

**Obras Hidráulicas  
Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional de Misiones  
Oberá-Misiones**

# **Hidrología en Medios Antropizados**

**Dr. Ing. Darío Tomás Rodríguez**

**2023**

# Definiciones

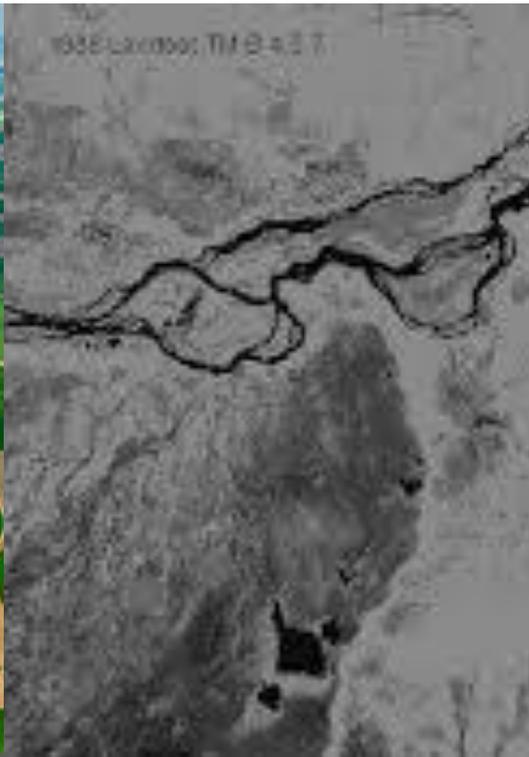
Hidrológicamente, los ambientes urbanos y rurales se enmarcan dentro de la **Hidrología de Medios Antropizados**. Si bien pueden presentar marcadas diferencias, el impacto hidrológico producido por la urbanización y la producción, presentan características similares, aunque en escalas y magnitudes diferentes.

Un **paisaje antrópico** es aquel creado o transformado por la mano del hombre.



Si bien la urbanización es, en general, la forma más severa y puntual de modificar la hidrología de las cuencas, no es la única.

Las zonas productivas y obras de gestión de los recursos hídricos pueden afectar grandes territorios, provocando impactos negativos significativamente peores a los de la urbanización.





Pudiendo existir otros tipos de escenarios, de lo más variado.

Algunos nunca antes vistos por el ser humano.

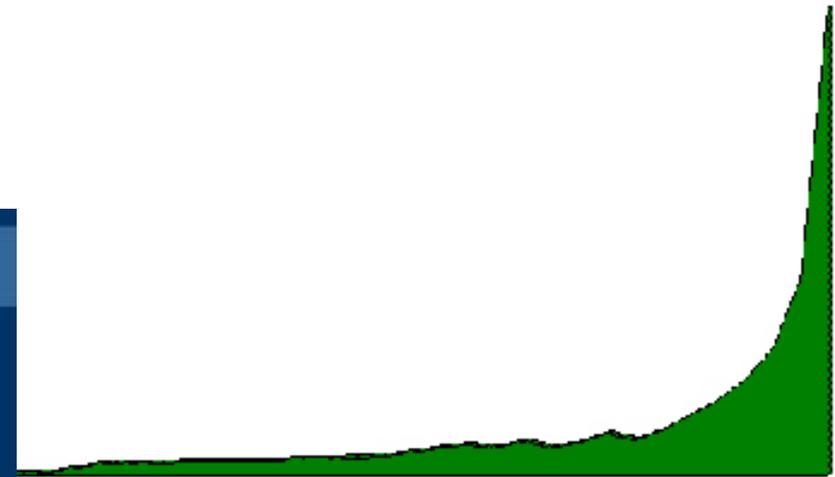


# Crecimiento de la población mundial

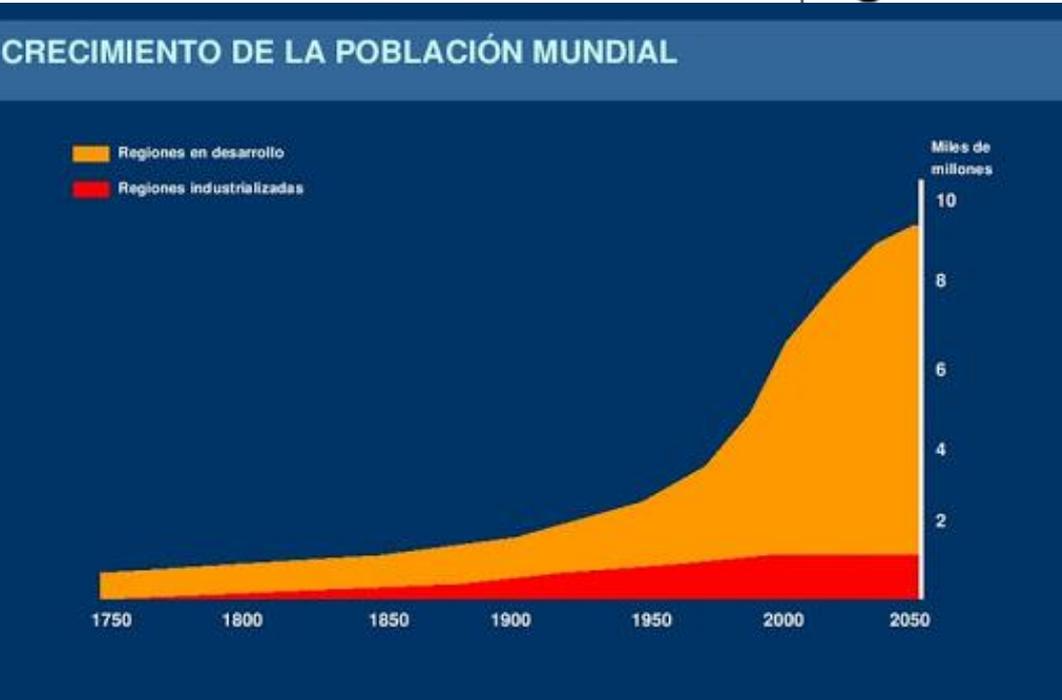
En promedio, cada vez se necesita la mitad del tiempo para llegar al doble de población.

## Crecimiento de la población mundial

ón total



de el año 10.000 a.C. hasta el 2000 d.C



Fuente: Atlas de Le Monde Diplomatique. Datos referidos a 2000. Elaboración propia  
Departamento de Urbanismo y Ordenación del Territorio (DUyOT), Ratsel Córdoba Hernández

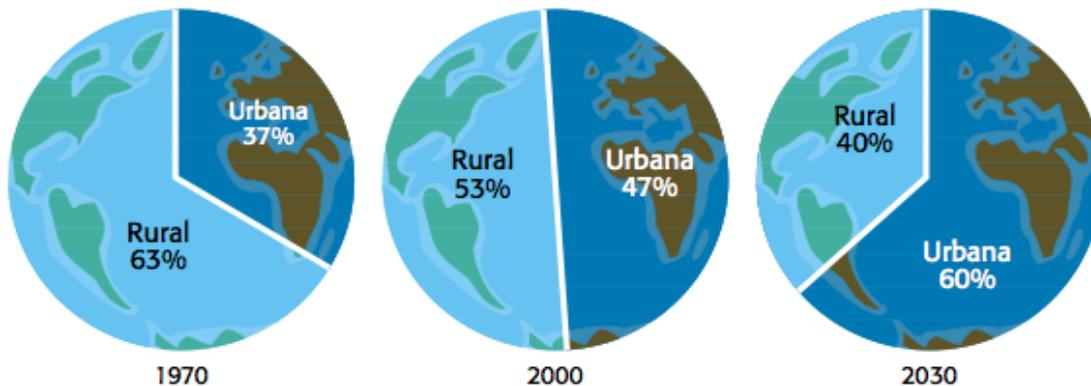
El aumento de población demanda mayores recursos (particularmente de alimentos y agua)

# Crecimiento de la población urbana

## Población urbana mundial

- Inicios del siglo XIX: 3%.
- Inicios del siglo XX: 13%.
- Año 2008: 50%.
- Año 2030: 60%.
- Año 2050: 70%.

**GRÁFICO 6** DISTRIBUCIÓN POBLACIONAL MUNDIAL — URBANA Y RURAL (1970, 2000 Y 2030)



Fuente: UN-HABITAT.

## Población urbana Latinoamérica

- Inicios del siglo XXI: 77%.

## Población urbana Argentina

- Censo 2010: 89%.

## Población urbana Misiones

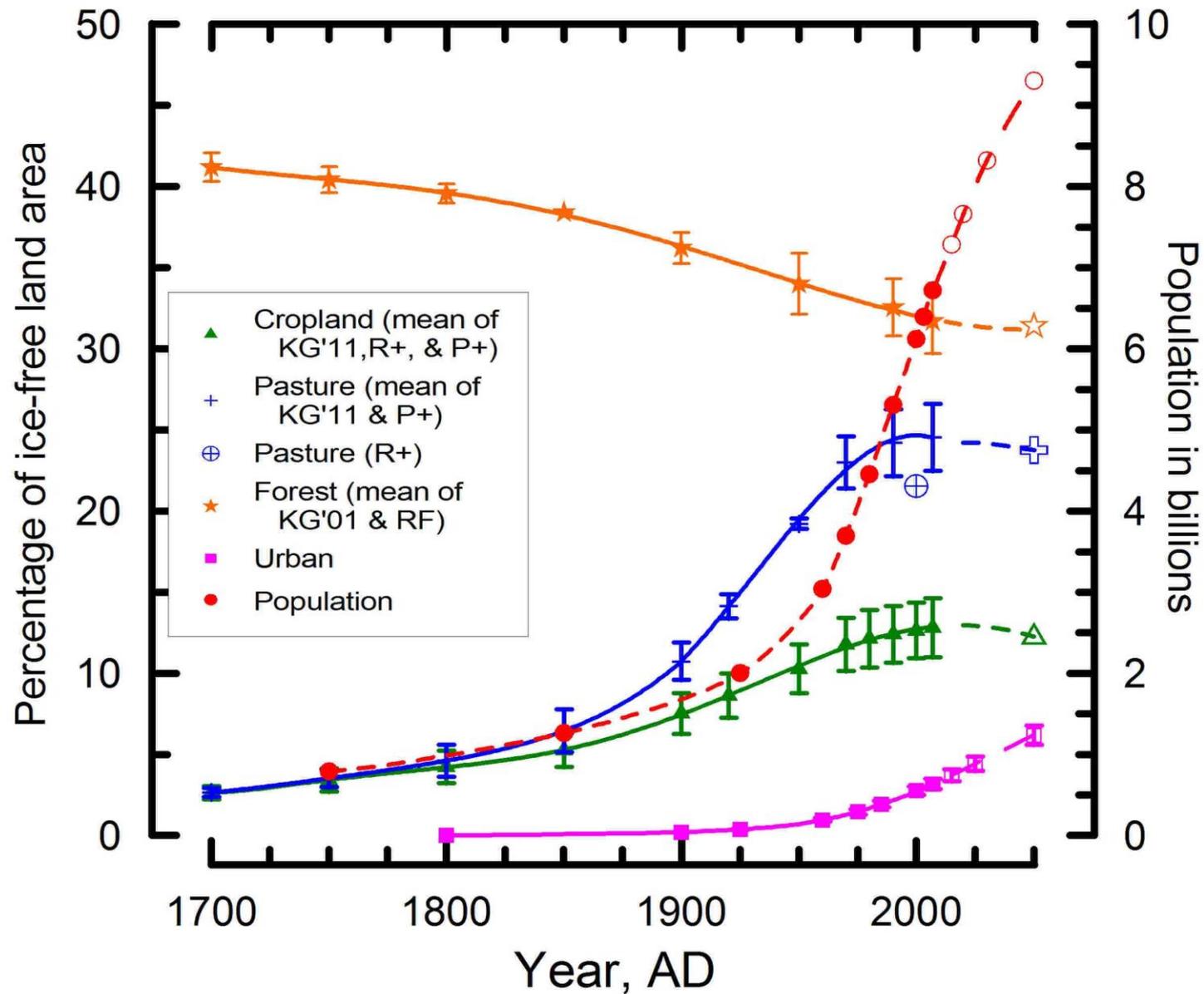
Censo 2010: 74%.

## Población urbana Oberá

- Censo 2001: 93%.

Si el crecimiento de las poblaciones no es planificado genera innumerables problemas de hidroambientales.

Cambios de algunos usos del suelo a lo largo del tiempo,  
con su extrapolación a 2050.



## ▪ Ciclo hidrológico en ambientes antropizados

Las características hidroclimáticas tienen una **consecuencia significativa sobre la planificación y desarrollo** de los ambientes rurales y urbanos.

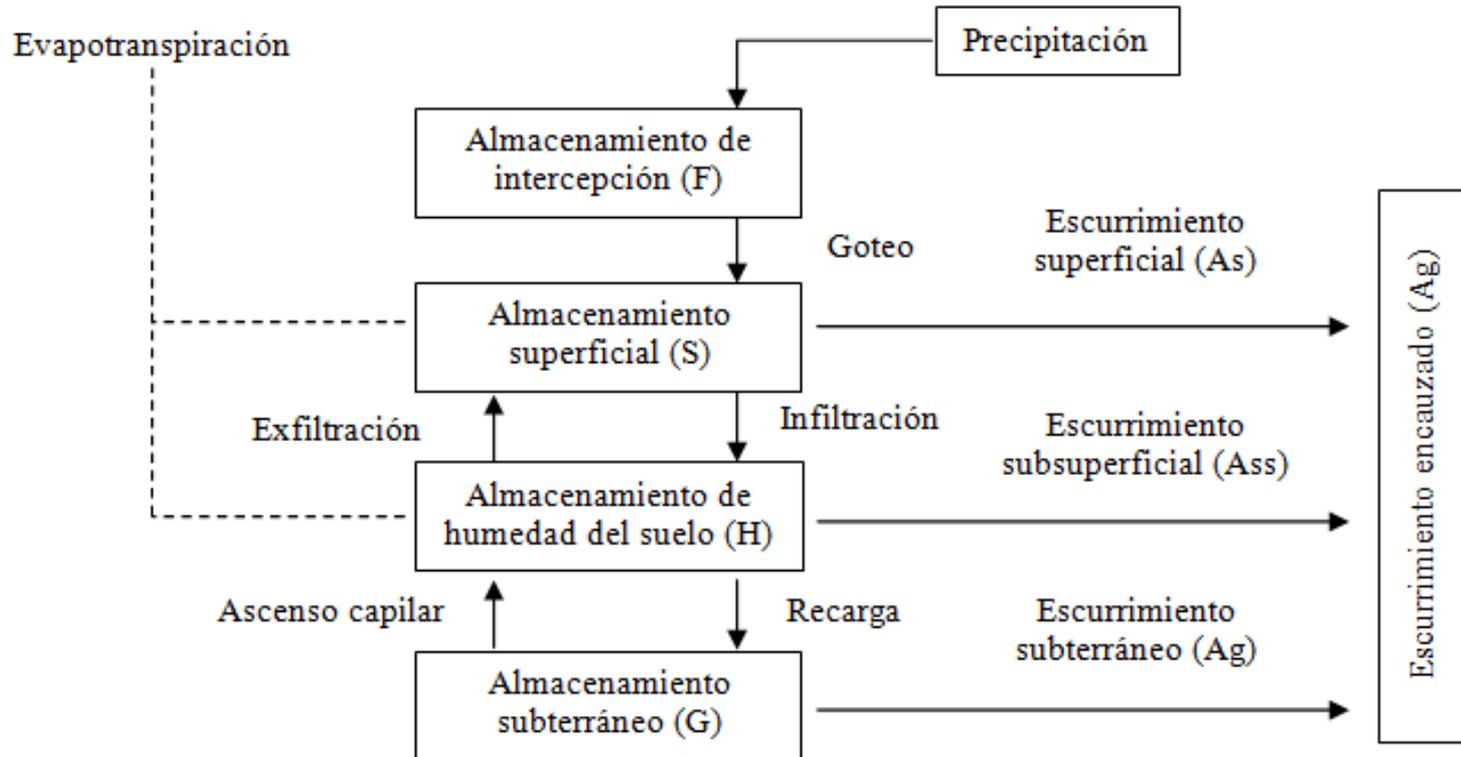
La fuerte tendencia de la población mundial a **concentrarse en zonas urbanas y aumentar las áreas productivas**, ha producido perturbaciones sobre el ciclo del agua, además de **cambios climáticos transitorios y permanentes** a diversas escalas que se traducen en alteraciones en los procesos naturales que afectan dichas zonas.

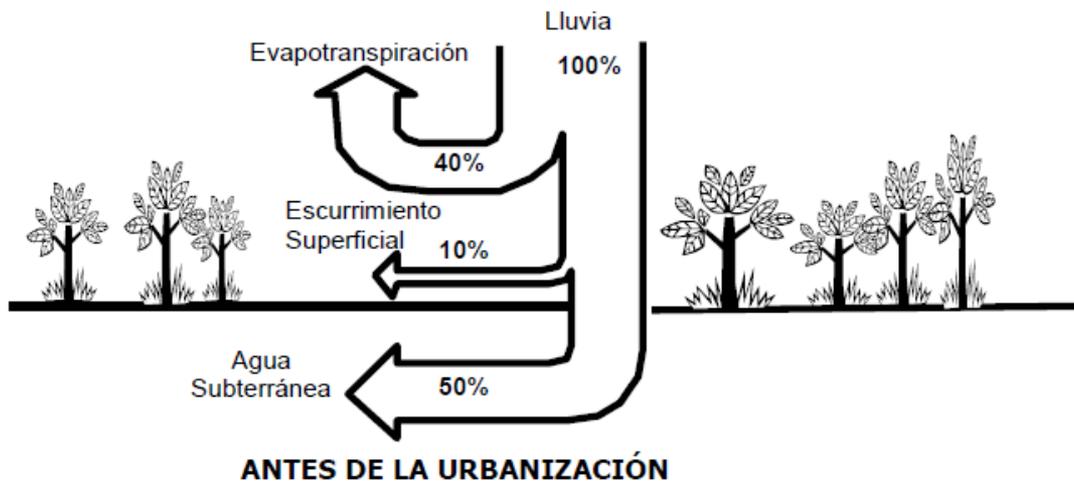
Por lo dicho, cobra importancia para la **correcta gestión de los recursos hídricos**, no solo la comprensión de las respuestas del sistema a corto plazo (tormentas), sino también a mediano y largo plazo (ciclo hidrológico), como pueden ser los procesos de **contaminación y de erosión** en el sistema.

## ▪ Balance de agua

Los estudios de balance de agua son esencialmente el punto de arranque de un análisis del sistema hidrológico de cualquier región,

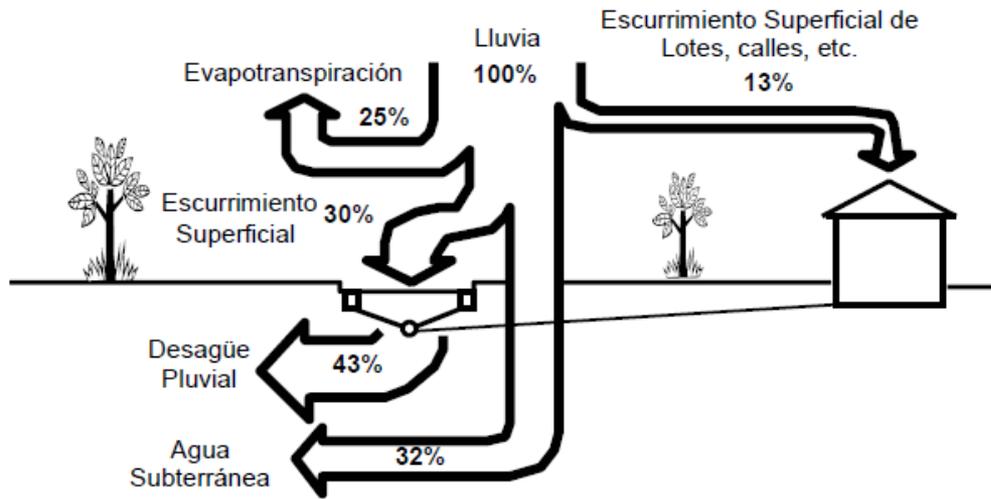
Representan una apreciación global del flujo de agua dentro de un sistema por los múltiples caminos posibles y otorga una importancia relativa de los distintos parámetros del ciclo.





ANTES DE LA URBANIZACIÓN

- Balance de agua en regiones urbanas

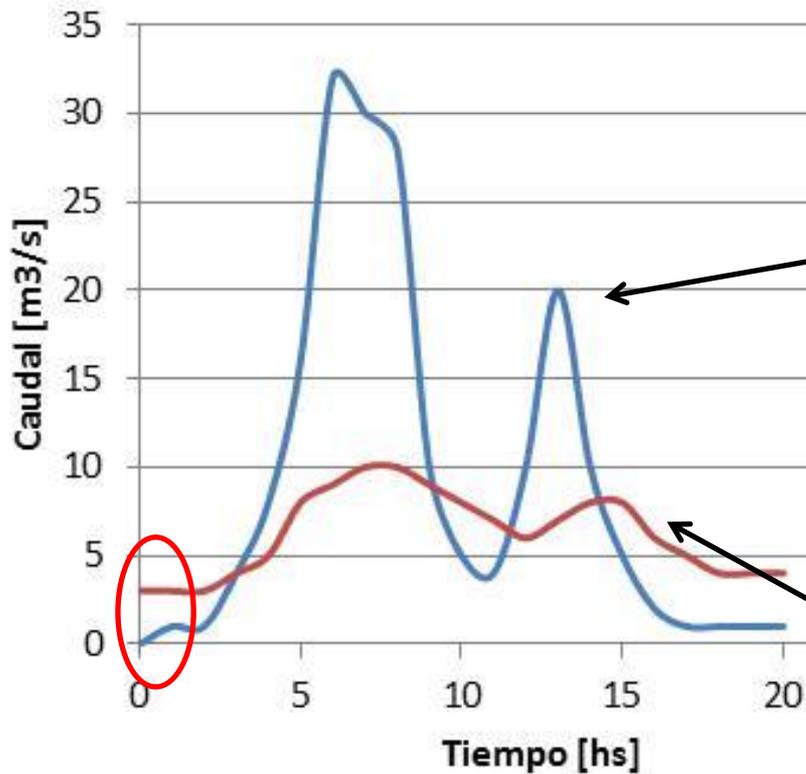


DESPUÉS DE LA URBANIZACIÓN

Las edificaciones de la urbanización, sumada a la eliminación de la cobertura vegetal y a la generación de superficies impermeables, **reducen los volúmenes de pérdidas** al escurrimiento superficial generando un **mayor volumen a erogar** por las cuencas.

## Balance de agua en regiones rurales

En áreas productivas, por lo general, existe una intervención menos violenta sobre el medio ambiente pero de **mayor extensión territorial**, provocando fenómenos similares a los de la urbanización o peores.



## ▪ Incorporación de cambio climático en la gestión de los recursos

Actualmente, diversos autores a nivel mundial creen indispensable incorporar a la gestión de los recursos hídricos consideraciones sobre el Cambio Climático (CC).

Según el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC (2014), citado por Garat (2017), el CC puede ser definido como *“el aumento gradual de la temperatura superficial global, como una de las consecuencias del forzamiento radiactivo causado por las emisiones antropogénicas”*.

Basados en numerosas observaciones y proyecciones de modelos climáticos, reportes del IPCC prevén un **incremento de las precipitaciones extremas** asociadas al calentamiento global.

Vaticinan una tendencia en aumento del número de episodios de **precipitación intensa** a corto y largo plazo, previendo incrementos de la intensidad y frecuencia de las precipitaciones en la mayoría de las **masas continentales de latitudes medias**. 

Misiones

## ▪ Abstracciones iniciales al escurrimiento

La **intercepción vegetales** la primera etapa de almacenamiento y tiene relación con la altura de los arboles. Pero guarda relación mas directa con la **densidad el follaje**.



En cuanto al **almacenamiento superficial en depresiones**, valores típicos señalados por la bibliografía para pendientes moderadas son:

- 1.25 – 2.5mm para superficies impermeables (pavimentos, techos...)
- 2.5 – 5.1mm para césped
- 5.1 y 7.5mm para pasturas y bosques respectivamente

Para pendientes más empinadas serán menores (Riccardi, 2004).

Se observa claramente como los ambientes **antropizados tienden a reducir** la capacidad de abstracciones iniciales.

## ▪ Infiltración

Las formulaciones de infiltración deducidas regularmente para cuencas rurales, con poca urbanización, son **plenamente utilizables** en las zonas permeables de las cuencas urbanizadas.

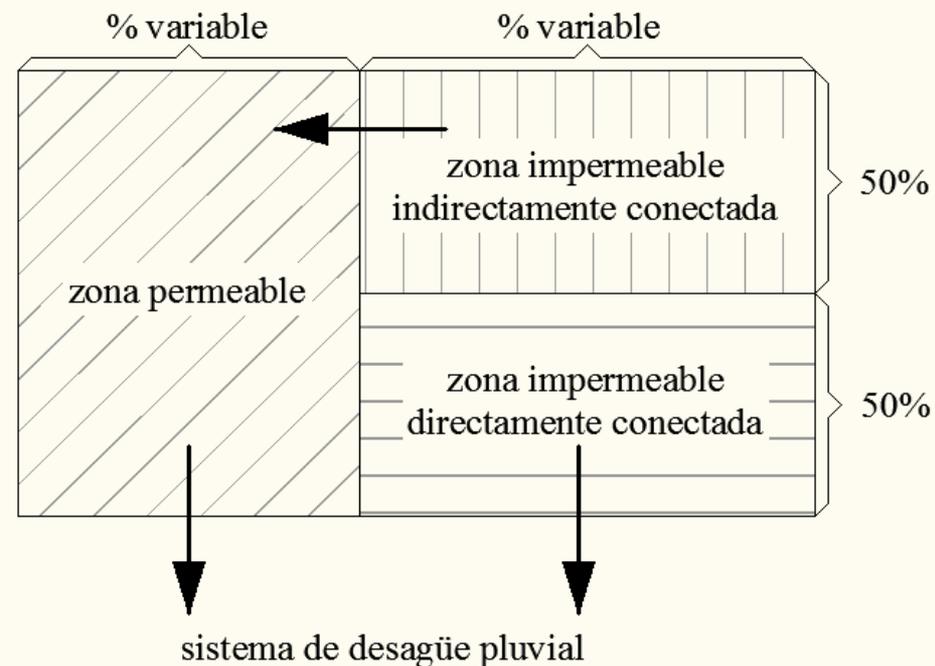
Sin embargo, en ambientes urbanos se deben considerar además, las **áreas impermeables**, dado que existen mayores superficies construidas.

En una cuenca antropizada se presenta generalmente una **combinación de superficies permeables e impermeables**, donde es posible **discretizar en subcuencas con mecanismos de escurrimiento superficial diferentes**.

Una discretización simple que se puede realizar en las cuencas urbanas consiste en subdividir el área total en dos fracciones, aéreas permeables e impermeables. A su vez, esta última puede ser discriminada en **directa o indirectamente conectada**.

Área permeable (AP):  
parques, jardines, reservas naturales, etc.

Área impermeable (AI):  
A su vez puede dividirse en:



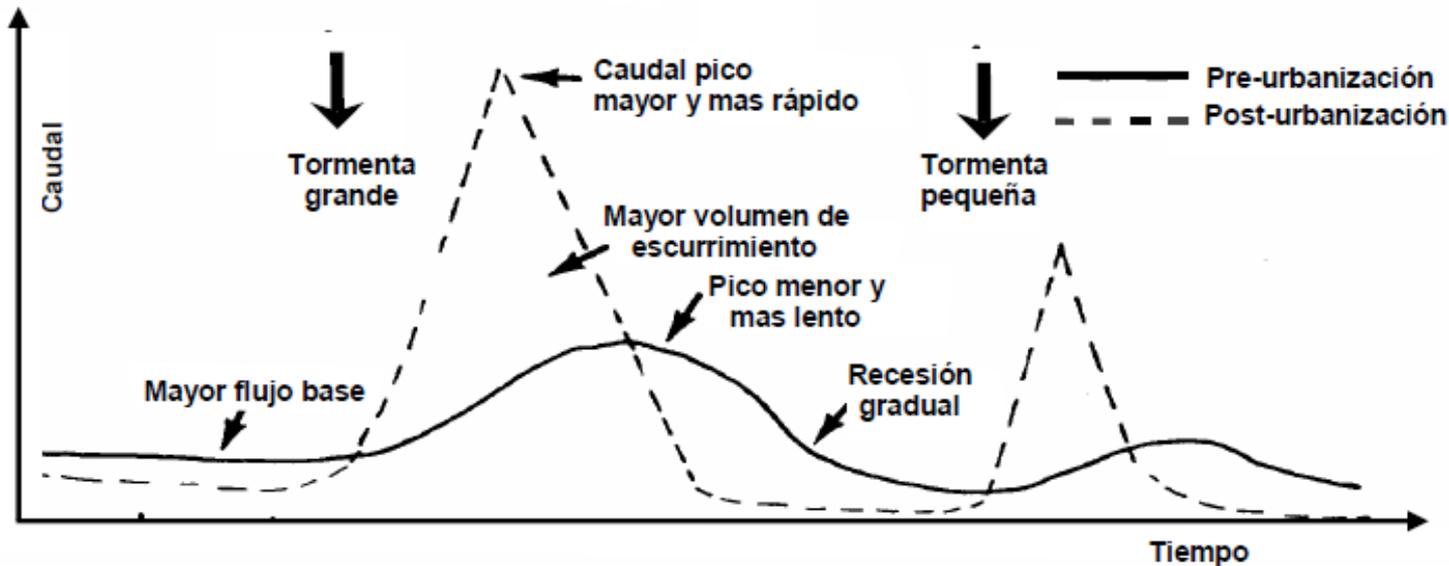
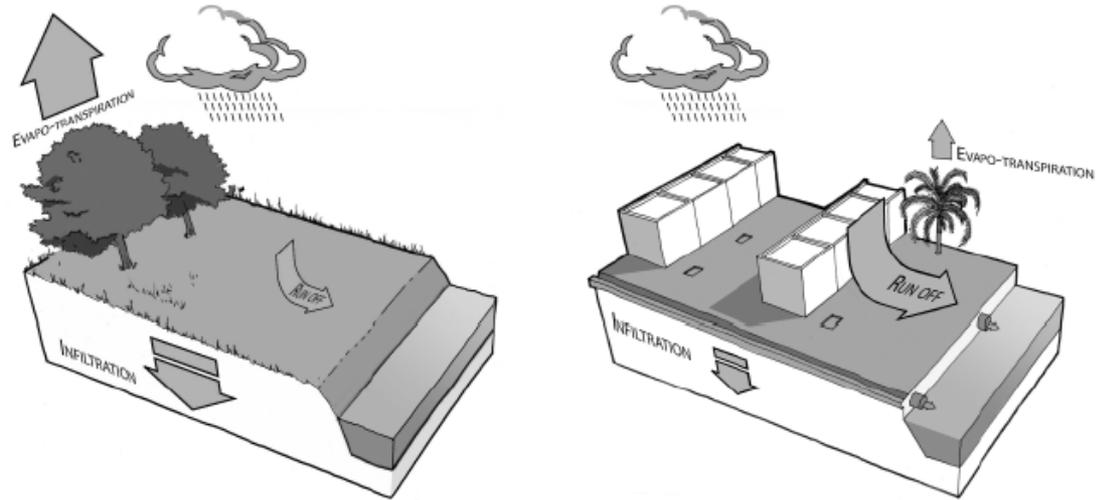
Área impermeable **directamente** conectada (DC): áreas que desaguan sus excedentes pluviales directamente a una red de drenaje, **sin presentar pérdidas** entre la superficie de contacto con la lluvia y el punto de control de la cuenca (calles, estacionamientos pavimentados, techos y pisos impermeables **conectados al sistema de desagüe pluvial**)

Área impermeable **indirectamente** conectada (IC): superficies impermeables, pero sus excedentes son **evacuados hacia áreas permeables donde una fracción de ellos pueden infiltrar** y la fracción restante escurrir superficialmente.

## Transformación precipitación-escurrimiento

La antropización reduce los volúmenes de pérdidas al escurrimiento superficial generando un **mayor volumen a erogar** por las cuencas.

Como consecuencia, los **caudales** del hidrograma de respuesta se ven **incrementados**.



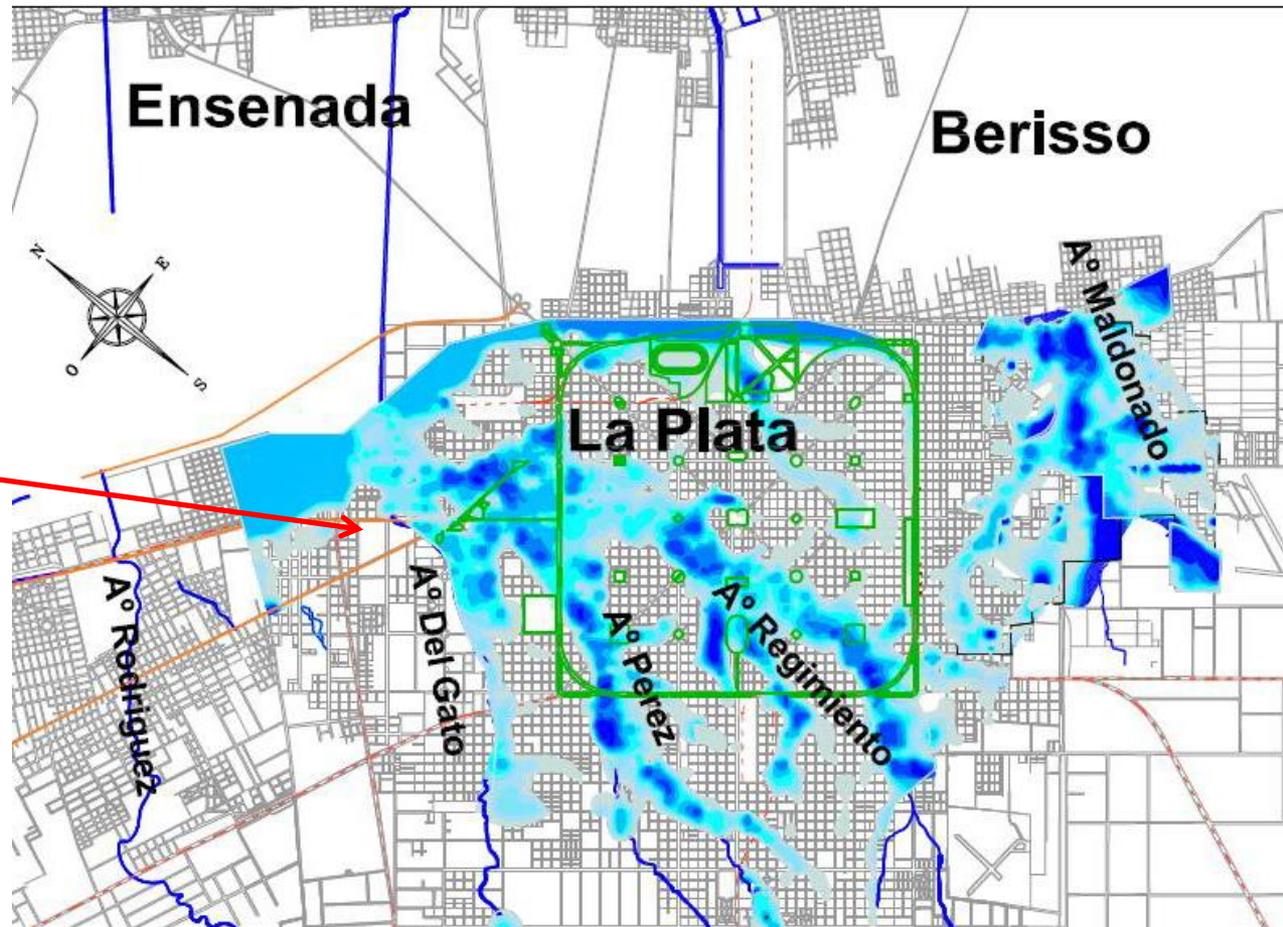
## Transformación precipitación-escorrentía

Generalmente las inundaciones urbanas son vistas como locales porque involucran cuencas pequeñas ( $< 10.000\text{Ha}$ , y muy frecuentemente micro cuencas  $< 1.000\text{Ha}$ ).

Inundación ciudad de la **La Plata** año 2013.

**89 muertos** según el fallo judicial

Superficie cuenca Arroyo Del Gato **12.400Ha**



## ▪ Dinámica del escurrimiento superficial en zonas antropizadas

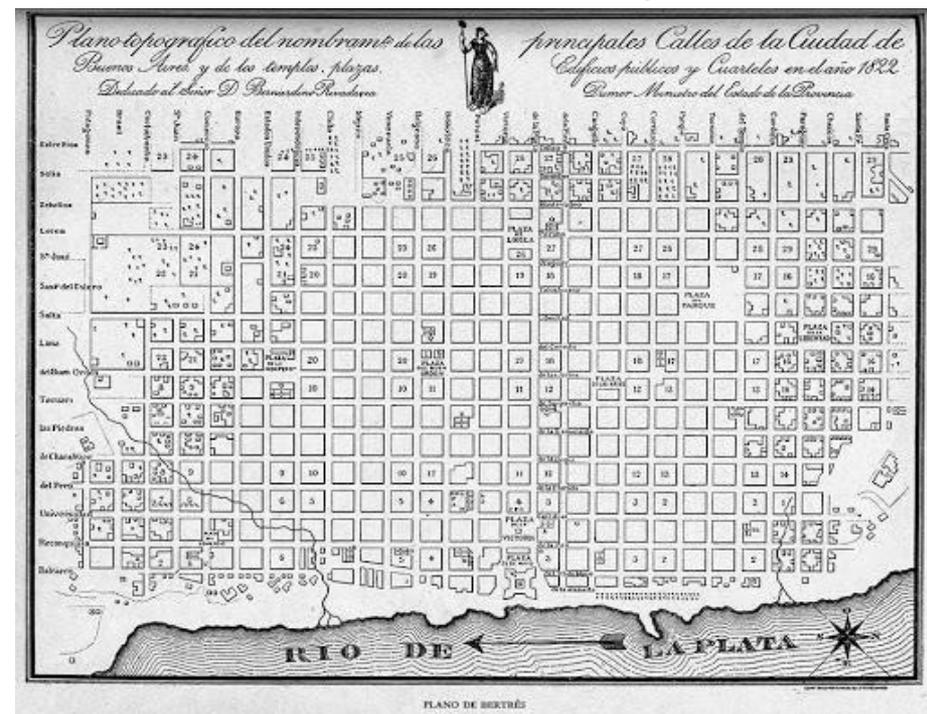
**Sistema menor o Microdrenaje:** es la fracción del sistema de desagüe pluvial que colecta, almacena y transporta los excedentes hídricos superficiales desencadenados por lluvias de frecuencia ordinaria (de 2 a 10 años de recurrencia), aliviando los inconvenientes ocasionados por tormentas frecuentes.

El microdrenaje incluye cunetas, cordones cunetas, badenes, zanjias, bocas de tormenta, captaciones de zanjias, conductos y galerías subterráneos, pequeños canales y reservorios, alcantarillas y estaciones de bombeo, entre otras.



Un elemento **importante** del microdrenaje son las **calles**. Son las que delimitan las cuencas y condicionan el microdrenaje en áreas antropizadas.

Además de permitir el movimiento del tránsito, las mismas reciben el flujo de agua desde los lotes y las mismas calles, conduciéndolos hasta las bocas de tormentas o al sistema mayor de desagüe.



Una adecuada planificación de las calles contribuye a **reducir** las dimensiones y en ocasiones **eliminar** la necesidad de sistemas de conductos en zonas recientemente urbanizadas (Riccardi, 2004).

En áreas productivas son los **caminos, plantaciones y otras estructuras** (hidráulicas y edilicias) las que condicionan el escurrimiento alterando la dinámica natural del sistema.



- Dinámica del escurrimiento superficial en zonas antropizadas

**Sistema mayor o Macrodrenaje:** Mientras que en el microdrenaje el flujo suele no ser bien definido y estar determinado por la ocupación y usos del suelo, el macrodrenaje suele presentarse **bien definido** coincidente con el **camino natural de las aguas**.



El macro drenaje **existirá y funcionara siempre**, haya o no sido planificado adecuadamente para transportar el escurrimiento, colectando, almacenando y transportando el escurrimiento que excede la capacidad del microdrenaje (Riccardi, 2004).

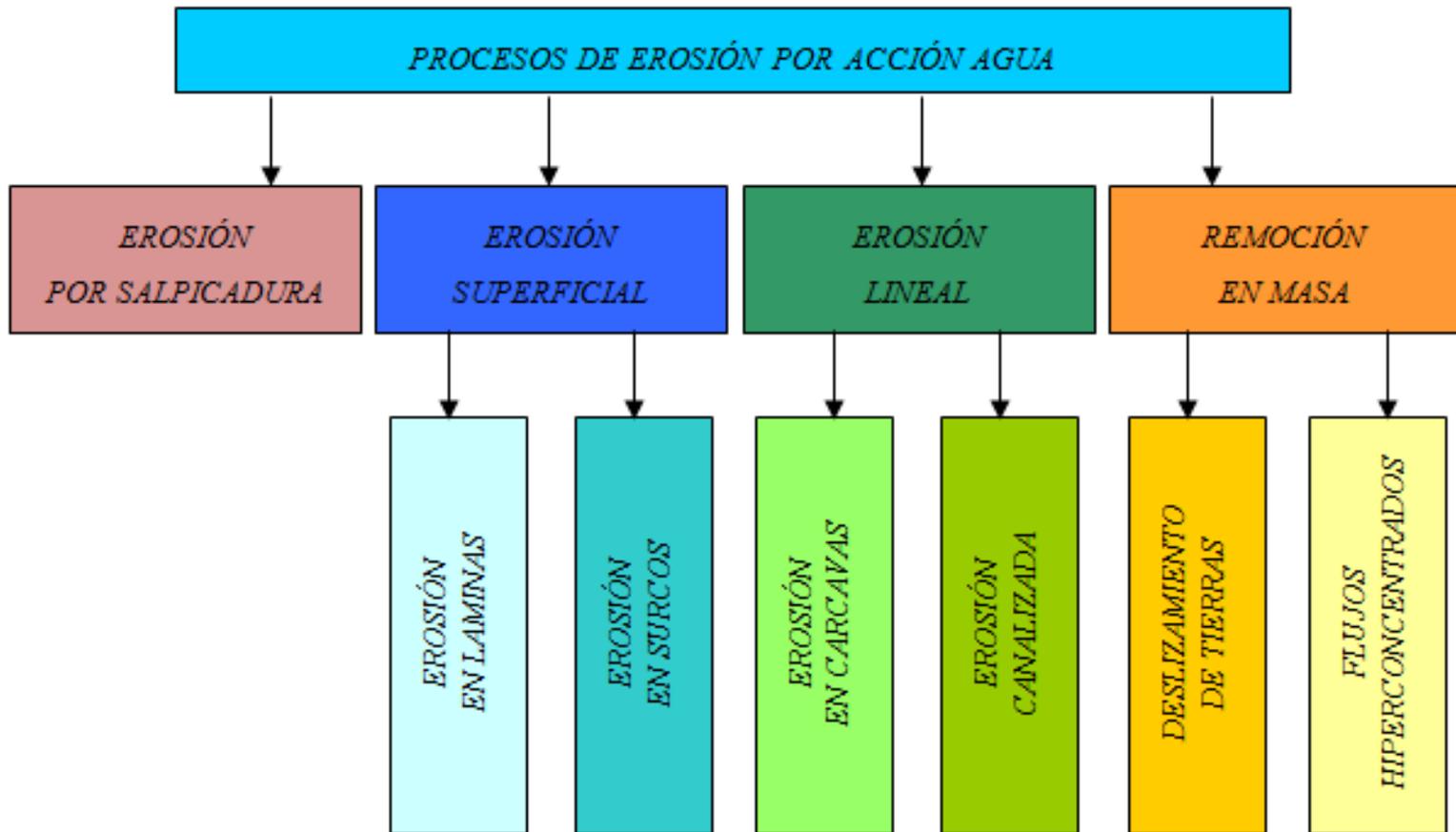
Comodoro  
Rivadavia  
2017



## ▪ Mecanismo de erosión hídrica

Los procesos de erosión no se producen de manera aisladas, son parte de un **complejo y continuo proceso** de remoción, transporte y deposición de partículas de suelo.

En un enfoque general los procesos de erosión hídrica pueden englobarse en



## ▪ Factores que afectan la erosión

- Clima
- Relieve
- Características del suelo
- Características del flujo
- Ocupación y usos del suelo
- Practicas de conservación

Máxima agua caída en 5 minutos [mm/h]	Número de tormentas	Erosión por tormenta [t/Ha]	Erosión total [t/Ha]
0 - 25.4	40	3.7	148
25.5 - 50.8	61	6	366
50.9 - 76.2	40	11.8	472
76.3 - 101.6	19	11.4	216.6
101.7 - 127.0	13	34.2	444.6
127.1 - 152.4	4	36.3	145.2
151.5 - 177.8	5	38.7	193.5
177.9 - 254.0	1	47.9	47.9

### Clima

A pesar de que la intensidad de la tormenta presenta relación directa con la erosión producida, **son las tormentas de intensidad intermedia las que, a largo plazo, producen la mayor cantidad de pérdida de suelo**, debido a una combinación entre período de retorno y erosión unitaria

## ▪ Factores que afectan la erosión

### Relieve

El principal factor asociado al relieve que influyente en la erosión hídrica es la **pendiente** topográfica, pero no es el único.

La **longitud en la que se desarrolla la pendiente**, es también otro factor que define la erosión en una ladera. Una superficie de escurrimiento extensa **concentra mayor cantidad de excedentes** hídricos superficiales, aumentando las velocidades y caudales, elevando la **capacidad de arrastre de la corriente**.



## ▪ Factores que afectan la erosión

### Características del suelo

Las características del suelo tienen una **doble influencia**. Por un lado, condicionan la **tasa de infiltración**, repercutiendo en la generación de excedentes hídricos superficiales, y por otro lado establecen la **vulnerabilidad a la erosión del suelo**.

Quizá la discretización más importante respecto a las características del suelo, es determinar si se trata de un suelo **cohesivo o no**. En los suelos no cohesivos (**arenas**), su capacidad para oponerse al desmenuzamiento y transporte está gobernada por fuerzas gravitacionales, **más precisamente su peso**. En cambio en suelos cohesivos (**limos y arcillas**), las fuerzas que lo rigen son de carácter **electro-químicas**, las cuales están presentes en la superficie de las partículas más finas.



## ■ Factores que afectan la erosión

### Características del flujo

La **velocidad del flujo influye fuertemente** en la capacidad de erosión del escurrimiento superficial (García-Chevesich, 2008) y posee **relación directa con la topografía** en la que se desarrolla.

La potencia del flujo puede definirse como el producto de la velocidad por caudal.

Salta  
2017



## ▪ Factores que afectan la erosión

### Ocupación y usos del suelo

En la actualidad, la ocupación y usos del suelo es el **factor más importante** que afecta la tasa de erosión.

Las concentraciones de sedimentos en los cursos de agua depende, casi exclusivamente, de las **actividades humanas** desarrolladas dentro de las cuencas hidrográficas que los albergan.

La **vegetación** existente sobre una superficie proporciona una serie de **beneficios** que reducen la pérdida del suelo.

La cubierta superior de los árboles, formada por las copas de los mismos, retiene parte de las aguas de lluvia **a la vez que puede reducir la energía cinética de las gotas.**



## ▪ Factores que afectan la erosión

Una densa cubierta vegetal, provee a la superficie y los primeros estratos del terreno una alta densidad de raíces y materia orgánica, **aumentando la tasa de infiltración**, la retención al escurrimiento y la rugosidad, **reduciendo la velocidad** del escurrimiento superficial.

Las raíces superficiales ayudan a mantener el suelo en su lugar, formando un **conglomerado difícil de romper**. Mientras que las raíces **más profundas colaboran en la estabilidad de los taludes**, disminuyendo el riesgo de movimientos en masas (Morgan, 2005).



## ▪ Factores que afectan la erosión

Las **construcciones** representan la **actividad humana más devastadora en términos erosivos**, debido a la agresividad espacial y temporal que representa para la superficie del terreno (García-Chevesich, 2010).



En las zonas **urbanas consolidadas**, el alto grado de impermeabilización de las superficies y la compactación de suelos desnudos **disminuye la exposición y vulnerabilidad** a la erosión de las partículas de suelo, reduciendo la erosión general a nivel de cuenca.

Sin embargo el aumento de excedentes hídricos superficiales y la construcción de sistemas de desagüe puede provocar **fuertes procesos de erosión localizada** en los puntos de descarga.



En cambio en zonas **urbanas y rurales en expansión**, donde la antropización se encuentra avanzando sobre las áreas verdes autóctonas, la desprotección de los suelos y los incipientes sistemas de desagüe pluvial pueden provocar **intensos procesos de erosión generalizados y otros localizados** dentro la cuenca.



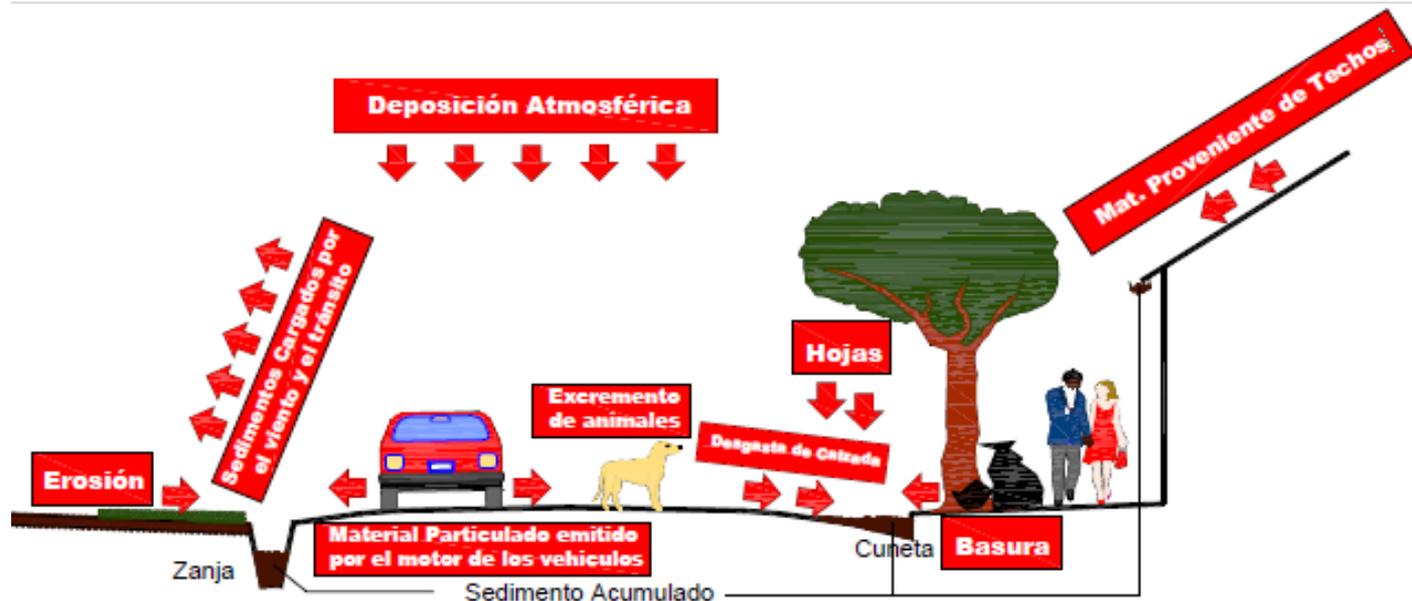
Material de lavado Salto Berrondo, Oberá

## Acumulación y arrastre de poluentes

La urbanización provoca un **aumento de las cantidades de poluentes** en las cuencas, donde se destaca la **materia orgánica, bacterias, metales pesados, hidrocarburos, pesticidas y sedimentos**.

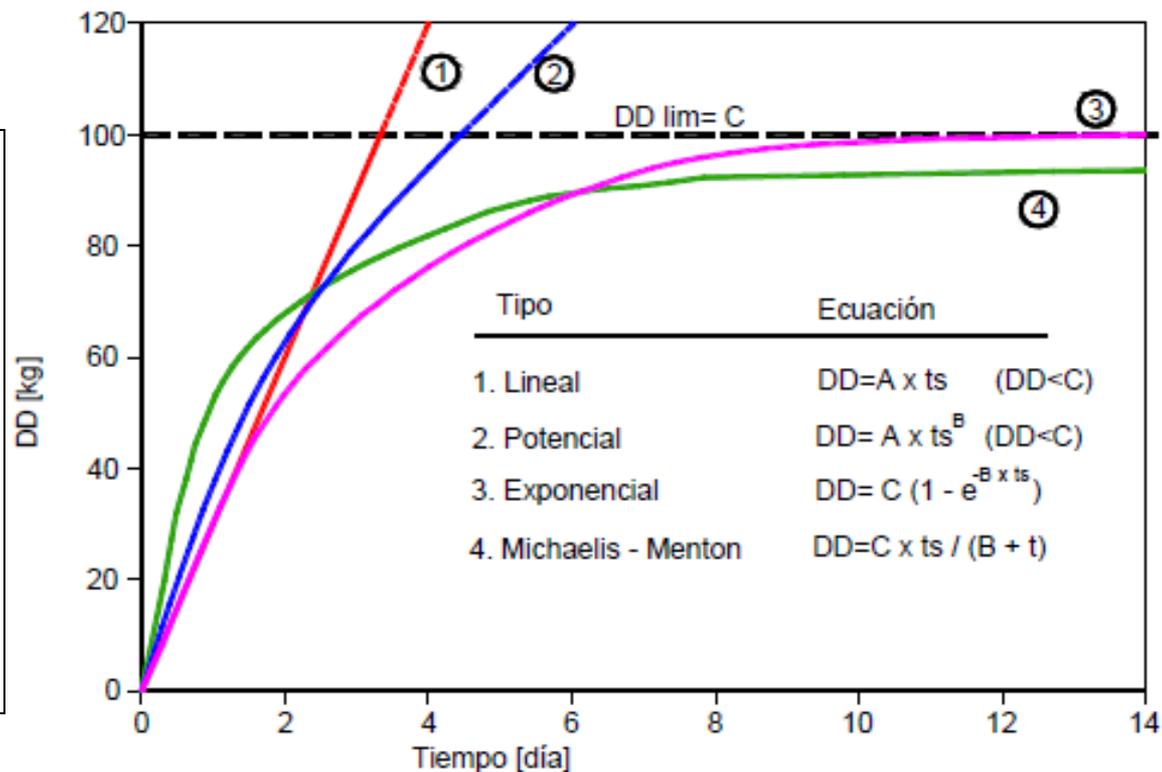
El transportando tales poluentes puede causar severos impactos, que presentan consecuencias onerosas debido a que **perjudican los cuerpos de agua receptores y afectan las condiciones sanitarias de la población** (Dotto et al, 2007).

Las fuentes de generación, presentan una complejidad adicional respecto de las áreas naturales.



Además de la erosión propiamente dicha de las superficies permeables, las superficies impermeables presentan una **deposición creciente en el tiempo durante los días sin lluvia** de poluentes que pueden ser removidos y transportados por el escurrimiento superficial durante las tormentas.

La tasa de remoción y transporte de sedimentos en las áreas impermeables durante los eventos pluviográficos **depende de la disponibilidad de material.**



## Primer flujo

El fenómeno del primer flujo en la respuesta del sistema pluvial ante un evento plviográfico, se evidencia al encontrarse **mayores concentraciones de poluentes, durante los primeros instantes** de la precipitación, aun cuando intensidades y caudales mayores se den con posterioridad.

El estudio del mismo resulta de **fundamental importancia** para el diseño de unidades de tratamiento de efluentes pluviales o de **sistemas combinados pluviocloacales** (Mendez, 2012).

En la Figura puede observarse muestras de aguas pluviales, obtenidas en una **cuenca urbana** de la ciudad de **Porto Alegre**, Brasil.

Inicio de la precipitación



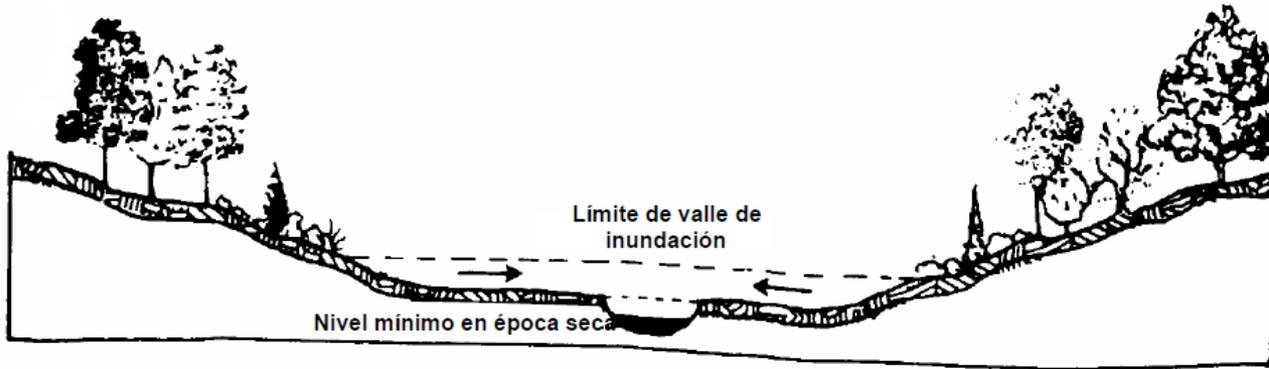
Li et al. (2007) estudiaron el fenómeno del primer flujo en una cuenca urbana de **clima subtropical** en la ciudad de Wuhan, China. La cuenca en estudio posee área de **480Ha**, **85% de impermeabilidad** y densidad poblacional estimada en 130 habitantes por hectárea, con un clima tipo monzónico subtropical y **1300mm** de precipitación media anual.

Los autores determinaron que, interceptar **el primer 30%** de la escorrentía superficial, puede **eliminar el 62% del total de sólidos disueltos y la mayoría de otros poluentes.**

Además establecieron que, a mayor cantidad de **días secos** previos a la tormenta, mayor es la carga de contaminantes en el flujo.

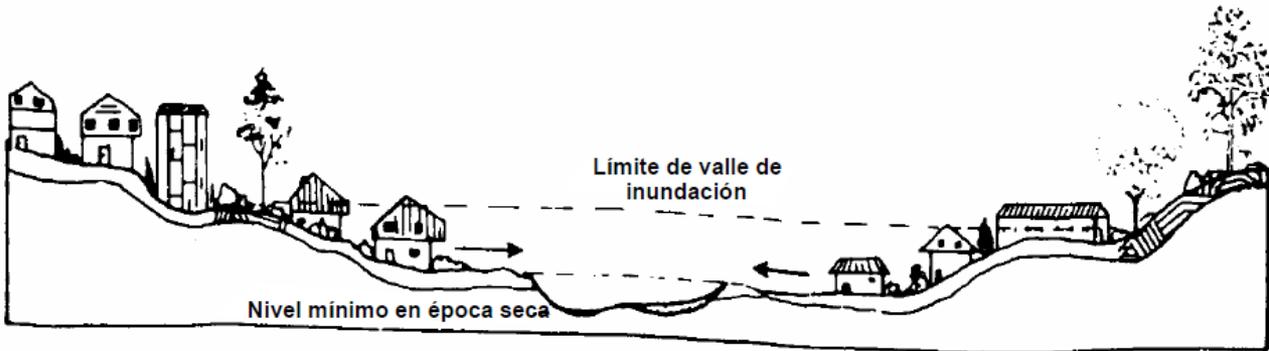


## ▪ Resumen de Impacto hidrológico



- Aumento de caudales máximos.

- Eventos de inundaciones más frecuentes.



- El escurrimiento superficial alcanza el curso receptor más rápido.
- Reducción del caudal base y recarga de los acuíferos.
- Aumento de procesos de erosión – sedimentación e impacto sobre la vida acuática del curso receptor.
- Aumento de contaminantes en el sistema fluvial.

**Universidad Nacional de Rosario**

**Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura**

Tesis de Maestría

Recursos Hídricos en Zonas de Llanura

**“CALIBRACIÓN DE MODELOS  
HIDROLÓGICOS EN AMBIENTES URBANOS  
DE LA PROVINCIA DE MISIONES”**

Maestrando: **Darío Tomás Rodríguez**

Director: Mag. Ing. Alejandro Ricardo Ruberto

**Septiembre de 2014**

# LA CUENCA EN ESTUDIO



- Área: 10,34ha.
- Pend. media: 5,71%.
- Pend. de calles: de 0,6 a 9,6%.
- Pend. media sistema de desagüe: 3,7%

*Cuenca Beltrame 2010.*

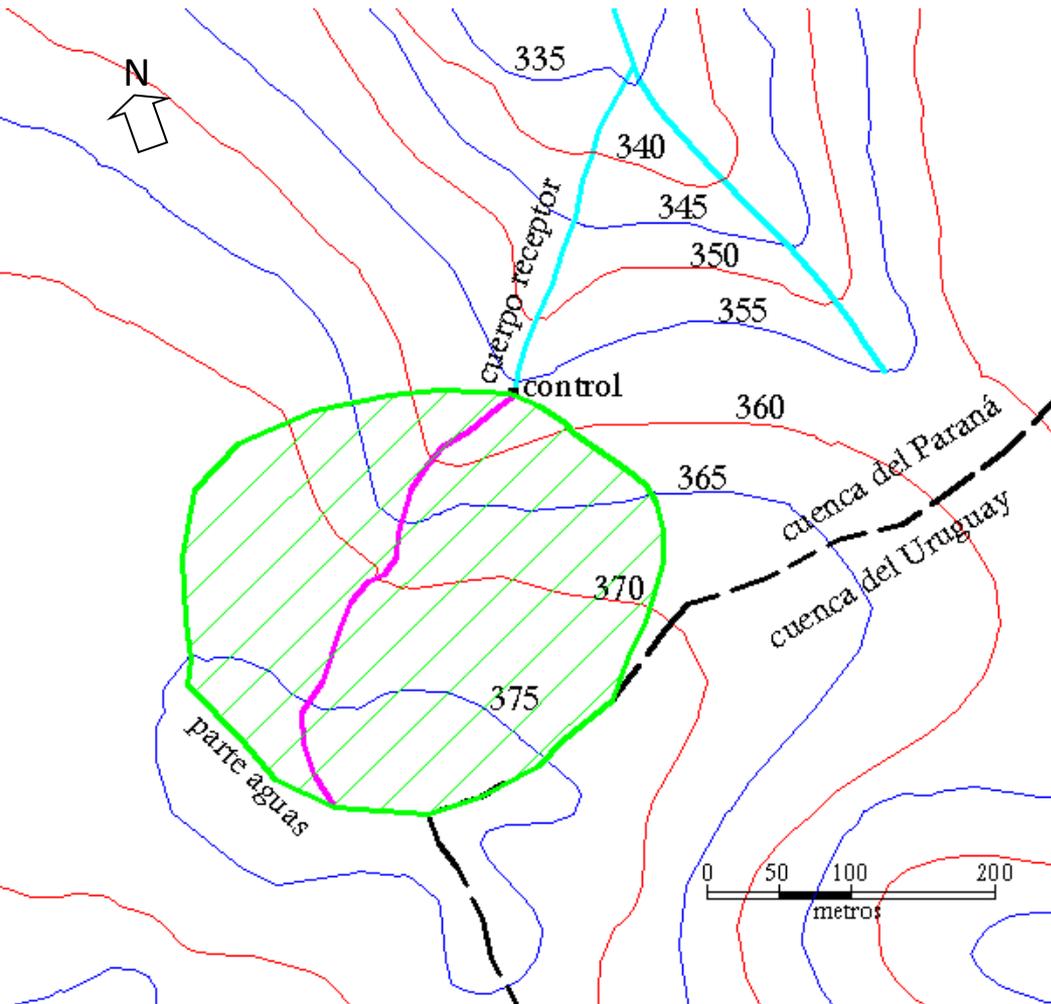
Casas y comercios hasta 3 niveles, calles de pavimento flexible y empedrado, con cordón cuneta.

Información antecedente: cartas topográficas (CARTA, 1963), fotografías y relatos históricos.

Tipo de suelo: limo-arcilloso, entre C y D según SCS-US.

# IMPACTO HIDROLÓGICO

## ■ ESCENARIO PRÓXIMO AL ESTADO ORIGINAL - AÑO 1900

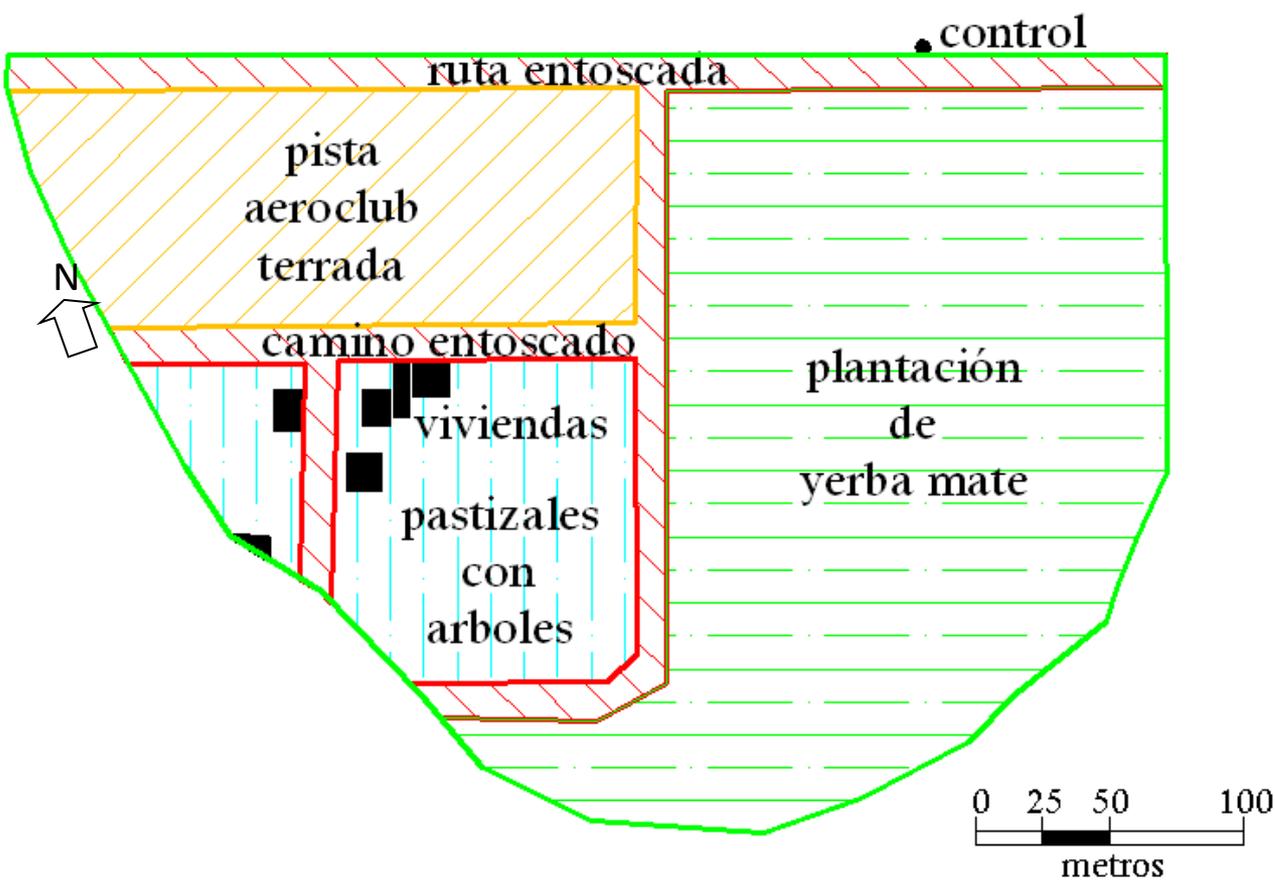


*Cuenca Beltrame año 1900.*

- Delimitada según las curvas de nivel.
- Área: 7,7ha.
- Pendiente media: 6,6%.
- Pendiente media del cauce principal: 6,1%.
- Ocupada por los 6 estratos de la selva Paranaense.

# ■ ESCENARIO DE 1962

• Primeros vestigios de la urbanización. Rutas y calles de tierra, viviendas con pastizales y plantaciones de yerba mate.

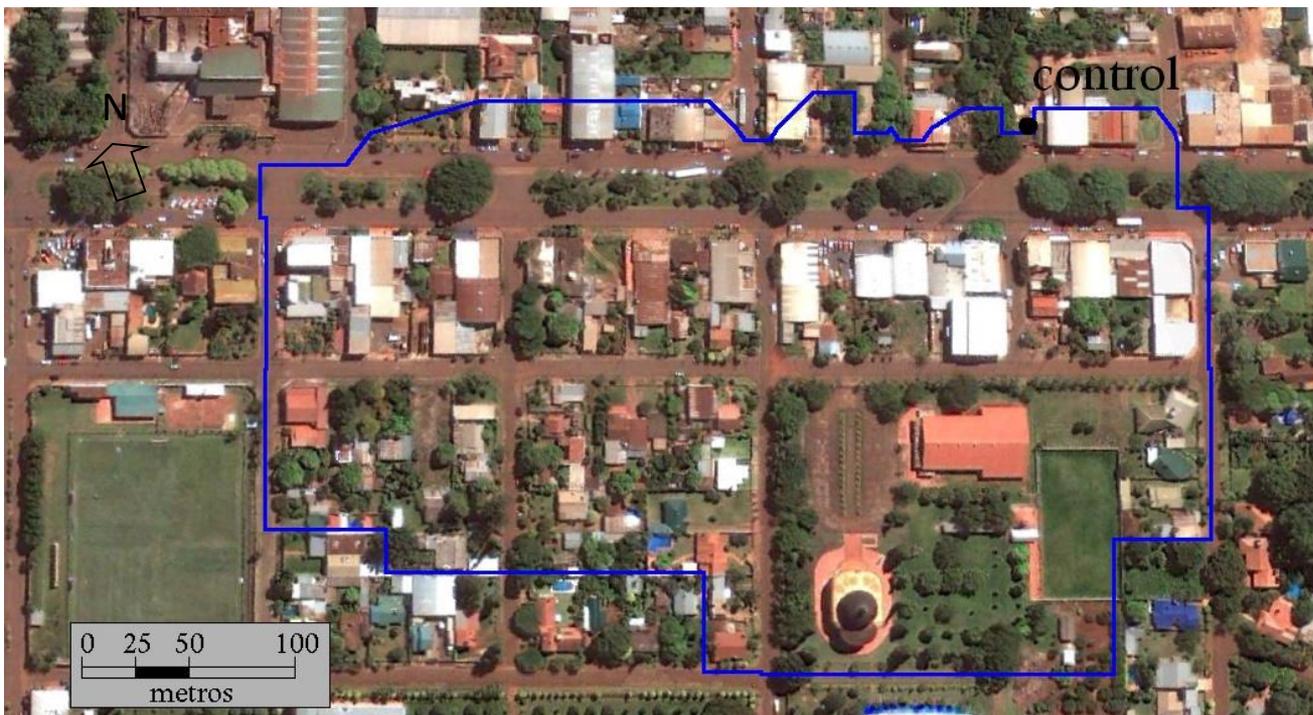


- Área: 9,8ha.
- Pendiente media: 5,73%.
- Pendiente media del desagüe principal: 4,9%.
- Sup. imp.: 40%
- Sup imp. DC: 1%

Cuenca Beltrame año 1962.

## ■ ESCENARIO DE 2012

• Cuenca totalmente urbanizada, zonas residencial y comercial de densidad media. Sin calles de tierra.



*Cuenca Beltrame año 1962.*

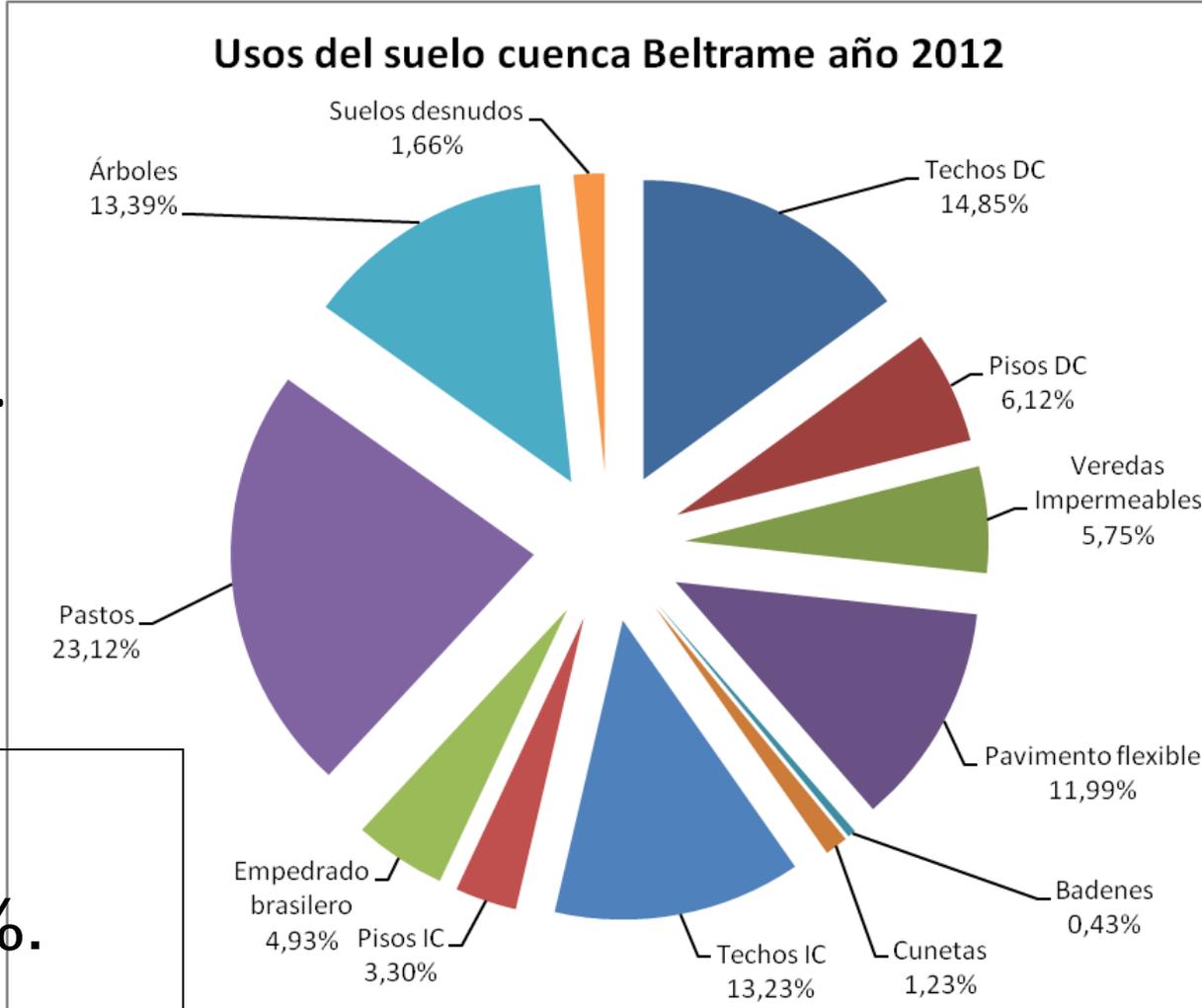
- Área: 10,34ha.
- Pendiente media: 5,71%.
- Pendiente media del desagüe principal: 3,7%.
- Sup. imp.: 63,5%
- Sup imp. DC: 40%

# OCUPACIÓN Y USOS DEL SUELO

## Relevamiento:

- Planos catastrales.
- Inspección lote a lote.
- Imágenes satelitales.

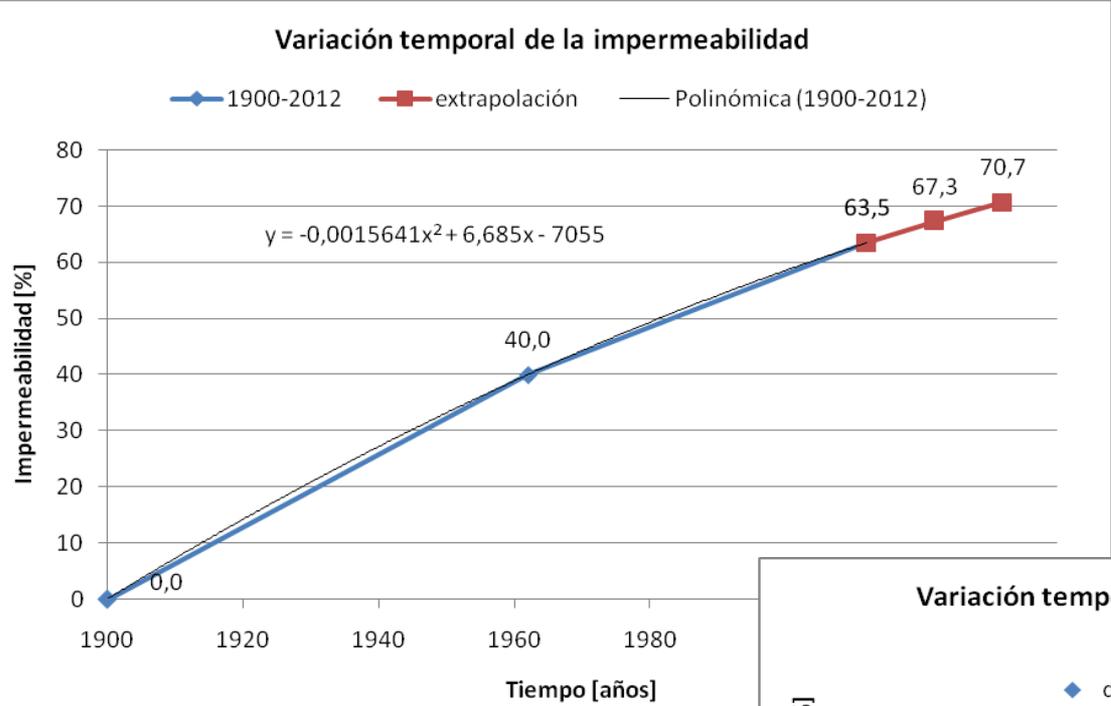
- Sup. imp.: 62%.
- Sup. imp. DC: 65%.
- Sup. imp. DC respecto del total: 40%.



# PROYECCIONES DE SUPERFICIES IMPERMEBALES

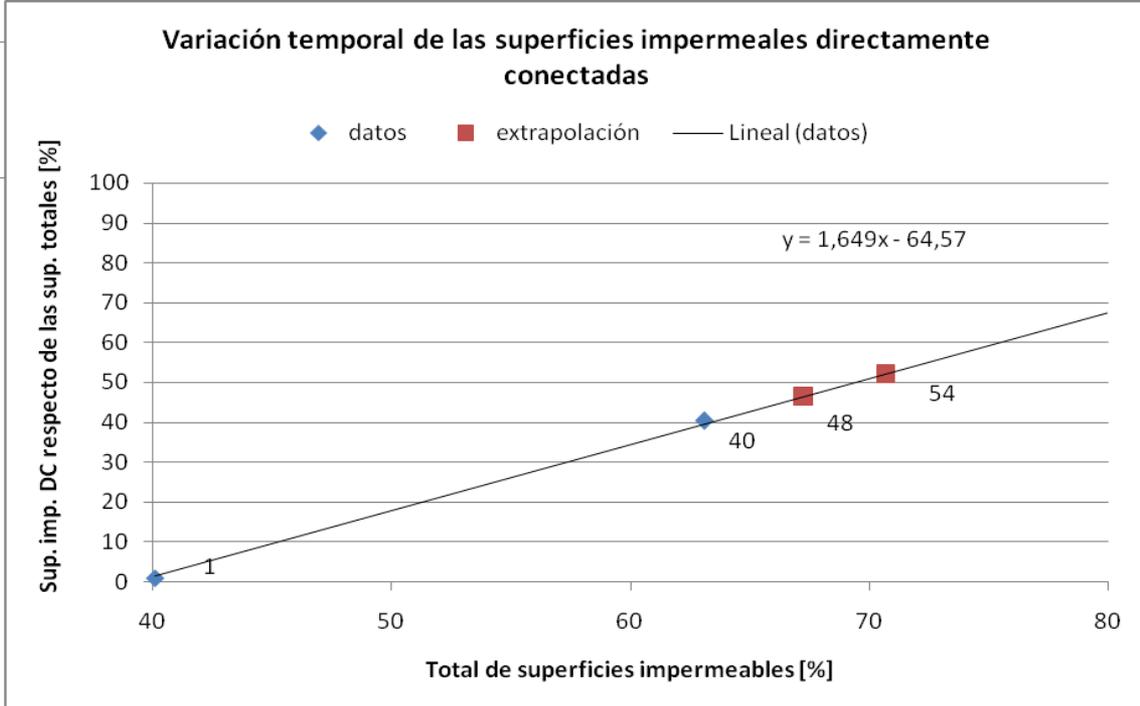
## Áreas impermeables:

- 1900: 0%
- 1962: 40,1%.
- 2012: 63,5%.
- 2022: 67,3%.
- 2032: 70,7%.



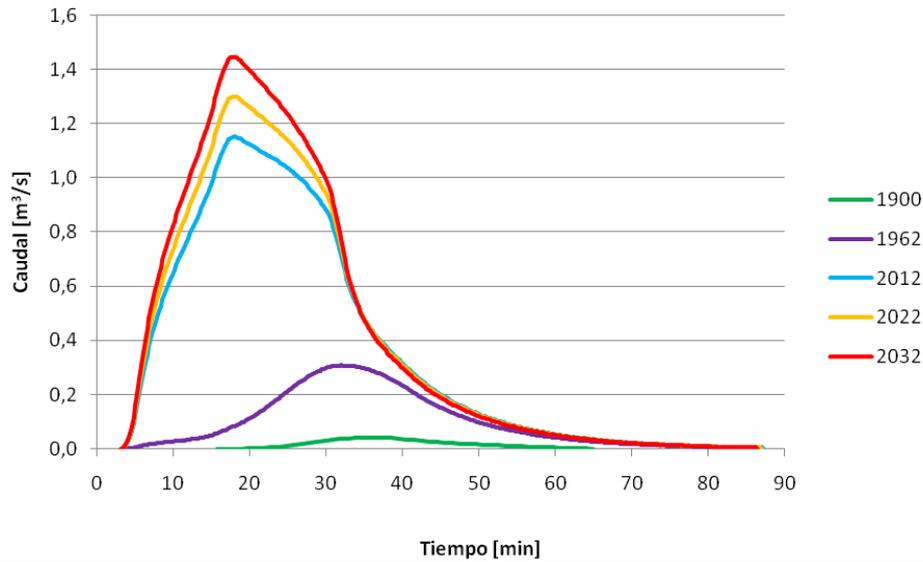
## Áreas imp. DC:

- 1900: 0%
- 1962: 1%.
- 2012: 40%.
- 2022: 48%.
- 2032: 54%.

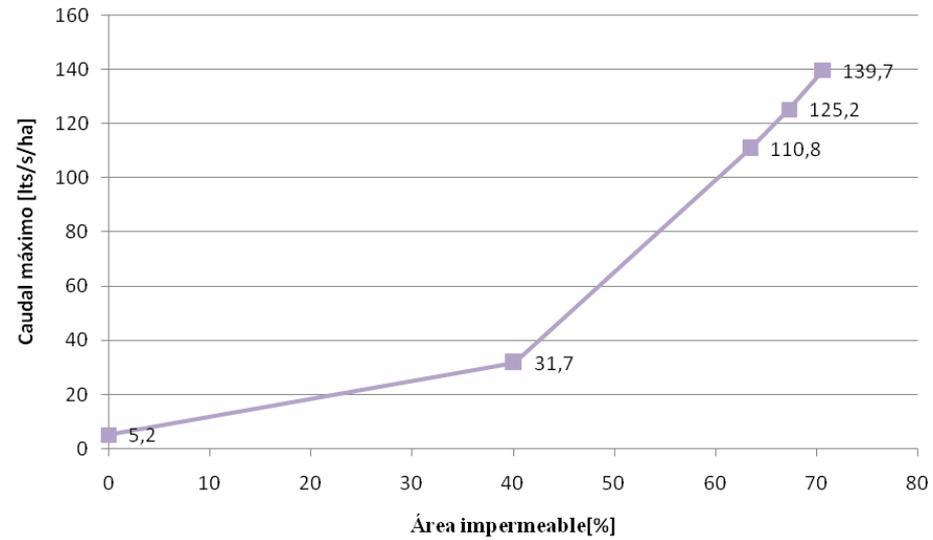


# RESULTADOS

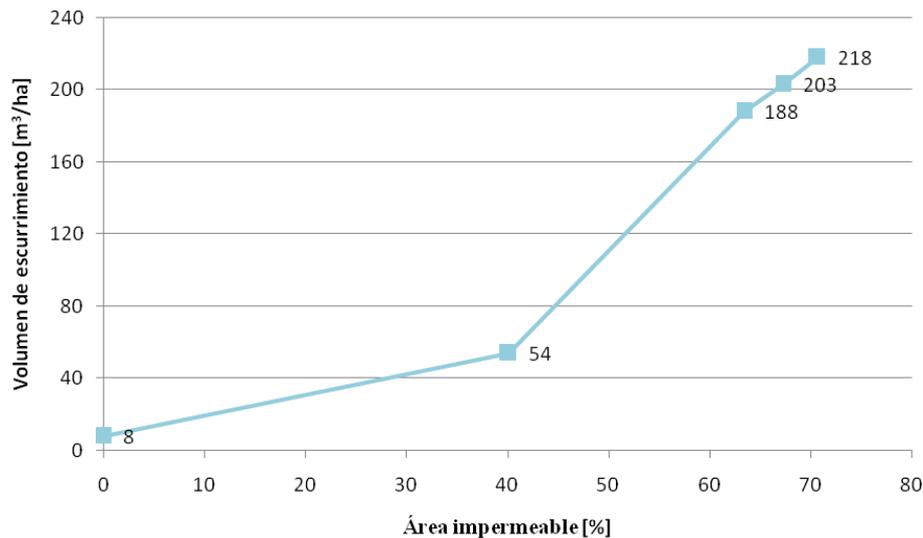
### Comparación de hidrogramas



### Variación caudal máximo por unidad de área



### Variación volumen de escurrimiento directo por unidad de área



### Variación tiempo al pico - impermeabilidad

