paysandú. Con respecto a las características físicas, la longitud del cauce y la pendiente media de la cuenca son similares, en cambio la pendiente del cauce es un 60 % más chica en las microcuencas de Tacuarembó que las de Paysandú, esto concuerda con los trabajos de Dooge (1973) que sostiene que es una de las características mas usadas en las ecuaciones y Ben Zvi, (1984) donde concluye que el tc es función entre otras características del inverso de la pendiente.

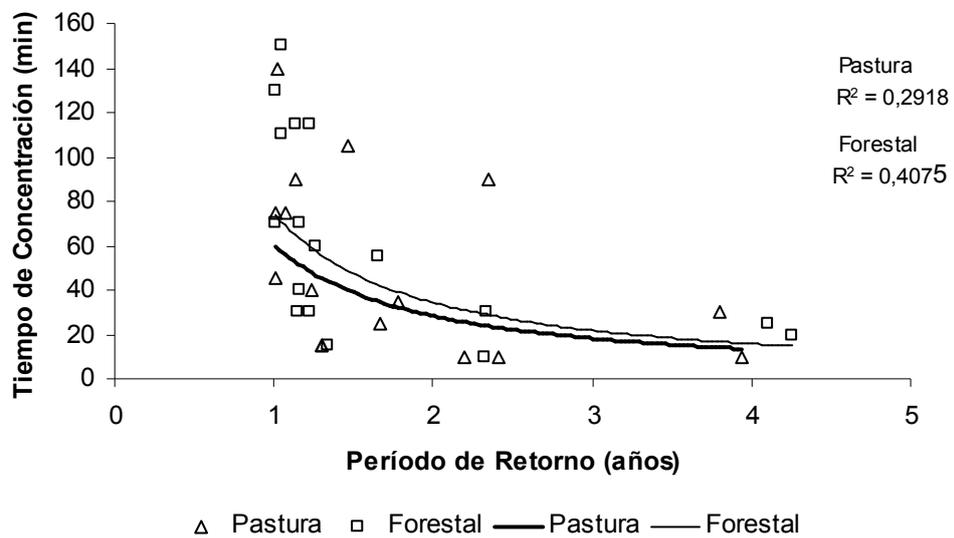
Cuadro 6.- Promedios de duraciones de tormentas, volumen precipitado e intensidad de lluvia para las 4 microcuencas.

	Duración de la tormenta (h)	Volumen precipitado (mm)	Intensidad máxima (mm/h)
Don Tomás (for)	3,14	40,97	40,38
La Cantera (past)	2,20	38,15	44,50
La Corona D1 (pas)	1,20	36,00	73,90
La Corona D2 (for)	1,40	38,00	71,80

Se observa en todas las microcuencas, una variabilidad en los tc para un mismo valor de período de retorno (cuadros 4 y 5). La mayor variabilidad se da en las cuencas de Don Tomás y la Cantera Las duraciones de la tormentas son mayores en promedio en estas últimas microcuencas a casi igual volumen de precipitación, esto demuestra que tormentas mas

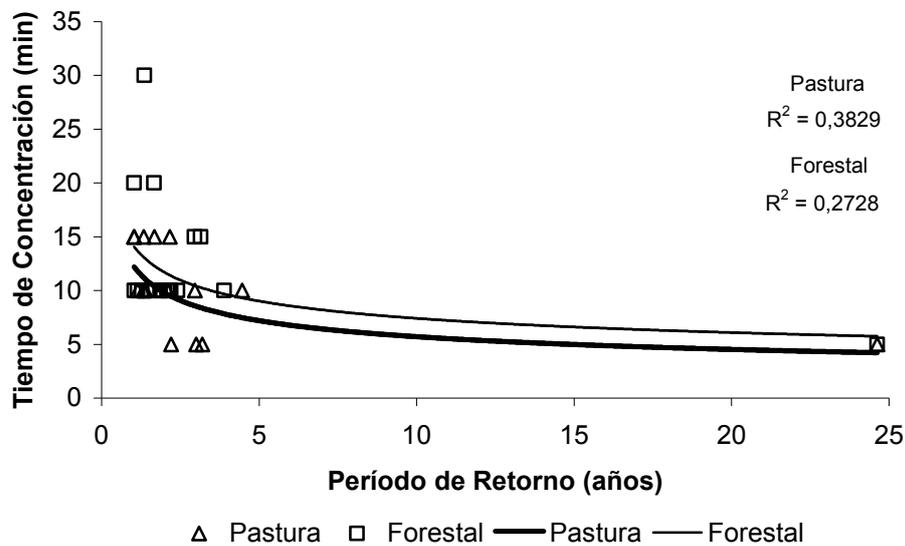
prolongadas en el tiempo son de menor intensidad y por lo tanto mayores t_c (cuadro 6).

En la representación gráfica de la relación, periodos de retorno y t_c observados en todas las microcuencas (Figuras 6 y 7), se observa que el t_c disminuye a medida que aumenta el período de retorno, tendiendo hacia una asíntota en la medida que los eventos son de mayor recurrencia.



* R^2 significativo al 1% con 16 grados de libertad del error, para la microcuenca forestal y 15 para la pastura

Figura 6.- Período de retorno y t_c para Las microcuencas de Don Tomas y La Cantera



* R^2 significativo al 1% con 16 grados de libertad del error.

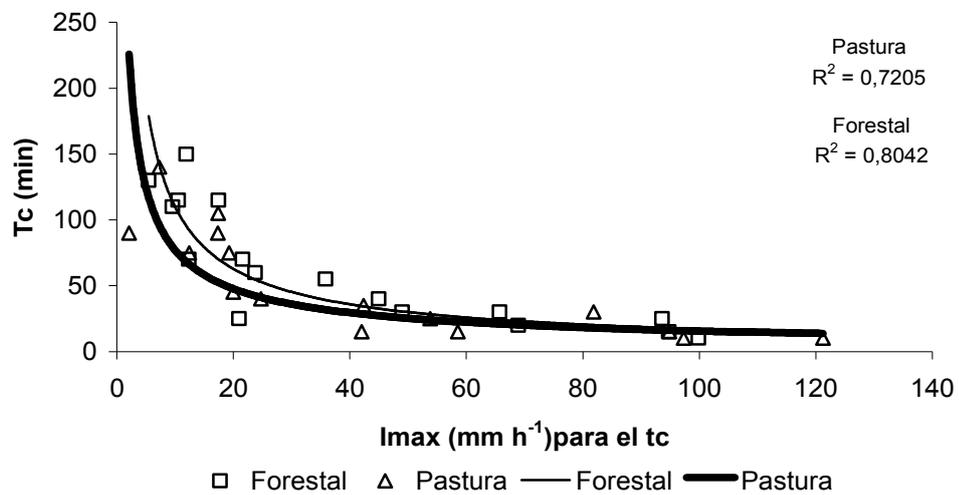
Figura 7.- Período de retorno y t_c para las microcuencas de La Corona.

Se destaca de las figuras 6 y 7, que los t_c observados en las dos microcuencas forestales son mayores que los observados en las microcuencas apareadas de pasturas. La rugosidad superficial generada por el cambio de cobertura del suelo de pastura a forestal, estaría disminuyendo la velocidad del flujo y por tanto aumentando el t_c en la cuencas forestales esto estaría en concordancia con lo planteado por Darboux *et al.* (2002) y Eisenbies *et al.* (2007).

3.3 INTENSIDAD DE LLUVIA

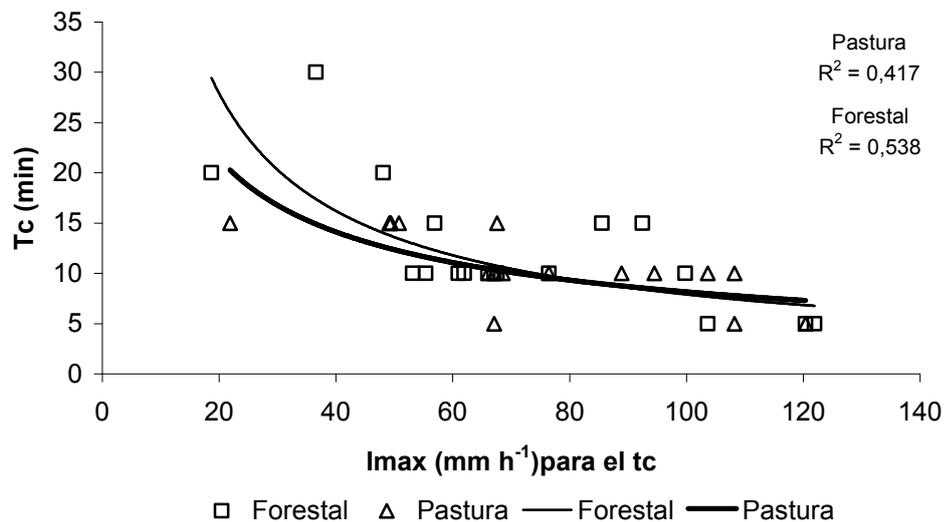
Se determinó las intensidades de lluvia máxima para una duración igual al los tiempos de concentración medidos de cada tormenta. Se observa en todas la cuencas que el t_c disminuye con el aumento de la intensidad de la lluvia y por consiguiente su recurrencia (figuras 8 y 9). Este resultado concuerda con lo obtenido por Wong (2005).

R significativo al 1% con 16 grados de libertad del error, para todas las microcuencas.



* R² significativo al 1% con 16 grados de libertad del error, para la microcuenca forestal y 15 para la pastura

Figura 8.- Intensidades máximas para una duración igual al tc de la tormenta y los tc de las microcuencas Don Tomás y La Cantera.



* R² significativo al 1% con 16 grados de libertad del error.

Figura 9.- Intensidades máximas para una duración igual al tc de la tormenta y los tc de las microcuencas de La Corona.

Se observa que las curvas de los tc de las microcuencas forestales están por encima de las de pasturas al igual que en las figuras 6 y 7, pero para valores de intensidad de lluvia por encima de 60 mm h-1, no hay diferencias entre coberturas.

Se destaca una leve tendencia en intensidades de lluvia altos que los tc tienden a una asíntota, estas intensidades de lluvias pertenecen a tormentas con períodos de recurrencia mayores, lo que se corresponde con lo planteado por Grimaldi *et al.* (2010).

3.4 DURACIÓN DE LA TORMENTA

Se determinó la duración de las tormentas efectivas de todas las microcuencas, al graficarlas con respecto al tc se observa, para La Corona (pastura) figura 11, con valores levemente significativos los tc son directamente proporcionales a las duraciones de las tormentas. No se encontraron valores significativos en las tres microcuencas restantes, figuras 10 y 11.

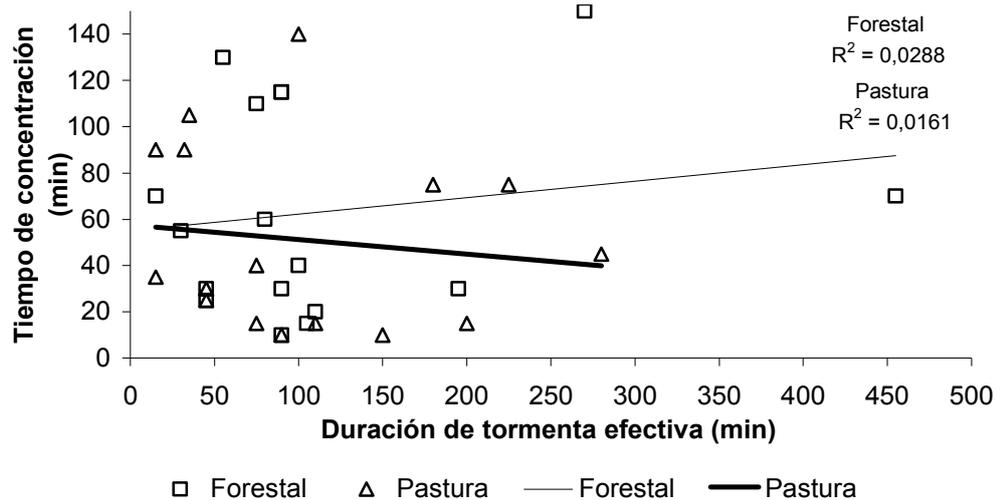


Figura 10.- Duración de las tormentas efectivas con respecto al tc de las microcuencas Don Tomás (forestal) y La Cantera (pastura).

Si bien se encontró en una microcuenca valores significativos de coeficiente de determinación, es un valor muy pobre, 0.2 para La Corona (pastura) que es consistente con los encontrados por Bell y Om Car (1969) pero, estos autores trabajaron con valores de tiempo de retraso. Para las otras tres microcuencas los valores de los coeficientes son bajos, no significativos, lo que demuestra que los tiempos de concentración no dependen de la duración de las tormentas, es decir las duraciones de las tormentas dependen de variables climáticas. Similares consideraciones son planteadas por Temez (2003) que sostiene que la lluvia asociada a los caudales máximos se refiere al intervalo más intenso de duración igual al tc, pero esa duración no equivale a la duración total de la tormenta ya que solo una fase de la tormenta puede ser suficiente para generar un exceso si el suelo se encuentra saturado.

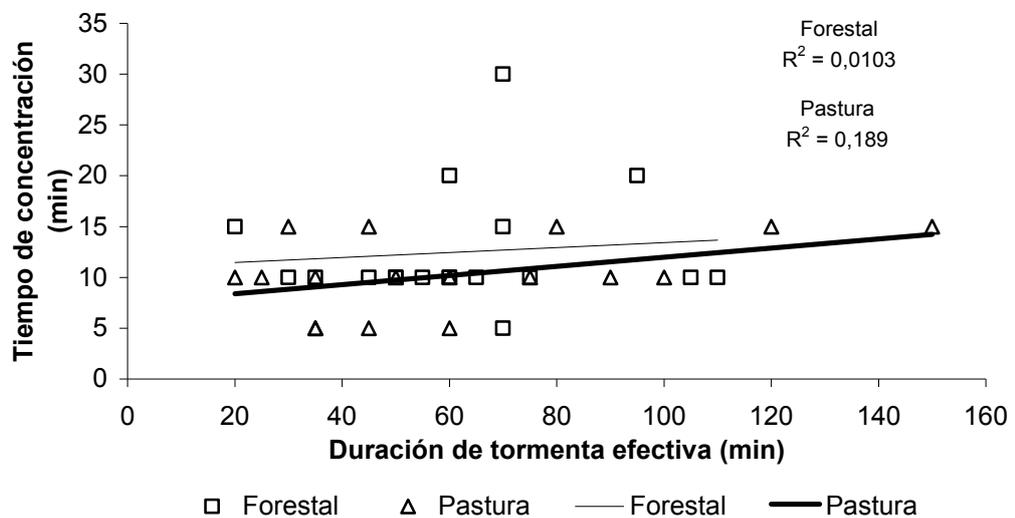


Figura 11.- Duración de las tormentas efectivas con respecto al tc de las microcuencas de La Corona.

3.5 VOLUMEN DE PRECIPITACIÓN Y CAUDAL PICO

En las figuras 12 y 13 se observa la variación tanto de los volúmenes escurridos como de los caudales máximos con respecto al t_c , para las microcuencas de Paysandú (Don Tomás y La Cantera) encontrándose un comportamiento similar en las microcuencas de Tacuarembó (La Corona).

Si bien no todos los valores son significativos, existe una clara tendencia de que los t_c menores se dan con volúmenes mayores y caudales máximos mayores.

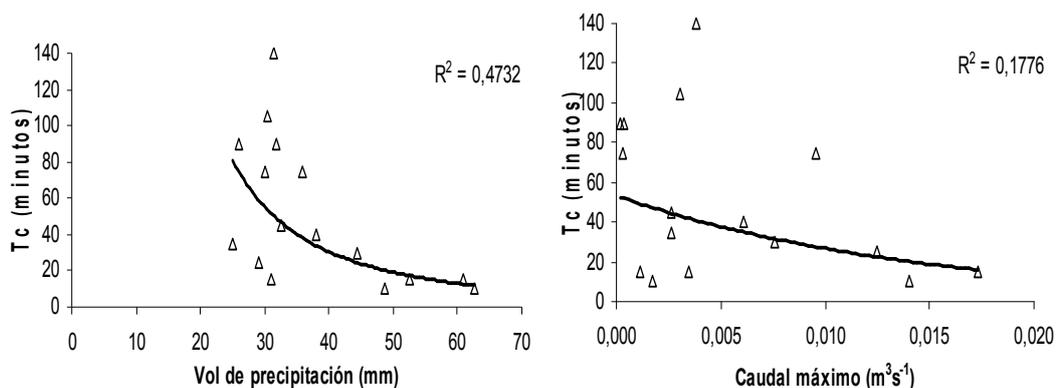


Figura 12.- Volumen de precipitación y caudal máximo microcuenca La Cantera (pastura).

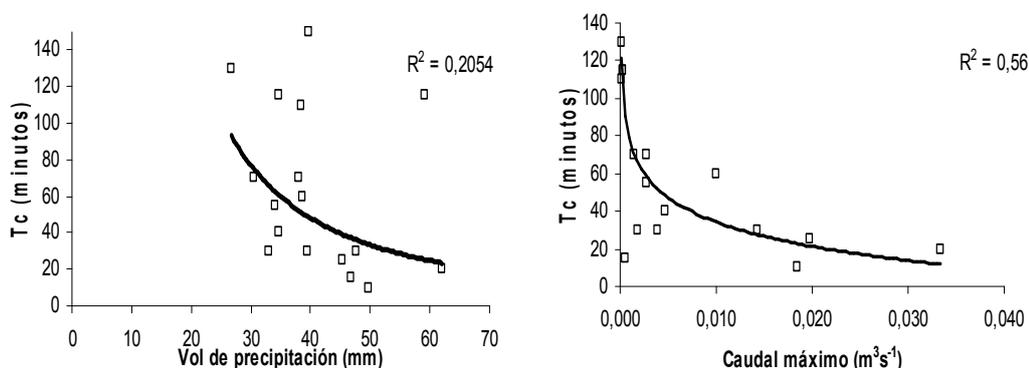


Figura 13.- Volumen de precipitación y caudal máximo microcuenca Don Tomás (forestal)

3.6 ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA

Se hizo un análisis de regresión de los CN estimados en las microcuencas de Tacuarembó. Se observa a nivel muestral diferencias luego de que se plantaron los árboles (figura 14) en la microcuenca forestal con respecto a los de la microcuenca de pastura. Estas diferencias no fueron significativas a nivel estadístico al usar un modelo de heterogeneidad de pendientes de la recta. Este resultado es consistente con lo encontrado en el proyecto FPTA-210 (Silveira et al., 2010).

En las microcuencas de Tacuarembó desde febrero del 2001 a julio del 2003 permanecieron con cobertura de campo natural, en julio del 2003 la microcuenca D2 se plantó con *Pinus taeda*, este cambio de cobertura provoca cambios a nivel muestral en los valores de CN y por consiguiente en las precipitaciones efectivas P_e (figura 15).

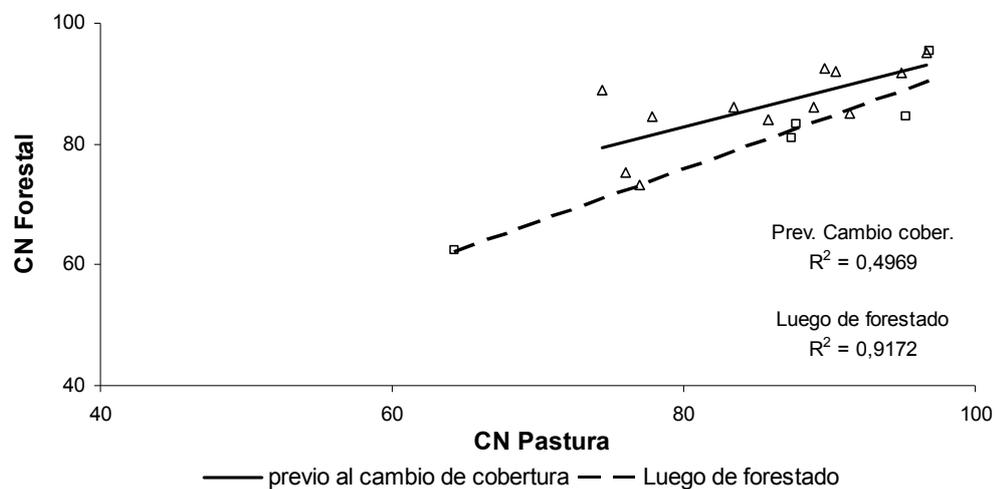


Figura 14- Relación entre el CN de la microcuenca de pastura y la forestal en las microcuencas de Tacuarembó.

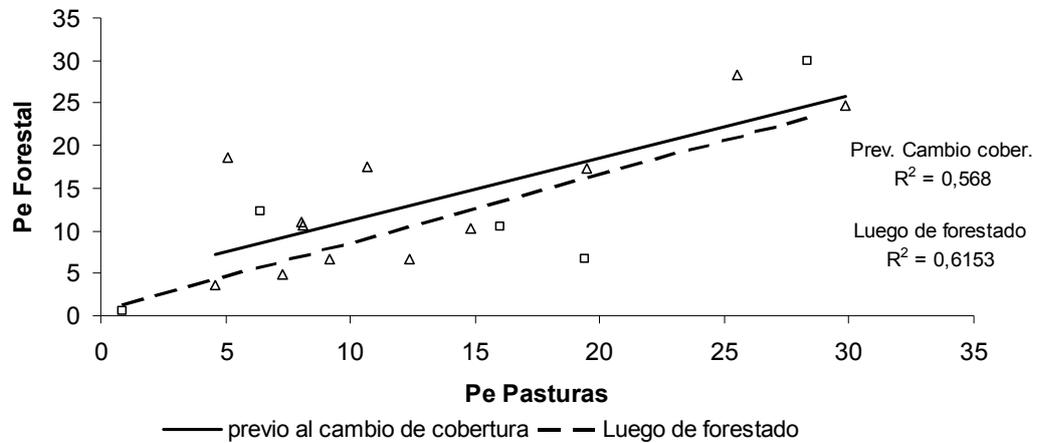


Figura 15- Relación entre la Pe de la microcuenca de pastura y la forestal en las microcuenca de Tacuarembó.

3.7 ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

Se estima el t_c mediante las siete ecuaciones propuestas y se las compara con el t_c observado con respecto al período de retorno, para las microcuencas de pasturas (figura 16) y para las microcuencas forestales (figura 17). Se observa que el t_c disminuye en la medida que aumentamos el período de retorno. Todas las ecuaciones propuestas sobreestiman el t_c tanto par las microcuencas de pasturas como las forestadas.

Las dos ecuaciones que menos sobreestiman son las de Kirpich y California Culverts Practice por que es en esencia la misma ecuación, pero la segunda nombrada es desarrollada para pequeñas cuencas de montaña.

Las ecuaciones de Izzard y Onda Cinemática si bien sobreestiman el t_c , como consideran la intensidad de lluvia y por lo tanto su recurrencia, el resultado es un t_c variable con el período de retorno y para valores altos tienden a una constante similar a los t_c observados.

Las ecuaciones del método de Chow y método del NRCS consideran velocidad de flujo, el método de Chow determina velocidades para diferentes superficies y pendientes en cambio el método del NRCS plantea que la

velocidad varía con la cobertura de suelo, pero para cuencas concentradas como es el caso de nuestras microcuencas, plantea una velocidad promedio en todo el canal, lo que no representa la realidad. El método de Chow plantea que los tiempos de viaje se deben obtener en intervalos de 61m, para lo que se necesita un plano topográfico detallado. En este trabajo se contaba con planos donde las curvas de nivel se encuentran cada 10m, por lo tanto las pendientes entre curvas se consideran constantes y las distancias entre curvas fueron en todos los casos mayores a 61m.

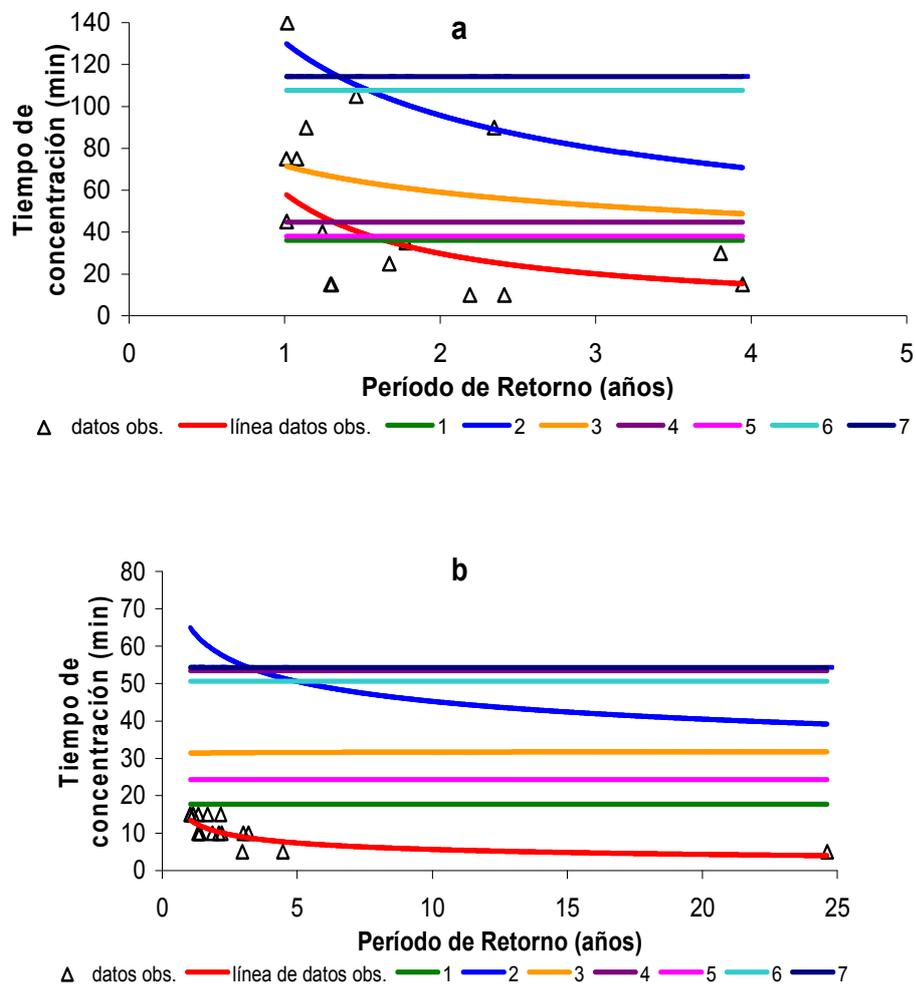


Figura 16.- Relación entre periodos de retorno y tiempos de concentración observados y calculados en las microcuencas de pastura, a- La Cantera, b- La Corona (pastura).

1-Kirpich, 2- Izzard, 3-Ec. Onda cinemática, 4- Método de Chow, 5- California Culverts Practice, 6-Federal Aviation Agency, 7- Método del NRCS .

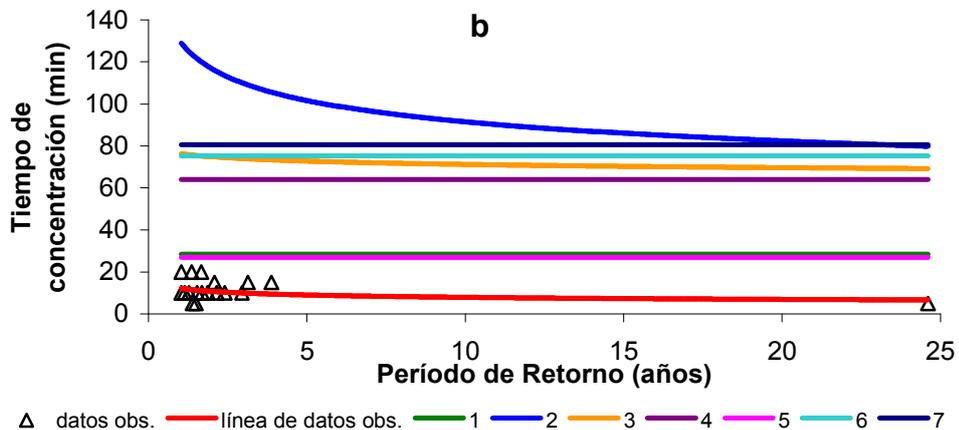
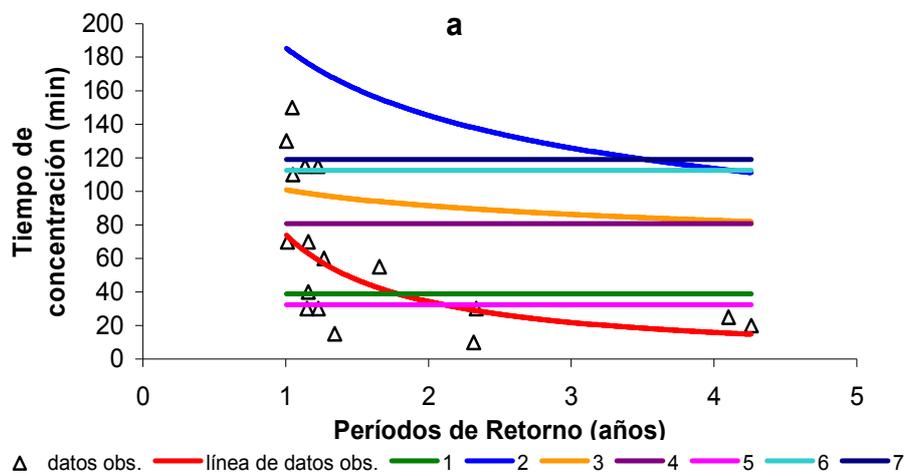


Figura 17.- Relación entre periodos de retorno y tiempos de concentración observados y calculados en las microcuencas forestales, a- Don Tomás, b- La Corona (forestal)

1- Kirpich, 2- Izzard, 3-Ec. Onda cinemática, 4- Método de Chow, 5- California Culverts Practice, 6-Federal Aviation Agency, 7- Método del NRCS -.

La ecuación Federal Aviación Agency sobreestima el tc por encima de todas las ecuaciones ya que no fue desarrollada para cuencas rurales.

Se descartan las siguientes ecuaciones: California Culverts Practice, método de Chow, método del NRCS y Federal Aviación Agency. Las razones por las cuales no se seleccionaron son las siguientes:

- La ecuación de California Culverts Practice fue desarrollada para montaña

- El método de Chow por no contar con planos detallados para obtener las velocidades en intervalos de 61 m.
- El método del NRCS plantea una velocidad promedio para cuencas concentradas.
- La ecuación Federal Aviación Agency fue desarrollada para cuencas urbanas

3.6.1 Ecuaciones seleccionadas para la estimación del tc

Dado los resultados obtenidos para estas microcuencas en que el tc varia en forma directamente proporcional a la rugosidad e inversamente proporcional a la pendiente y la intensidad de lluvia, se eligen para continuar el trabajo, las ecuaciones de Izzard y Onda Cinemática que tienen en cuenta estos parámetros y la ecuación de Kirpich por ser la más usada a nivel nacional e internacional.

La representación gráfica de la relación entre periodos de retorno y tc observados en las microcuencas Don Tomás forestal y La Cantera pastura (figura 18), muestra que el tc disminuye a medida que aumenta el período de retorno, tendiendo hacia un valor asintótico menor al tc calculado por el método de Kirpich a partir de períodos de retorno mayores a 1,5 años. Para esta mismas microcuencas los métodos de Izzard y Onda Cinemática se mantienen para toda la gama de períodos de retorno por encima de los tc observados pero manteniendo la equidistancia.

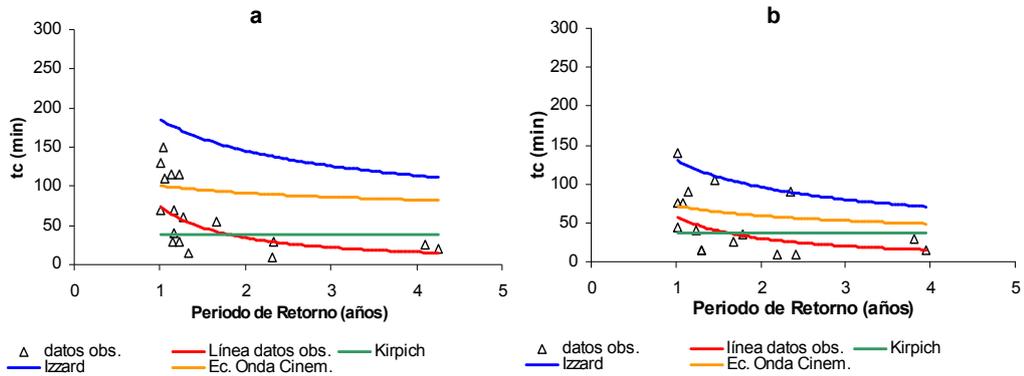


Figura 18.- Relación entre periodos de retorno y tiempos de concentración observados y calculados en las microcuencas a- Don Tomas forestal y b- La Cantera pastura.

En las microcuencas de La Corona forestal y pastura, los estimadores del t_c sobreestiman el t_c observados en todos los periodos de retorno (figura 19).

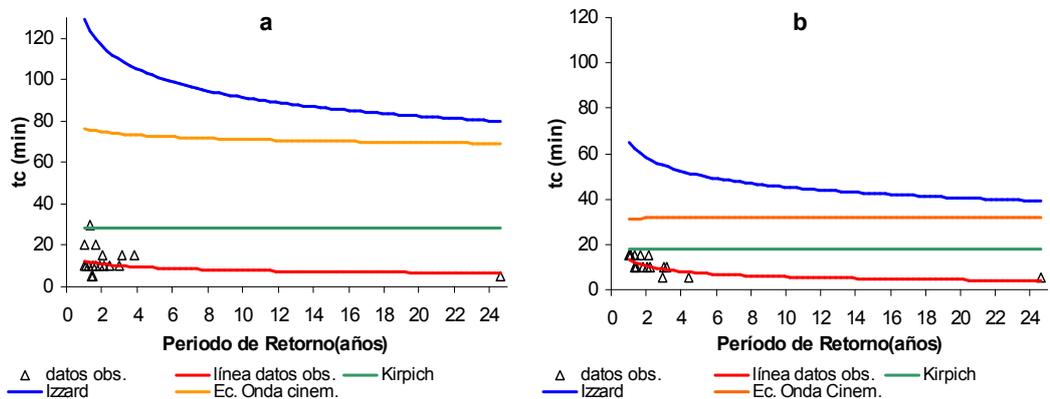


Figura 19.- Relación entre periodos de retorno y tiempos de concentración observados y calculados en las microcuencas a- La Corona forestal y b- pastura

La ecuación de Onda cinemática tiene similar comportamiento a la ecuación de Izzard ya que también considera la intensidad de lluvia, pero no presenta la restricción planteada en Izzard. El otro parámetro que considera la ecuación de Onda Cinemática es el coeficiente de rugosidad de Manning.

El coeficiente de rugosidad es considerado único en esta ecuación y este parámetro es muy variable y depende de un número de factores que están interrelacionados entre si. Los factores que hacen que aumente este valor en

esta investigación son: la rugosidad superficial, la vegetación, irregularidad de la vía de escurrimiento, tamaño y forma de esta vía, nivel y caudal, entre otros (Chow, 1998).

La sobreestimación de los t_c observada en esta ecuación, es inferior a la observada por la ecuación de Izzard (figuras 18 y 19).

3.6.2 Ajuste de las ecuaciones comparadas

Remitirse a resultados del artículo adjunto: “Incidencia de la intensidad de lluvia en el tiempo de concentración de microcuencas del Uruguay”.

4. CONCLUSIONES

El análisis de los tiempos de concentración observados en una serie de eventos registrados en cuatro microcuencas con diferentes usos (plantación forestal – pasturas naturales para uso ganadero) en diferentes regiones del país, muestra que el tiempo de concentración varía en forma directamente proporcional a la rugosidad superficial e inversamente proporcional a la pendiente e intensidad de precipitación y por lo tanto con su período de retorno.

Todas las ecuaciones evaluadas sobreestiman el t_c para períodos de retorno mayores a 1,5 años.

La ecuación de Kirpich (1940) es la que mejor se comporta en la comparación entre los tiempos de concentración observados y los calculados con todas las ecuaciones empíricas. Si bien este método sobreestima los valores, asume un valor constante del tiempo de concentración que se correspondería con los valores asintóticos constantes a los que tienden los valores observados a medida que crece el período de retorno.

Las ecuaciones de Izzard modificada y general estiman un tiempo de concentración no constante, variable con la intensidad de lluvia. La serie de datos nacionales analizados también varían con la intensidad de la lluvia, sin embargo no se obtuvo un ajuste satisfactorio.

No obstante estas observaciones, debe señalarse que los eventos analizados son mayoritariamente de baja recurrencia y en general, para el diseño de obras hidráulicas, se requiere considerar tiempos de concentración entre 15 a 100 años o más, por lo que es recomendable continuar con el programa de monitoreo a efectos de monitorear eventos de

mayor recurrencia, que permitan confirmar las observaciones realizadas en el presente trabajo. Pero para el diseño de obras de infraestructuras agropecuarias, como caminería desagües empastados, cunetas, terrazas; las ecuaciones ajustadas puede ser una buena herramienta para determinar el tc, si bien se necesitan series históricas más prolongadas para validarlas.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Akan AO. 1986. Time of concentration of overland flow. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 112(4): 283-292.
- Akan AO. 1984. Inlet concentration time nomogram for urban basins. Water Resources Bulletin, 20(2): 267-270.
- Bell FC, Om Kar S. 1969. Characteristic response times in design flood estimation, North Holland Publishing Co., Amsterdam. Journal of Hydrology 8: 173-196,
- Ben-Zvi A. 1984. Runoff peaks from two-dimensional laboratory watersheds. In: G.E. Stout and G. H. Davis (Editors), Global Water: Science and Engineering- The Ven Te Chow Memorial Volume. J. Hydrol., 68: 115-139
- Bondelid TR, Mccuen RH, Jackson TJ. 1982. Sensitivity of SCS models to curve number variation. Water Resources Bull. 20(2): 337-349.
- Brown AE, Zhang L, McMahon T, Western A, Vertessy R. 2005. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. Journal of Hydrology, 310: 28-61
- Castiglioni MG, Chagas CI, Massobrio, MJ, Santanatoglia OJ, Buján A. 2006. Análisis de los escurrimientos de una microcuenca de Pampa Ondulada bajo Diferentes sistemas de labranza. CI Suelo Argentina 24 (2): 169-176.

- Custodio E, LLamas MR. 1983. Hidrología Subterránea. Tomo I. Ed. Omega, S.A., Barcelona. 2359 p
- Chescheir GM, Von Stackelberg N O, Amatya DM, Skaggs RW. 2004. Effects of afforestation on the hydrologic behavior of basin in the Tacuarembó River. Progress report for 2003-04. Submitte to Weyerhaeuser Foundation. Raleigh N.C.: North Carolina State University, Department of Biological and Agricultural Engineering. 56 p
- Chescheir GM, Amatya DM, Skaggs RW. 2003. Effects of afforestation on the hydrologic behavior of basin in the Tacuarembó River. Progress report for 2002- 03. Submitte to Weyerhaeuser Foundation. Raleigh N.C.: North Carolina State University, Department of Biological and Agricultural Engineering. 47 p
- Chow VT .1998. Hidráulica de Canales Abiertos. Mc Grow-Hill. Santa Fe, Bogotá. Capítulo 5: 87-125.
- Chow VT, Maidment D, Mays L. 1994. Hidrología aplicada. Mc Grow-Hill. Santa Fe, Bogotá. 584 p.
- Chow VT.1964. Handbook of Applied Hydrology. Mc Grow-Hill. New York.Chapter 14 y 21.
- Darboux F, Gascuel-Odoux C, Davy P. 2002. Effects of surface water storage by soil roughness on overland flow generation. Earth Surface Processes and Landforms, 27: 223-233.
- Dietrich M .2006. Afforestation of grasslands and its effects on the time of concentration.Case of study: two small watersheds in Tacuarembó,

Uruguay, Prethesis, Universidad de la República Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental. 70 p.

Dooge JC. 1973. Linear theory of hidrologyc Systems. Tech. Bull. N°1468. Washington D.C.; USDA-ARS, GPO. 327 p

Eisenbies MH, Aust W, Burger JA, Adams MB. 2007. Forest operations, extreme flooding events, and considerations for hydrologic modeling in the Appalachians – A review. Forest Ecology and Management 242: 77-98.

Ferrer FJ.1993. Recomendaciones para el Cálculo Hidrometeorológico de Avenidas, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid. 76 p.

García PF, Hernández J, Amarante P, Califra A, Delgado S, Salvo L, Hill M. 2004. Efecto de las plantaciones de Pino en Uruguay: Reporte anual de calidad de suelos. Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. pp 45

Genta JL, Failache N. 2007. Monitoreo y disponibilidad de Recursos Hídricos en el Uruguay. Dirección Nacional de Agua y Saneamiento, MVOTMA. 58 p

Genta JL, Charbonnier F, Rodriguez A. 1998. Precipitaciones máximas en el Uruguay. Publicado en las memorias del 2do.Congreso Nacional de la Vialidad Uruguaya, oct. 1998, pp. 301-310.

Grimaldi S, Petroselli A, Nardi F, Tauro F. 2010. Analisi critica dei metodi di stima del tempo di corrivazione. XXXII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche. Palermo Italia. pp 312-322

- Gupta RS. 1989. Hydrology and Hydraulic Systems, Prentice- Hall, Englewood Cliffs, NJ. 890 p
- Hjelmfelt AT JR. 1978. Influence of infiltration on overland flow. Journal of Hydrology, 36(1/2): 179-185.
- Hotchkiss RH, Callum BE.1995. Peak discharge for small agricultural watersheds, Journal of Hydraulic Engineering., 121(1): 36-48
- Kuichling E. 1889. The relation between the rainfall and the discharge of sewers in populous districts. Transactions – ASCE. 20:1-56
- Li MH, Chibber P. 2008. Overland flow time of concentration on very flat terrains. Journal of the Transportation Research Board. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C. 2060: 133-140.
- LLamas J. 1993, Hidrología general, principios y aplicaciones, Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco, Bilbao. 635p
- LLoyd-Davis DE. 1906. The elimination of Store-Water from Sewerage Systems. Institute of Civil Engineers. 64: 41-67
- MC Cuen RH, 2009. Uncertainty Analyses of Watershed Time Parameters. Journal of hydraulic Engineering, 14. (5): 490-498.
- MC Cuen RH, Wong SL, Rawls WJ. 1984. Estimating urban time of concentración. Journal of hydraulic Engineering. 110. (7): 887-904.
- Molfino JH. 2000. Proyecto de instalación de cuencas experimentales para el estudio de efectos del establecimiento de áreas forestales con pino en

Uruguay. Soil Science. Departamento de Tacuarembó, Colonvade S.A., Uruguay 56p.

Musy A, Laglaine V. 1992. Hidrologie Générale. Suisse. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Département de Génie Rural. Institut d'Aménagement des Terres et des Eaux. 480p

MVOTMA. DINAGUA (Ministerio de Vivienda Ordenamiento territorial y Medio Ambiente. Dirección Nacional de Aguas, uy). 2009. Plan Nacional de Gestión Integrada de Recursos Hídricos en el Uruguay (en línea). Montevideo 90 p. Consultado jun. 2012. Disponible en <http://www.mvotma.gub.uy/biblioteca/documentos-de-agua/item/10002981>

Orosolini HE, Zimmermann ED, Basile PA. 2000. Hidrologia procesos y métodos. Universidad Nacional de Rosario Ed. Rep. Argentina. 319 p

Pilgrim DH. 1977. Isochrones of travel time and distribution of flood storage from a tracer study on a small watershed, Water Resources Research., 13(3): 587-595

Pilgrim DH. 1966. Radioactive tracing of storm runoff on a small catchment: I. experimental technique, North-Holland Publishing Co., Amsterdam. Journal of Hydrology 4: 306-326

Refsgaard JC, Knunudsen J. 1996. Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. Water Resources. Res., 32(7): 2187-2202.

Sheridan JM. 1994. Hydrograph time parameters for flatland watersheds. American Society of Agricultural Engineers. 37(1): 103-113

- Silveira L, Chreties Ch, Alonso J, Amorín C, De Izaguirre P, Crisci M, Symonds S, Martínez L, García M, García F, Delgado S, Clérici C, Bentancor L, Hill M, Alliaume F, Cabral P, Audicio P, Iroumé A, Huber A, Schipilov A. 2010. Efectos de la actividad forestal sobre los recursos suelos y aguas. Serie: INIA, FPTA N° 32. 37 p
- Silveira L, Alonso J, Martinez L. 2006. Efecto de las plantaciones forestales sobre el recurso agua en el Uruguay. *Agrociencia* X, (2): 75-93.
- Silveira L, Genta JL, Charbonnier F, Failache N, Alonso J. 2000. Directivas de diseño Hidrológico – Hidráulico de alcantarillas. Proyecto CSIC Vinculación con el Sector Productivo y Convenio Udelar – MTOP Dirección de Vialidad. Montevideo. pp 88
- Singh VP. 1976. Derivation of time of concentration. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam. *Journal of Hydrology* 30: 147-165
- Snyder FF. 1958. Synthetic flood Frequency. *Journal of Hydraulics Division., Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, 84: 1808-1- 22.
- Témez JR. 2003. Facetas del cálculo hidrometeorológico y estadístico de máximos caudales. *Rev. Obras Públicas*. 430 (3): 47-51.
- Troendle CA. 1985. Variable source area models, en ANDERSON, M.G. y BURT, T.P., *Hydrological Forecasting*, John Wiley & Sons, Baffins Lane., 12: 347-403
- Tucci, C. 2000. *Hidrología, Ciência e aplicação*. Ed Universidade UFGS e EDUSP ABRH. Porto Alegre. 952 p.

USDA NRCS (US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service) 2007. National Engineering Handbook. Washington, D.C Chapter 16 Hydrographs. Part 630. 50 p

Viessman W, Knapp J W, Lewis G. I. 1989. Introduction of hidrology, Third Ed., Harper and Row, Inc., New York, N.Y. pp 704

Wong TSW. 2005. Assessment of Time of Concentration Formulas for Overland Flow. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE. 131 (4): 383-387