

# Tema 4 – Dimensionado de sistemas celulares

Ramón Agüero Calvo

[ramon.agueroc@unican.es](mailto:ramon.agueroc@unican.es)

*En la elaboración de estos apuntes han contribuido:  
Ramón Agüero Calvo, Luis Muñoz Gutiérrez*

# Contenidos

- Introducción a las comunicaciones móviles
- El concepto celular: reuso de frecuencias
- Interferencia co-canal
- Eficiencia: sectorización y división celular
- Traspasos o *handovers*

# Contenidos

- Introducción a las comunicaciones móviles
- El concepto celular: reuso de frecuencias
- Interferencia co-canal
- Eficiencia: sectorización y división celular
- Traspasos o *handovers*

# ¿Qué son las comunicaciones móviles?

- Comunicaciones entre estaciones que se mueven libremente, en entornos...
  - Terrestre
  - Marítimo
  - Aeronáutico
- Desarrollo en paralelo a las comunicaciones cableadas
  - Necesidades complementarias [Ser capaces de comunicarse en movimiento]
  - A día de hoy es mayor el número de usuarios de telefonía móvil que el de telefonía fija
- Inicialmente privadas (emergencia, policía, etc), sin conexión con la red pública
- Servicios
  - Busca personas
  - Telefonía móvil
  - Transmisión de datos, imágenes, etc

# Historia de las comunicaciones móviles

Comunicaciones Marítimas [MORSE]



**[1897]**  
Invención radio Marconi

**[1928]**  
Mejora de receptores  
1er sistema comunicaciones móviles

**[1940]**  
Primer sistema FM Connecticut

**[1947]**  
Bell origina el concepto de red celular



**[1921]**  
Sistema de difusión Policía de Detroit

**[1933]**  
Primer sistema bidireccional New Jersey

**[1946]**  
1er Servicio telefonía/radio nivel comercial St. Louis

Extensión comunicaciones móviles (departamentos policía)



# Historia de las comunicaciones móviles

PTT (Push To Talk)  
Encaminamiento manual



**[1954]**

Banda se desplaza  
a 450 Mhz  
(sobrecarga)

**[1978]**

Primeras pruebas  
AMPS en Chicago y  
ARTS en Washington DC

**[1982]**

Se empieza a  
trabajar en el  
sistema GSM



**[1964]**

Encaminamiento  
automático (Bell)  
Sistema MJ @150 Mhz

**[1969]**

Sistema MK  
@450 Mhz

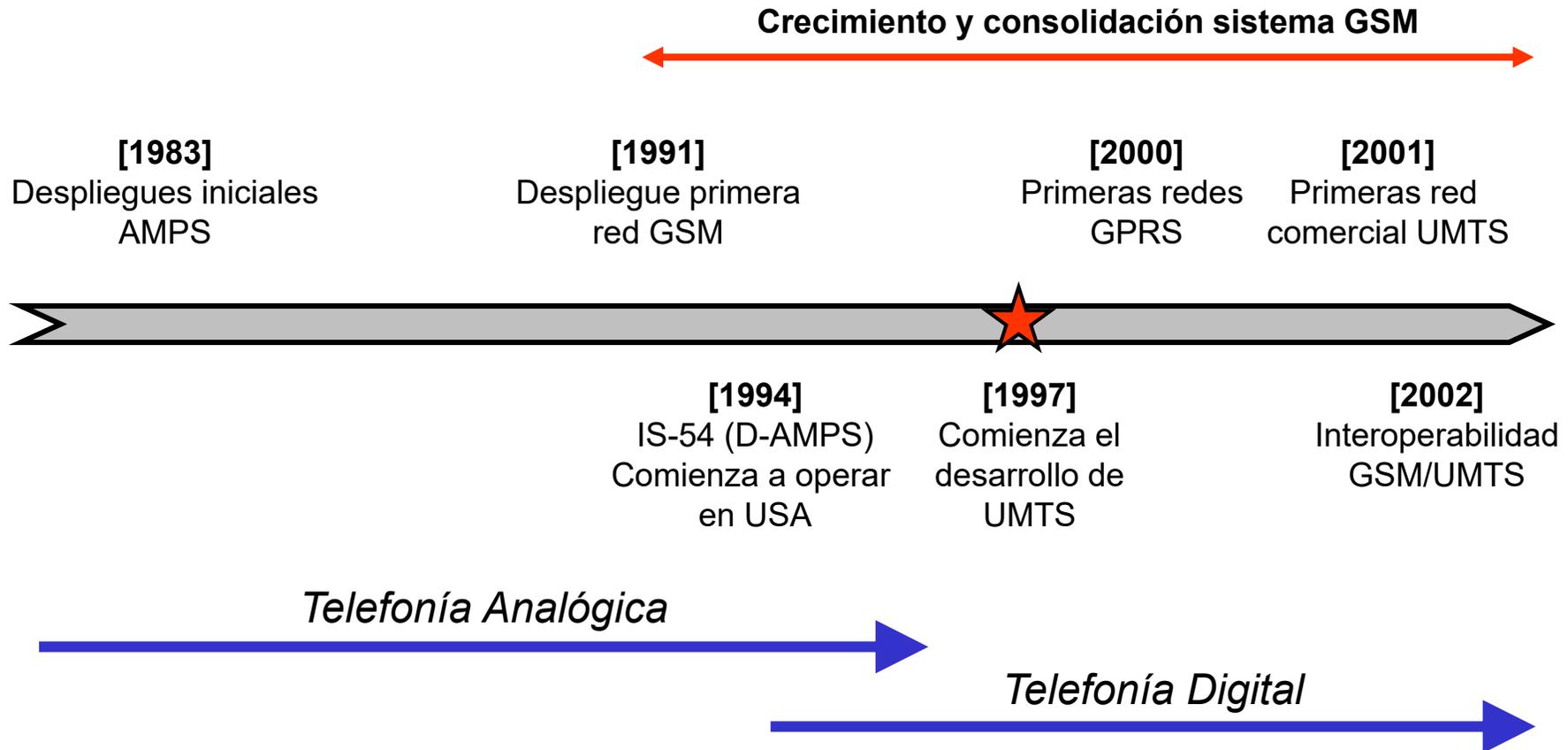
**[1981]**

Sistema NMT  
(1er sistema que  
se expande por más  
de un país)

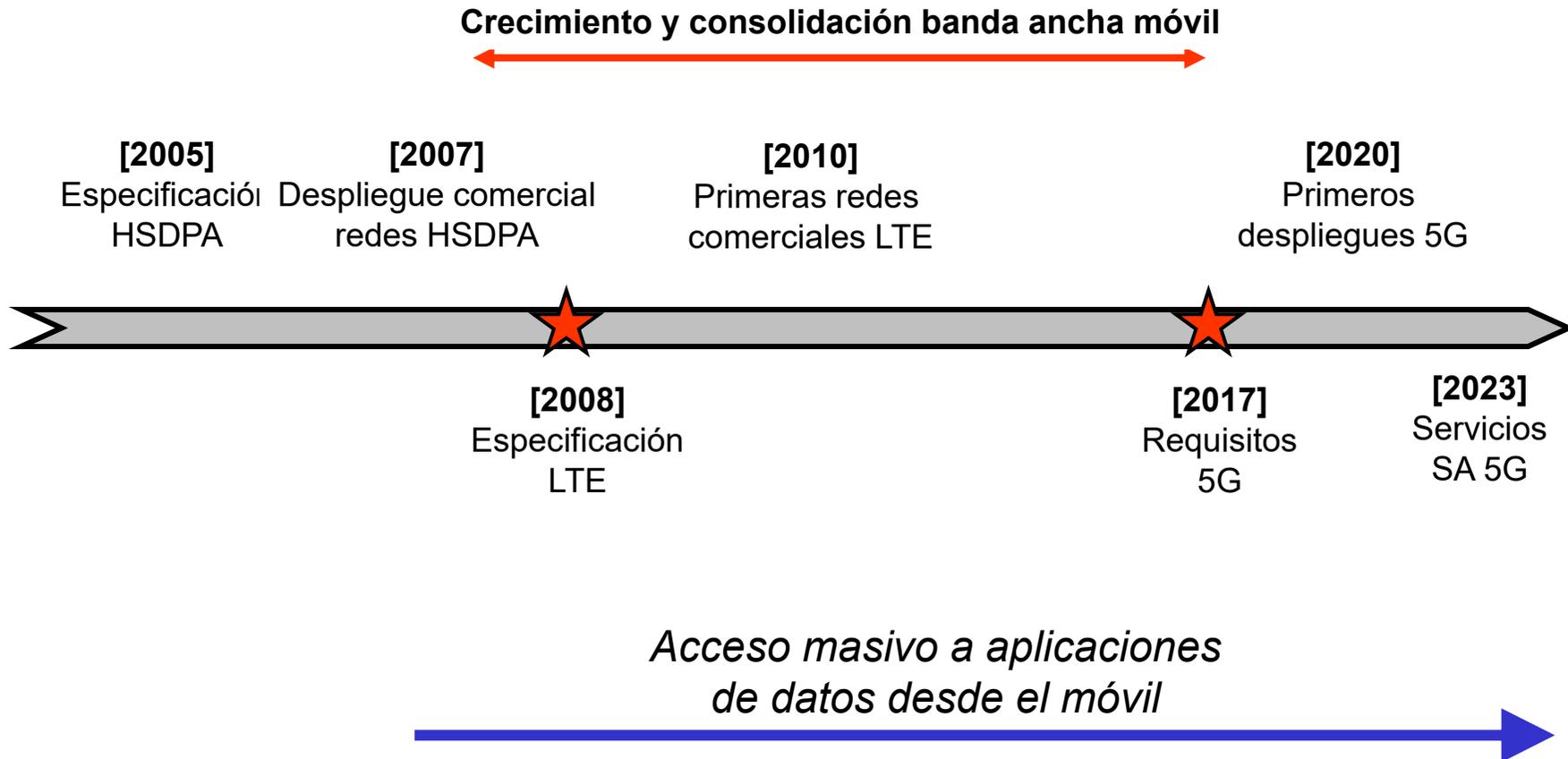
**Sistema IMTS**



# Historia de las comunicaciones móviles



# Historia de las comunicaciones móviles

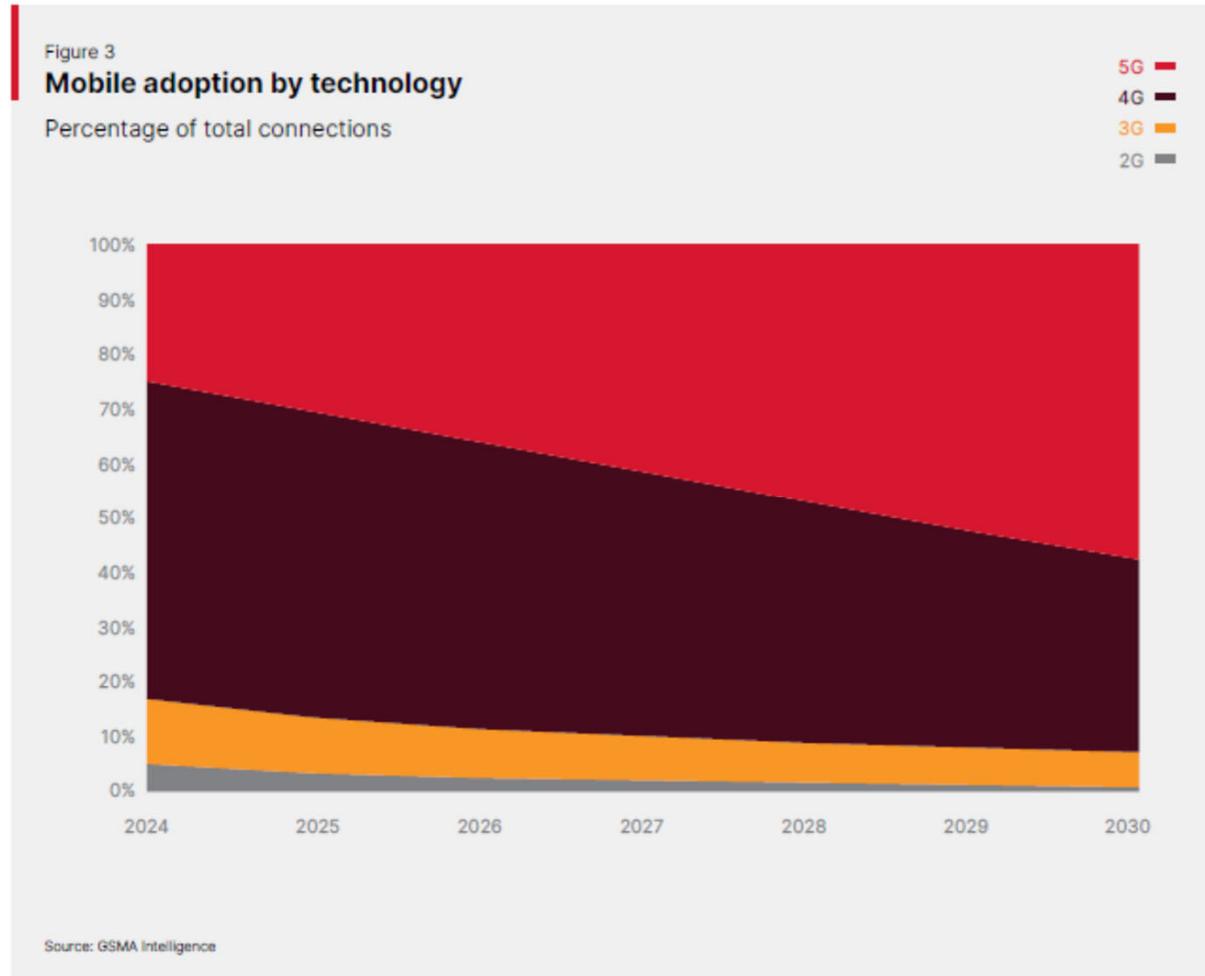


# Historia de las comunicaciones móviles

- En la actualidad existen...
  - $5.8 \cdot 10^9$  usuarios (71% penetración) comunicaciones móviles, y  $8.6 \cdot 10^9$  conexiones
    - Se esperan  $6.5 \cdot 10^9$  (76% penetración) en 2030
  - > 1400 operadores (en 237 países)
  - > 1200 operadores virtuales
- Nuevos mercados
  - La mayoría de los 400 millones de conexiones hasta 2025 vendrán de las regiones Asia Pacífico y África Subsahariana
- Usuarios Internet Móvil
  - En 2024 ha habido  $4.7 \cdot 10^9$  usuarios (penetración 58%)
  - Se espera que suba hasta  $5.5 \cdot 10^9$  usuarios en 2030 (penetración 64%)
- 4G (LTE)
  - En 2018 4G superó a 2G como la tecnología de comunicaciones móviles con mayor presencia
  - Se han superado los 4000 M de conexiones en 2019
  - En 2024 el 58% de conexiones, bajando al 35% en 2030
- Eclosión de la 5G
  - $+2 \cdot 10^9$  conexiones en 2024 (se esperan  $5.5 \cdot 10^9$  en 2030)
  - En 2026 se llegará a un ~40% de penetración 5G
  - En 2024 el 25% de conexiones, subiendo al 57% en 2030

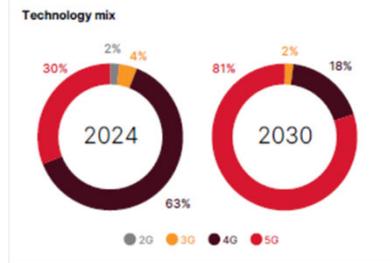
"The Mobile Economy 2024". GSMA  
Disponibile en [www.gsma.com/mobileeconomy](http://www.gsma.com/mobileeconomy)

# Historia de las comunicaciones móviles

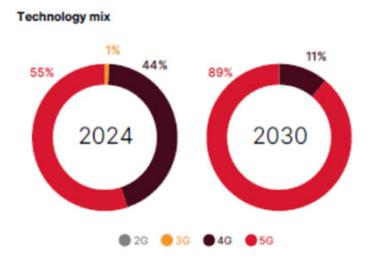


“The Mobile Economy 2025”. GSMA  
Disponibile en [www.gsma.com/mobileeconomy](http://www.gsma.com/mobileeconomy)

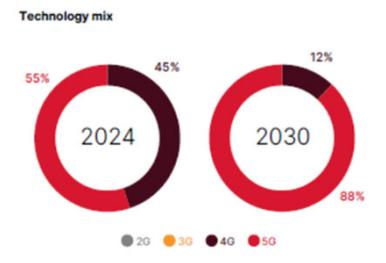
# Historia de las comunicaciones móviles



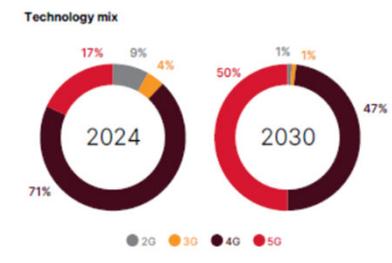
EUROPA



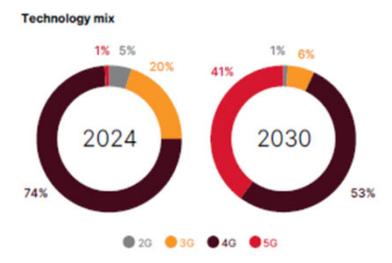
AMÉRICA DEL NORTE



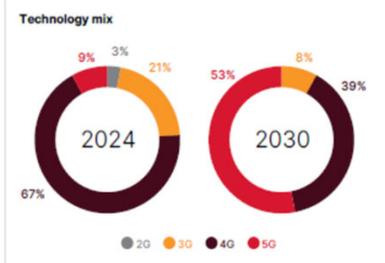
CHINA



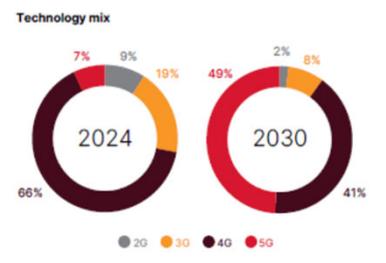
ASIA-PACÍFICO



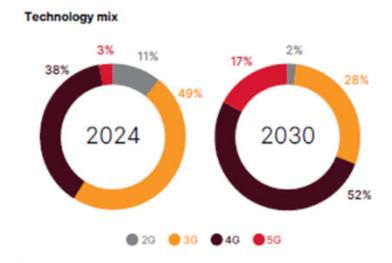
ANTIGUA URSS



LATINOAMÉRICA



MEDIO OESTE. NORTE ÁFRICA



ÁFRICA SUBSAHARIANA

# Redes móviles analógicas (1ª generación)

- **AMPS (*Advanced Mobile Phone System*)**
  - USA en 1983-2008 y Australia en 1987-2000
  - Banda de 800 Mhz
  
- **NMT (*Nordisk MobilTelefoni, Nordic Mobile Telephony*)**
  - Se inició en los países nórdicos (Dinamarca, Noruega, Suecia y Finlandia)
  - Se ha empleado en otros países europeos (Holanda, Suiza, Polonia, Hungría, Chequia,...)
  - NMT450 (@450 Mhz) y NMT900 (@900 Mhz)
  - Prácticamente desaparecido en la actualidad (GSM)
  
- **TACS (*Total Access Communication System*)**
  - Versión de AMPS empleada en Reino Unido, España, Italia, etc...
  - Banda de 900 Mhz
  - No se emplea en la actualidad
  - En Japón se denominó JTACS

# Redes móviles digitales (2ª generación)

- GSM (*Global Systems for Mobile Communications*)
  - Tecnología con cobertura prácticamente global
  - Frecuencias de 900 Mhz y 1800 Mhz
- IS-54 (*Interim Standard*)
  - Versión digital de AMPS (D-AMPS)
  - Usado en Estados Unidos
  - TDMA
- IS-95
  - USA
  - Basado en AMPS
  - Usa CDMA (*Code Division Multiple Access*)
- Evolución hacia la conmutación de paquetes
  - GPRS (*General Packet Radio Service*)

## Presente (y futuro)...

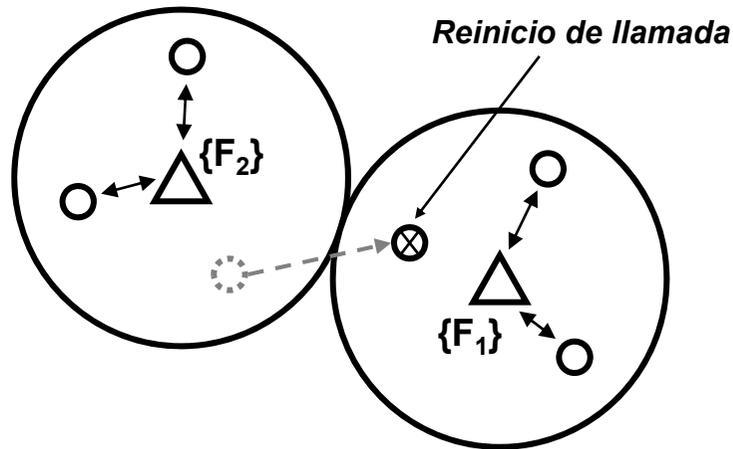
- El 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) se encarga de las especificaciones de los sistemas de comunicaciones móviles actuales y futuros
- Expansión de la 3G o UMTS (*Universal Mobile Telephone System*)
  - Sistema de banda ancha con cobertura global
  - Basado en CDMA, y en conmutación de paquetes e IP
- HSPA (*High Speed Packet Access*)
  - Aparece en tráfico de bajada (downlink) en Release-5
  - Comercialmente disponible en 2005
  - En 2015 >2500 M conexiones HSPA
- LTE (*Long Term Evolution*) y 4G (LTE-Advanced)
  - Primeras especificaciones en Release-8
  - Primeros despliegues en 2010
  - En 2016, más de 500 redes LTE en 190 países
  - >4800 M de conexiones LTE en 2021
- Llegada de la 5G – mmW, Cloud-RAN, NFV (2020)
  - Releases 15 y 16 del 3GPP
  - 229 operadores en 87 países en enero de 2023(\*)

(\*) "The Mobile Economy 2023". GSMA  
Disponibile en [www.gsma.com/mobileeconomy](http://www.gsma.com/mobileeconomy)

# Contenidos

- Introducción a las comunicaciones móviles
- El concepto celular: reuso de frecuencias
- Interferencia co-canal
- Eficiencia: sectorización y división celular
- Traspasos o *handovers*

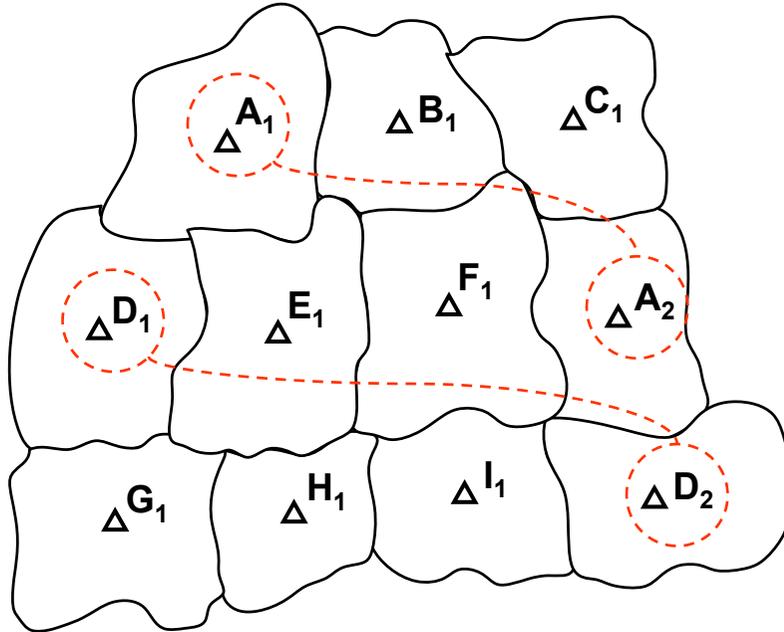
# Sistemas pre-celulares



- Eficiencia:  $\eta = \frac{K}{S} \frac{1}{B_T} \left[ \frac{\text{canales}}{\text{km}^2 \cdot \text{Hz}} \right]$ 
  - K: # de canales ( $B_T/B_R$ )
  - S: Superficie
  - $B_T$ : Ancho de banda total
  - $B_R$ : Ancho de banda de cada canal

- Gran cobertura
  - Una única antena
  - Gran potencia
- Capacidad limitada, con gran probabilidad de bloqueo
  - En función de los recursos (canales) asociados a cada emplazamiento
  - En Nueva York (1970): 12 llamadas simultáneas en  $\sim 2500 \text{ km}^2$
- Uso de frecuencias diferentes en cada emplazamiento autónomo
  - Para evitar interferencias
  - Escasez de frecuencias: Necesidad de reestructurar el sistema de telefonía móvil

# El concepto celular

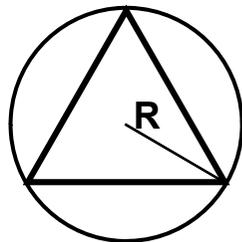
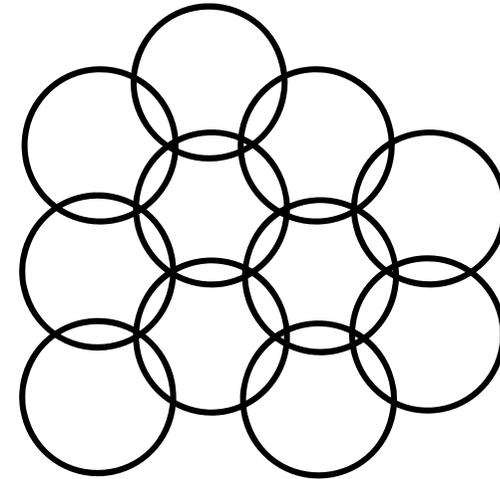


V.H. MacDonald, "The Cellular Concept" *The Bell System Technical Journal*. Vol 58, no 1. Enero 1979

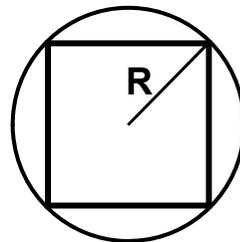
- Reuso de frecuencias en un "mapa celular"
- Celdas amorfas y e irregulares
- Uso de múltiples estaciones base (*base station*, BS) con menor potencia
- Cada BS tiene asignado un porcentaje del total de canales en el sistema
- A las BS cercanas entre sí se les asigna frecuencias diferentes
- Las mismas frecuencias son reutilizadas (a una distancia adecuada)
- Las estaciones base están interconectadas entre sí
- El área cubierta por una BS se denomina **célula**

# El concepto celular

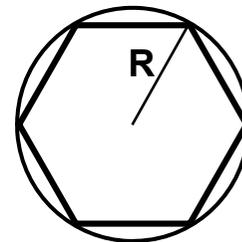
- El área de cobertura de una BS es sin forma
- Al comienzo de los sistemas celulares: necesidad de utilizar una forma geométrica regular
- La elección inmediata (cobertura circular) no es válida: zonas de solapamiento
  - Se necesita que se tesele completamente el terreno
- Elegir entre el triángulo, el cuadrado y el hexágono
  - El hexágono es el que tiene un área mayor: se necesitan menos BS para cubrir un terreno



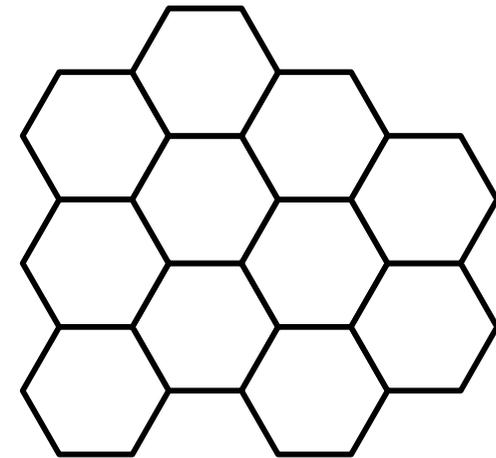
$$A_{\text{triángulo}} = \frac{3\sqrt{3}}{4} R^2$$



$$A_{\text{cuadrado}} = 2R^2$$



$$A_{\text{hexágono}} = \frac{3\sqrt{3}}{2} R^2$$



# Reuso de frecuencias

- El elemento diferenciador de los sistemas celulares es el reuso de frecuencias
  - Mediante este proceso se asignan los diferentes canales a todas las células
- El grupo de células que *conjuntamente* usan todas las frecuencias disponibles se denomina **cluster**
  - El número de células por cluster (N) se denomina *factor de reuso*
  - Algunos autores llaman factor de reuso al inverso de N
- Usuarios de diferentes clusters pueden usar simultáneamente el mismo canal

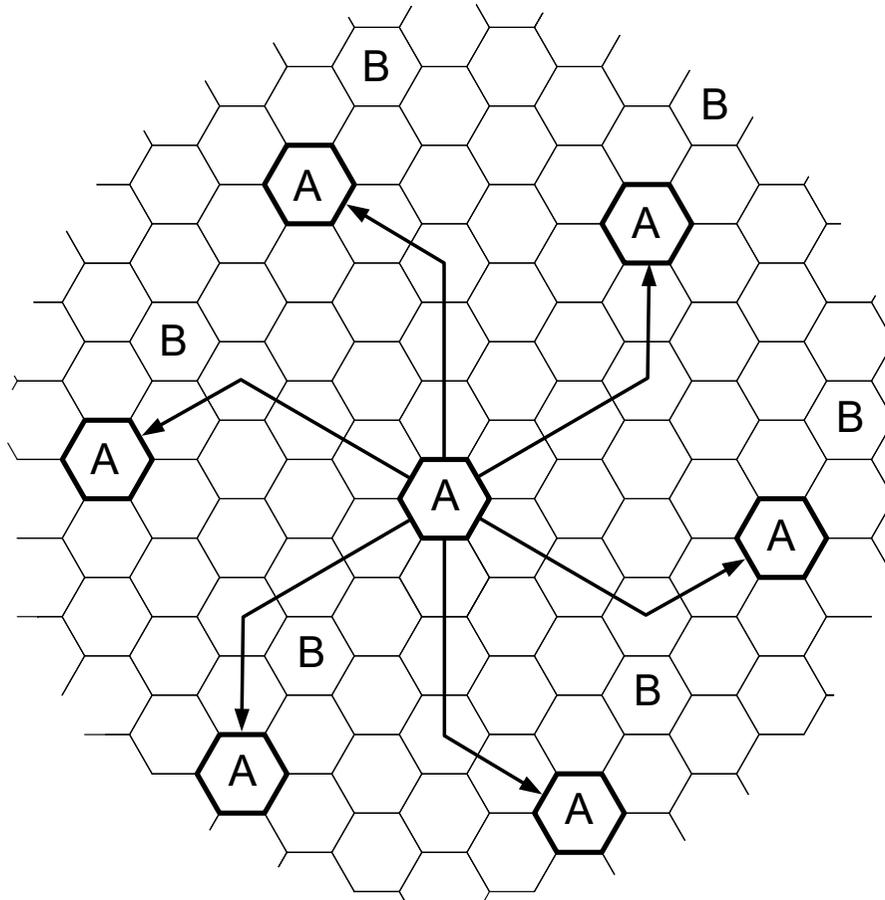
- Eficiencia

$$\eta_c = \frac{K/N}{S/N_c} \frac{1}{B_T} = \frac{K}{S} \frac{1}{B_T} \frac{N_c}{N} = \eta \frac{N_c}{N}$$

[canales / km<sup>2</sup> · Hz]

- K: # de canales (B<sub>T</sub>/B<sub>R</sub>)
- S: Superficie
- B<sub>T</sub>: Ancho de banda total
- B<sub>R</sub>: Ancho de banda de cada canal
- N: factor de reuso
- N<sub>C</sub>: # total de células

# Reuso de frecuencias



- Para asignar canales a las diferentes células se emplean dos parámetros:  $i, j$ 
  - Desplazamiento de  $i$  células
  - Rotación de  $60^\circ$
  - Desplazamiento de  $j$  células
- En el ejemplo de la figura
  - $i = 3, j = 2$
- A partir de  $i, j$  se obtiene el factor de reuso
 
$$N(i,j) = i^2 + j^2 + i \cdot j$$
- Como  $i, j$  son enteros no todos los valores de  $N$  son geoméricamente realizables

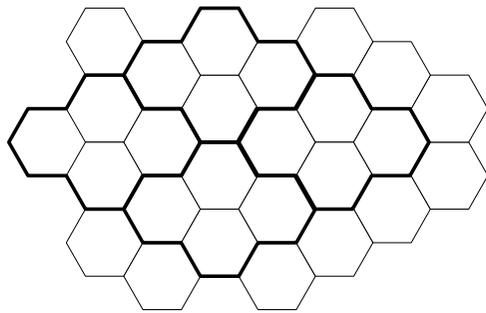
V.H. MacDonald, "The Cellular Concept" The Bell System Technical Journal. Vol 58, no 1. Enero 1979

# Reuso de frecuencias

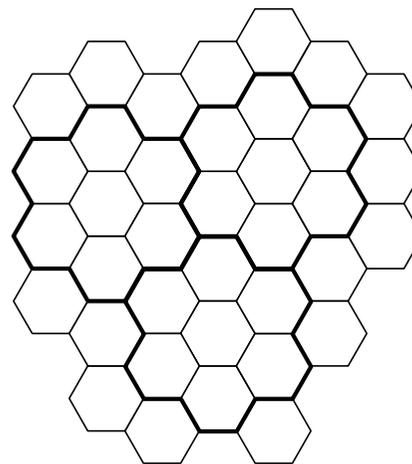
	0	1	2	3	4	5	6
1	1	3					
2	4	7	12				
3	9	13	19	21			
4	16	21	28	37	48		
5	25	31	39	49	61	75	
6	36	43	52	63	76	91	108

- En la tabla se muestran algunos factores de reuso factibles, para diversas combinaciones de  $i, j$

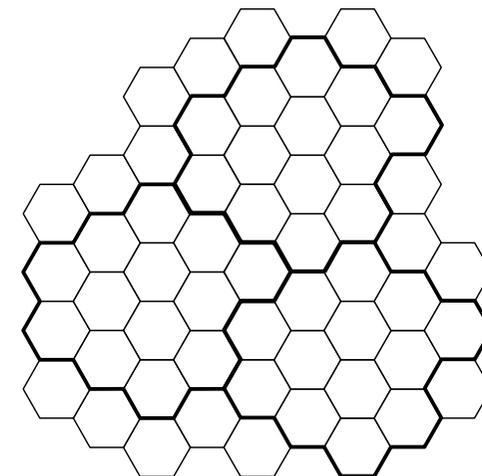
$$N(i,j) = i^2 + j^2 + i \cdot j$$



$i = 2, j = 0$



$i = 1, j = 2$



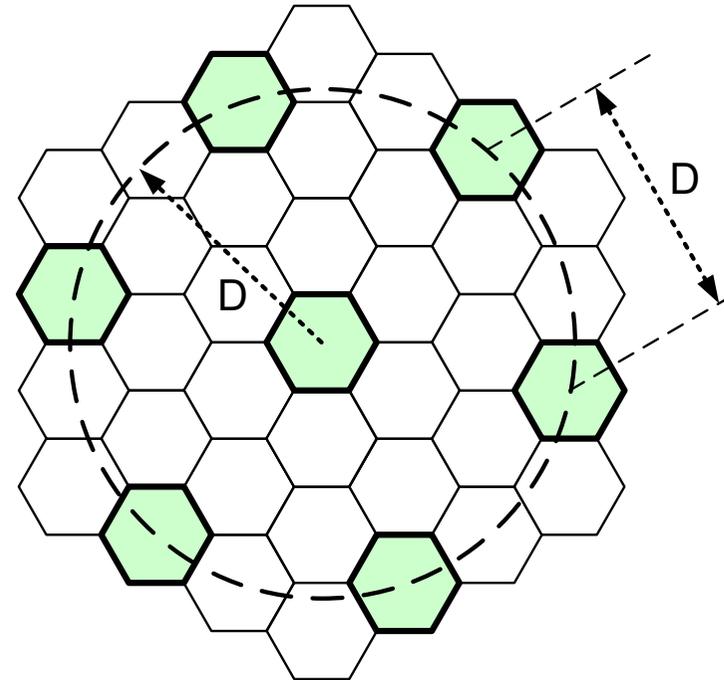
$i = 3, j = 1$

# Contenidos

- Introducción a las comunicaciones móviles
- El concepto celular: reuso de frecuencias
- **Interferencia co-canal**
- Eficiencia: sectorización y división celular
- Traspasos o *handovers*

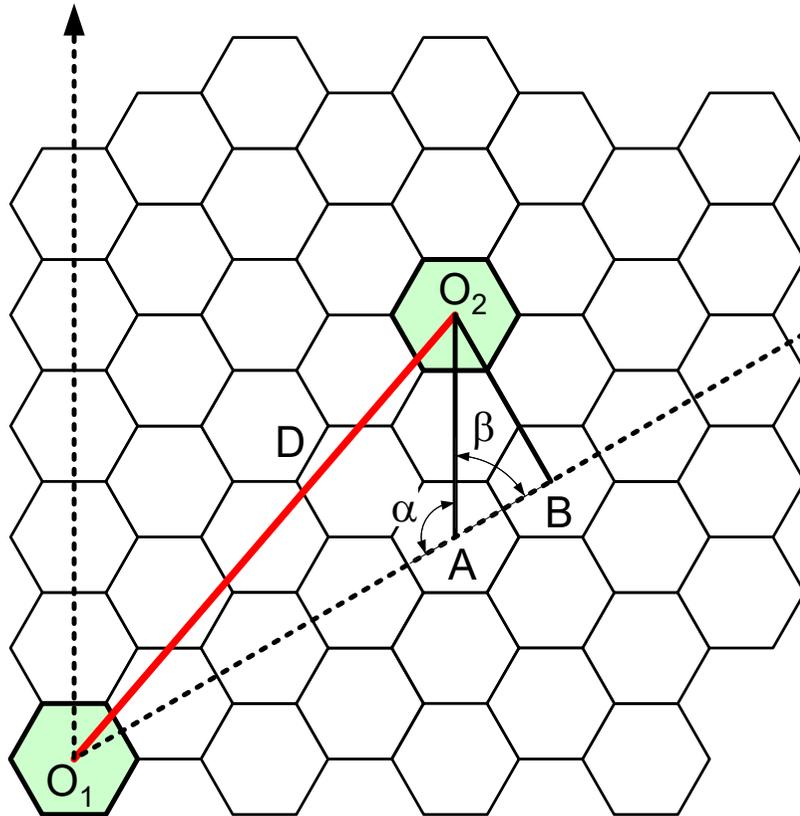
## Interferencia co-canal

- La interferencia es el factor que en mayor medida limita el rendimiento de los sistemas celulares
- Hay varias fuentes de interferencia, pero la más relevante es la denominada co-canal
- Es consecuencia del reuso de frecuencias: hay células que trabajan en el mismo conjunto de canales
- No se puede reducir incrementando la potencia de transmisión
  - También se incrementaría la de las BS interferentes



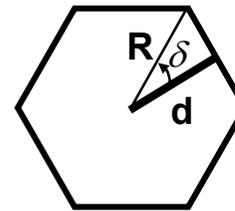
- Depende de la distancia de reuso ( $D$ )
  - A la que se encuentran las células interferentes (entre las localizaciones de las estaciones base)

# Distancia de reuso



Ejemplo ilustrativo:  $i = 4, j = 2$

- En un hexágono...



$$d = R \cos(\delta) = \frac{\sqrt{3}}{2} R$$

- Por el teorema del coseno (triángulo  $O_1AO_2$ )

$$D^2 = \overline{O_1A}^2 + \overline{O_2A}^2 - 2\overline{O_1A}\overline{O_2A}\cos(\alpha)$$

$$- O_1A = 2di$$

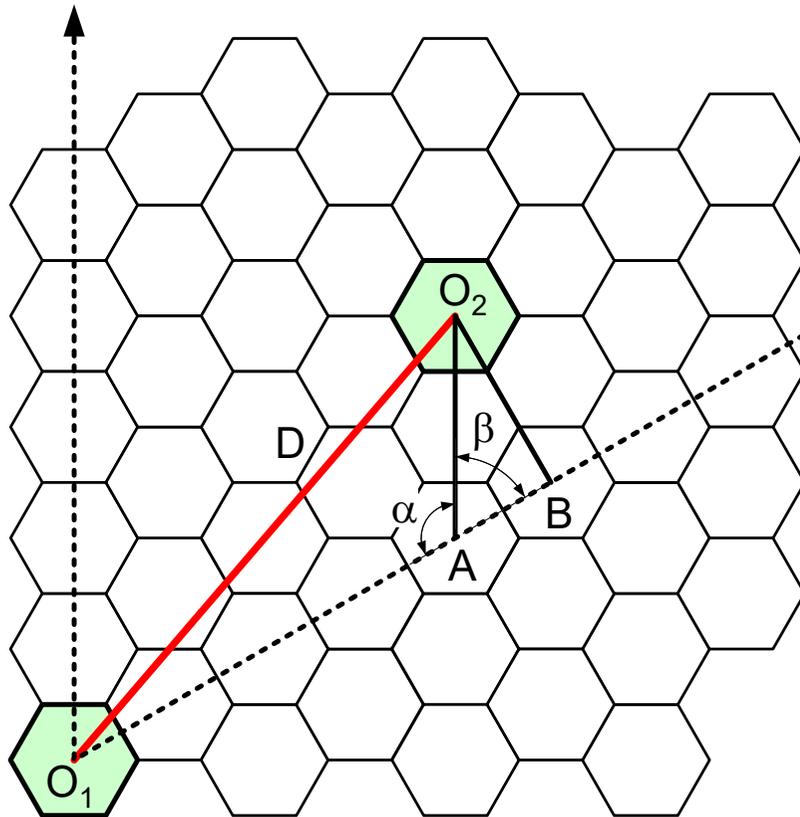
$$- O_2A = 2dj$$

- Luego ( $\alpha = 120^\circ$ ):

$$D = \sqrt{(2di)^2 + (2dj)^2 - 2(2di)(2dj)\left(-\frac{1}{2}\right)} =$$

$$= \sqrt{(2d)^2(i^2 + j^2 + i \cdot j)} = 2d\sqrt{N} = R\sqrt{3N}$$

# Distancia de reuso



Ejemplo ilustrativo:  $i = 4, j = 2$

- Alternativamente:

$$D^2 = \overline{O_1B}^2 + \overline{O_2B}^2$$

- $O_1B = O_1A + O_2A \cos(\beta)$
- $O_2B = O_2A \sin(\beta)$

- Teniendo en cuenta que  $\beta = 60^\circ$

$$D = \sqrt{\left(2di + 2dj \frac{1}{2}\right)^2 + \left(2dj \frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{(2d)^2 (i^2 + j^2 + i \cdot j)} = 2d\sqrt{N} = R\sqrt{3N}$$

- Al cociente  $D/R$  ( $Q$ ) a veces se le denomina como **cociente de reuso co-canal**

## Cálculo de la interferencia co-canal

- Se supone que se trabaja con antenas omnidireccionales
- La potencia de la señal de interés (portadora) será...

$$C = P_{TX} \frac{\beta}{R^\gamma}$$

- $P_{TX}$ : potencia de transmisión de la BS
- $\beta$ : constante
- $\gamma$ : exponentes de pérdidas de propagación  
*(Típicamente  $\in [2,4]$ , entornos celulares)*
- R: radio de la célula

*(Se considera que el móvil está en el límite de la célula: PEOR CASO)*

- La interferencia de una de las células co-canal será...

$$I_n = P_{TX} \frac{\beta}{D_n^\gamma}$$

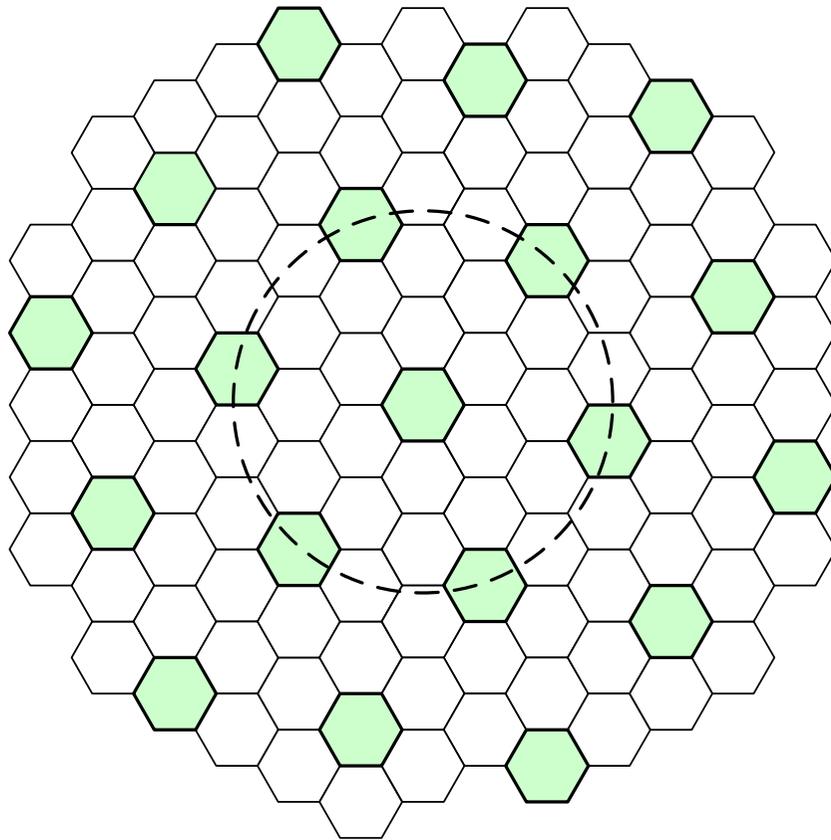
- $D_n$ : distancia a la que se encuentra la n-ésima célula interferente

- La interferencia total vendrá dada por...

$$I_{Total} = \sum_n I_n = \sum_n P_{TX} \frac{\beta}{D_n^\gamma} = P_{TX} \beta \sum_n \frac{1}{D_n^\gamma}$$

- Hay que determinar el número total de células interferentes y la distancia con cada una de ellas

# Cálculo de la interferencia co-canal



Ejemplo ilustrativo:  $i = 2, j = 1$

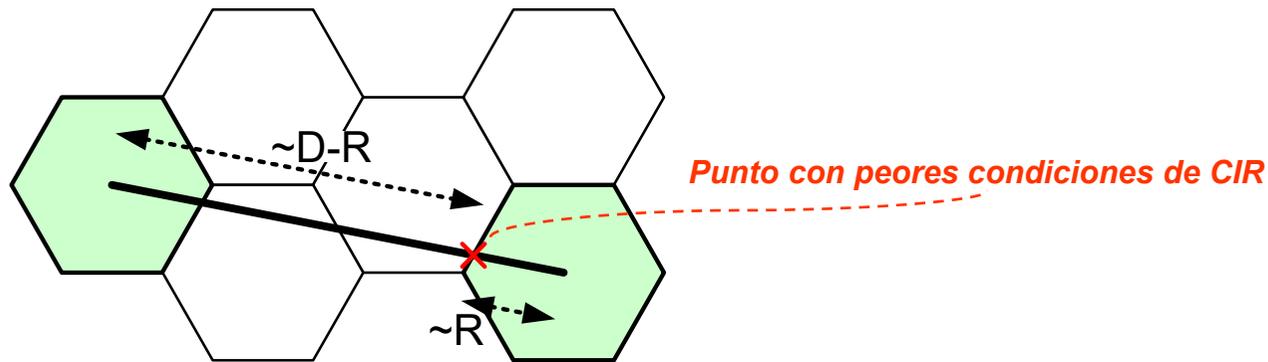
$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-\gamma}}{\sum_n D_n^{-\gamma}}$$

- Teselación hexagonal
  - Sólo se considerará la primera corona interferente
  - Hay 6 células interferentes
- Se asume que  $D_n$  es la misma para todas las células interferentes, igual a la distancia de reuso

$$\begin{aligned} \frac{C}{I} &= \frac{R^{-\gamma}}{\sum_n D_n^{-\gamma}} = \frac{R^{-\gamma}}{6 \cdot (D)^{-\gamma}} = \frac{1}{6} \left( \frac{D}{R} \right)^{\gamma} \\ &= \frac{1}{6} Q^{\gamma} = \frac{1}{6} (\sqrt{3N})^{\gamma} \end{aligned}$$

# Cálculo de la interferencia co-canal

- En el peor caso, la distancia interferente es, aproximadamente,  $D-R$

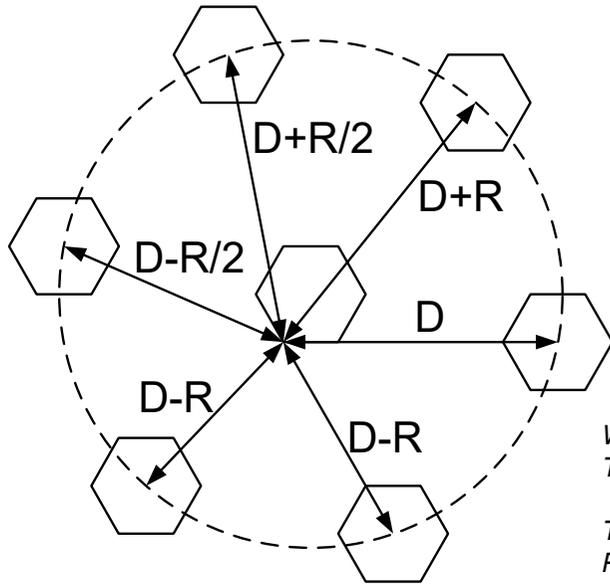


- Asumiendo que todas las BS están a la misma distancia, se tendría...

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-\gamma}}{\sum_n D_n^{-\gamma}} = \frac{R^{-\gamma}}{6 \cdot (D-R)^{-\gamma}} = \frac{1}{6} \left( \frac{D-R}{R} \right)^{\gamma} = \frac{1}{6} \left( \frac{D}{R} - 1 \right)^{\gamma} = \frac{1}{6} (Q-1)^{\gamma} = \frac{1}{6} (\sqrt{3N}-1)^{\gamma}$$

- Se trata de una aproximación pesimista, ya que asume la peor de las condiciones para todas las células interferentes: Diseño conservador

# Cálculo de la interferencia co-canal



- Hay otras aproximaciones menos pesimistas
  - Se calcula la interferencia de las diferentes estaciones base (1ª corona) cuando el móvil se sitúa en el vértice de la célula bajo análisis
  - Las distancias con las BS interferentes se aproximan tal y como se muestra en la figura

*William C. Y. Lee, "Elements of Cellular Mobile Radio Systems" IEEE Transactions on Vehicular Technology. Vol VT-35, no 2. Mayo 1986*

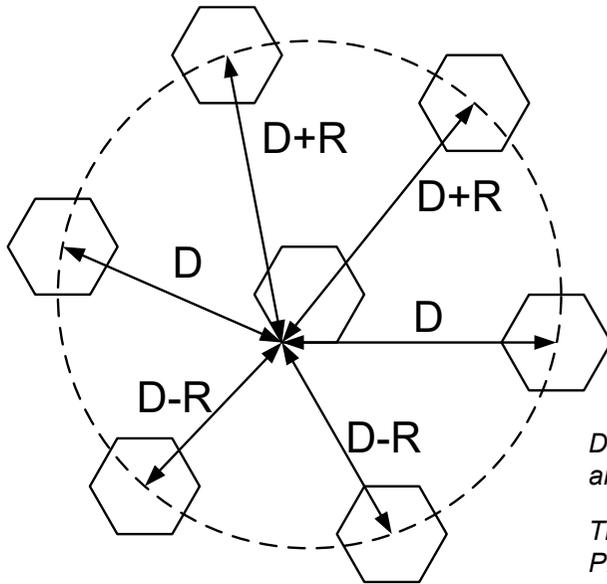
*Theodore S. Rappaport, "Wireless Communications: Principles & Practice" Prentice Hall (1ª edición)*

▪ Fórmula de Lee:

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-\gamma}}{\sum_n D_n^{-\gamma}} = \frac{R^{-\gamma}}{2 \cdot (D-R)^{-\gamma} + D^{-\gamma} + (D+R)^{-\gamma} + \left(D - \frac{R}{2}\right)^{-\gamma} + \left(D + \frac{R}{2}\right)^{-\gamma}} = \frac{1}{2 \cdot (Q-1)^{-\gamma} + Q^{-\gamma} + (Q+1)^{-\gamma} + \left(Q - \frac{1}{2}\right)^{-\gamma} + \left(Q + \frac{1}{2}\right)^{-\gamma}}$$

# Cálculo de la interferencia co-canal

- Mejora de la fórmula de Lee:



$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-\gamma}}{\sum_n D_n^{-\gamma}} = \frac{R^{-\gamma}}{2 \cdot (D-R)^{-\gamma} + 2 \cdot D^{-\gamma} + 2 \cdot (D+R)^{-\gamma}} = \frac{1}{2 \cdot (Q-1)^{-\gamma} + 2 \cdot Q^{-\gamma} + 2 \cdot (Q+1)^{-\gamma}}$$

*Dharma P. Agrawal, Qing-An Zeng. "Introduction to Wireless and Mobile Systems" Thomson Brooks/Cole*

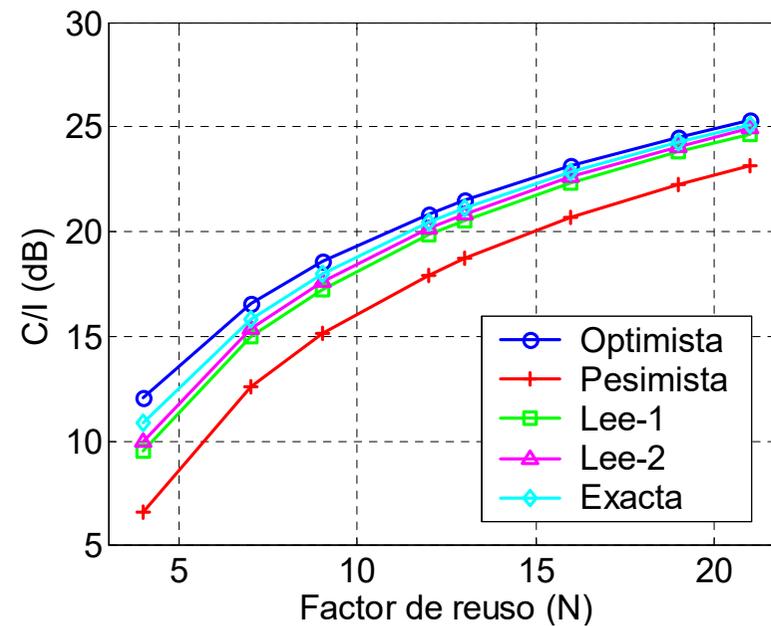
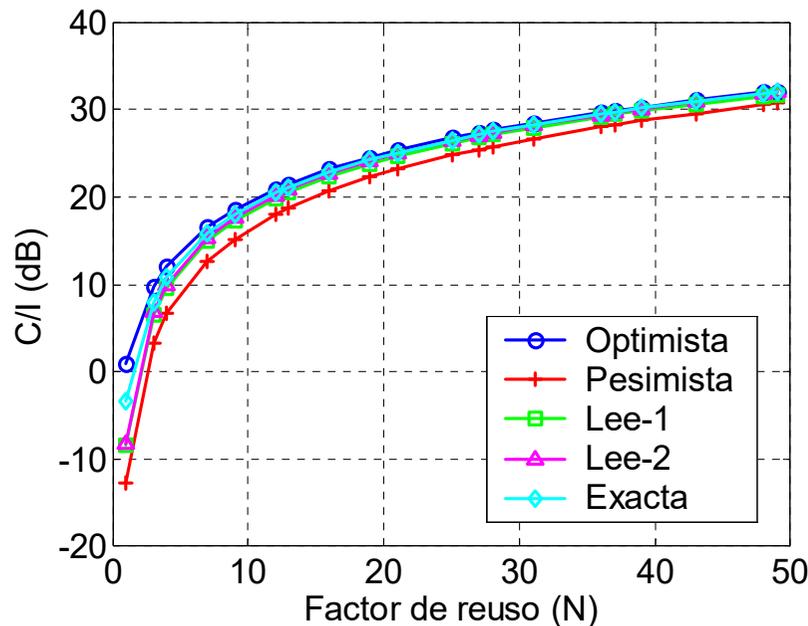
*Theodore S. Rappaport, "Wireless Communications: Principles & Practice" Prentice Hall (2ª edición)*

- Utilizando geometría hexagonal es posible encontrar una solución exacta para la C/I cuando el móvil está en un vértice de la célula<sup>(1)</sup>
- También es posible realizar análisis estadísticos de la C/I (C e I se tratan como variables aleatorias)

<sup>(1)</sup> José María Hernando Rábanos, "Comunicaciones Móviles". Centro de Estudios Ramón Areces (2ª edición)

# Cálculo de la interferencia co-canal

- Valores de C/I para  $\gamma = 3.7$ 
  - La aproximación optimista se comportante razonablemente bien
  - La opción pesimista (diseño conservador) se puede emplear para tener en cuenta un margen de seguridad



# Contenidos

- Introducción a las comunicaciones móviles
- El concepto celular: reuso de frecuencias
- Interferencia co-canal
- Eficiencia: sectorización y división celular
- Traspasos o *handovers*

# Eficiencia en sistemas celulares

- La idea es tratar de mejorar el comportamiento de los sistemas móviles celulares
- Aparecen diferentes posibilidades para una superficie (S) y ancho de banda total (B<sub>T</sub>) dados
  - Incrementar K: añadir más canales, reduciendo el ancho de banda por canal
  - Aumentar N<sub>C</sub>: disminuyendo el tamaño por célula
  - Disminuir N (factor de reuso)
    - Reducir el requerimiento de C/I mínimo necesario (modulaciones digitales)
    - Emplear antenas directivas (sectorización)

- Eficiencia

$$\eta_c = \frac{K/N}{S/N_C} \frac{1}{B_T} = \frac{K}{S} \frac{1}{B_T} \frac{N_C}{N} = \eta \frac{N_C}{N}$$

[canales / km<sup>2</sup> · Hz]

- K: # de canales (B<sub>T</sub>/B<sub>R</sub>)
- S: Superficie
- B<sub>T</sub>: Ancho de banda total
- B<sub>R</sub>: Ancho de banda de cada canal
- N: factor de reuso
- N<sub>C</sub>: # total de células

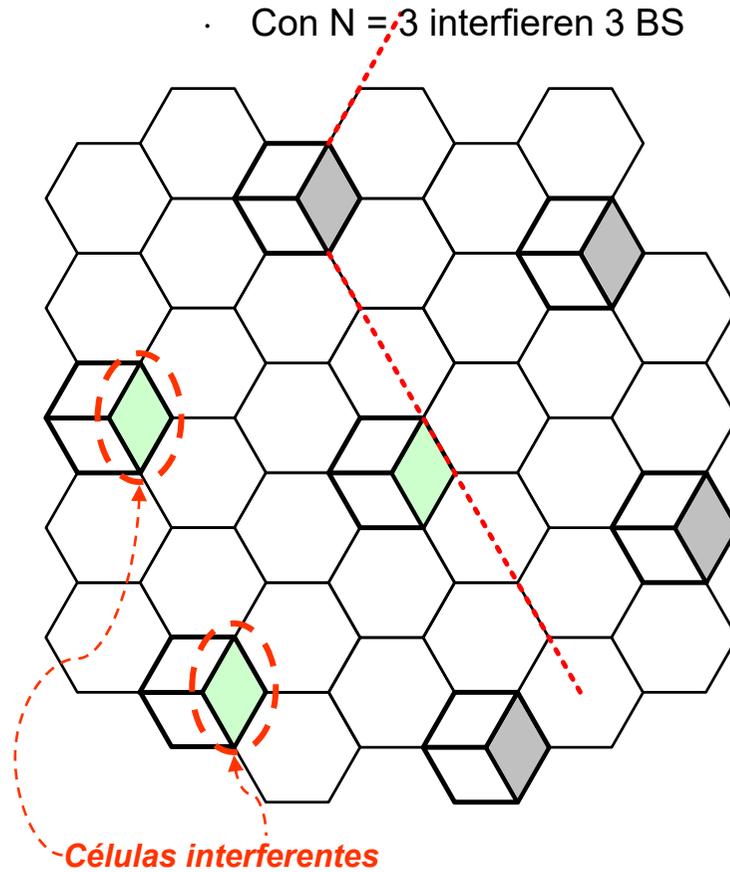
# Sectorización

- Esta técnica se emplea desde los primeros despliegues de sistemas de telefonía celular
- Consiste en emplear antenas directivas en lugar de omnidireccionales, con lo que se consigue reducir la C/I (hay menos señales interferentes)
- Las configuraciones más habituales son sectorización a 120° y a 60°
- Este método presenta ciertas desventajas
  - Se necesita un número mayor de antenas por estación base
  - Al reducir el tamaño 'real' de las células, incrementa el número de handovers
    - Hay sistemas que consiguen reducir la penalización de los traspasos entre dos sectores de una misma BS
  - Al reducirse el número de recursos por célula, disminuye la eficiencia (desde el punto de vista de los operadores)
- Sistemas reales
  - Analógicos (C/I > 18 dB): N = 12 ó N = 7 con sectorización a 120°
  - Digitales, GSM (C/I > 11 dB): N = 4/3 y sectorización a 120°

# Sectorización

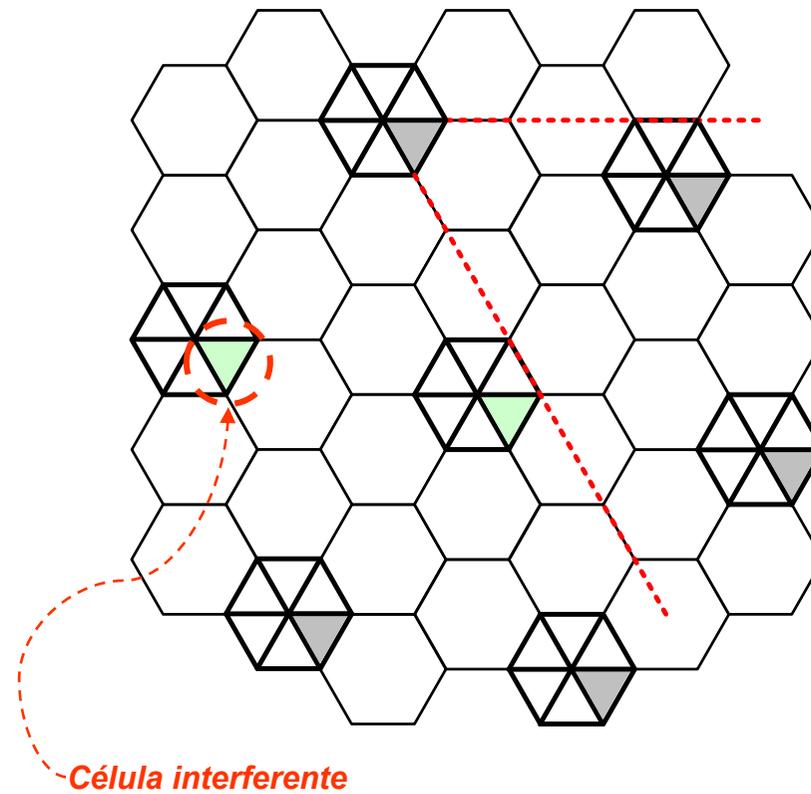
- Sectorización a 120°

- Hay dos BS interferentes
  - Con  $N = 3$  interfieren 3 BS

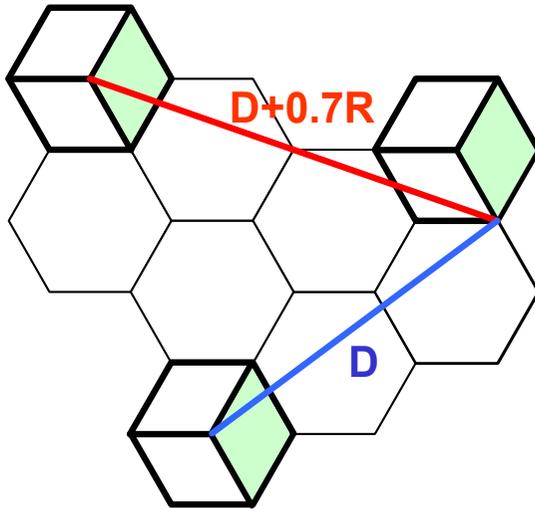


- Sectorización a 60°

- Sólo hay una BS interferente
  - Con  $N = 3$  interfieren 2 BS



# Sectorización a 120°



- Distancias de las BS interferentes: aproximadamente D y D + 0.7R<sup>(2)</sup>
  - En (1) Lee asume que las dos BS están a distancia D + R/2

(1) William C. Y. Lee, "Elements of Cellular Mobile Radio Systems" IEEE Transactions on Vehicular Technology. Vol VT-35, no 2. Mayo 1986

(2) Dharma P. Agrawal, Qing-An Zeng. "Introduction to Wireless and Mobile Systems" Thomson Brooks/Cole

- Las dos BS interferentes están a D:

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{2} \left( \frac{D}{R} \right)^\gamma = \frac{1}{2} Q^\gamma = \frac{1}{2} (\sqrt{3N})^\gamma$$

- Peor caso (BS interferentes están a D-R):

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{2} \left( \frac{D-R}{R} \right)^\gamma = \frac{1}{2} (Q-1)^\gamma = \frac{1}{2} (\sqrt{3N}-1)^\gamma$$

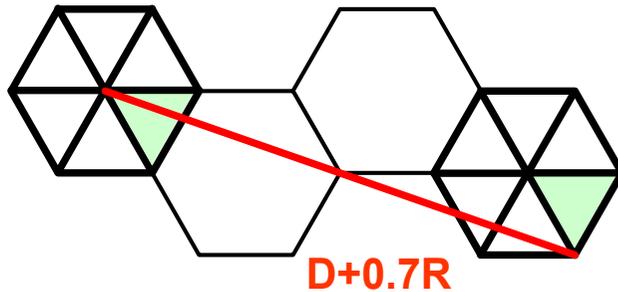
- Fórmula de Lee inicial<sup>(1)</sup>:

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{2} (Q+0.5)^\gamma = \frac{1}{2} (\sqrt{3N}+0.5)^\gamma$$

- Fórmula de Lee mejorada (figura):

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{(Q+0.7)^{-\gamma} + Q^{-\gamma}}$$

## Sectorización a 60°



- Distancia aproximada de la única BS interferente:  $D + 0.7R^{(1)}$

- La BS interferente está a distancia  $D$ :

$$\frac{C}{I} = \left(\frac{D}{R}\right)^\gamma = Q^\gamma = (\sqrt{3N})^\gamma$$

- Peor caso (BS interferente a  $D-R$ ):

$$\frac{C}{I} = \left(\frac{D-R}{R}\right)^\gamma = (Q-1)^\gamma = (\sqrt{3N}-1)^\gamma$$

- Fórmula de Lee<sup>(1)</sup>:

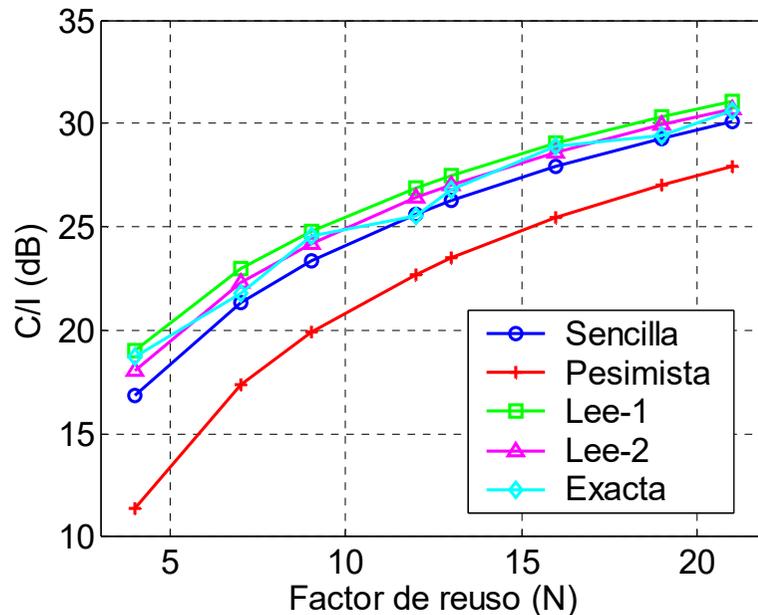
$$\frac{C}{I} = (Q+0.7)^\gamma = (\sqrt{3N}+0.7)^\gamma$$

(1) William C. Y. Lee, "Elements of Cellular Mobile Radio Systems" IEEE Transactions on Vehicular Technology. Vol VT-35, no 2. Mayo 1986

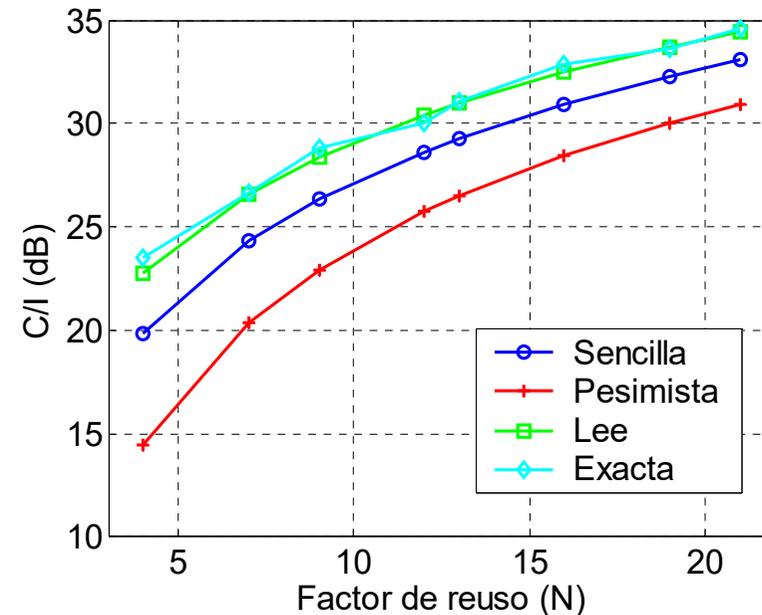
# Sectorización

- Valores de C/I para  $\gamma = 3.7$ 
  - El valor 'exacto' no tiene en cuenta la ganancia relativa de las antenas para los diferentes ángulos de incidencia
  - La aproximación de asumir que las BS interferentes están a la distancia de reuso parece razonable

Sectorización a 120°



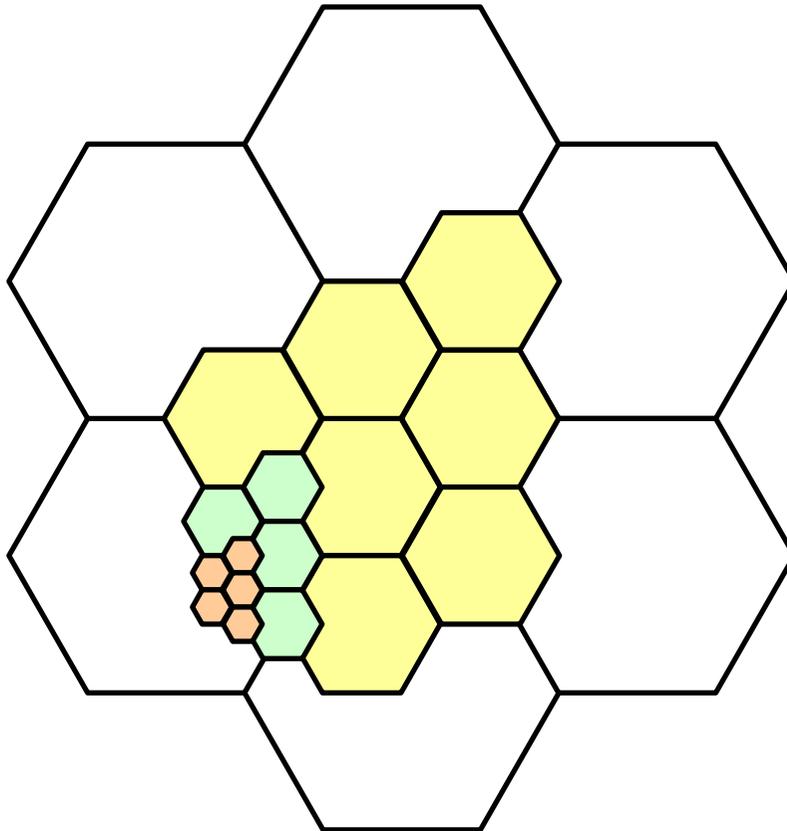
Sectorización a 60°



## División celular (*Cell Splitting*)

- Se subdivide una célula congestionada en otras más pequeñas (*microcélulas*)
- No cambia la relación D/R
- Se necesita reducir la potencia de las nuevas células
  - A veces se modifica el patrón de radiación de las antenas: *downtilting*
- La división celular presenta el inconveniente de localizar nuevos emplazamientos
- Además complica la asignación de canales
- Se suele llevar a cabo una vez realizada la sectorización

# Tipos de células



- **Macrocélula**
  - Radios entre 1.5 y 20 km
  - Zonas de baja densidad (rurales)
- **Minicélula**
  - Radios ente 0.5 y 1.5 km
  - Zonas de densidad media (núcleos urbanos de importancia media)
- **Microcélula**
  - Radios de 0.2 a 0.5 km
  - Zonas de densidad alta (núcleos urbanos)
- **Picocélula**
  - Radios < 250 m
  - Zonas interiores con gran densidad (aeropuertos, etc)

# Contenidos

- Introducción a las comunicaciones móviles
- El concepto celular: reuso de frecuencias
- Interferencia co-canal
- Eficiencia: sectorización y división celular
- Traspasos o *handovers*

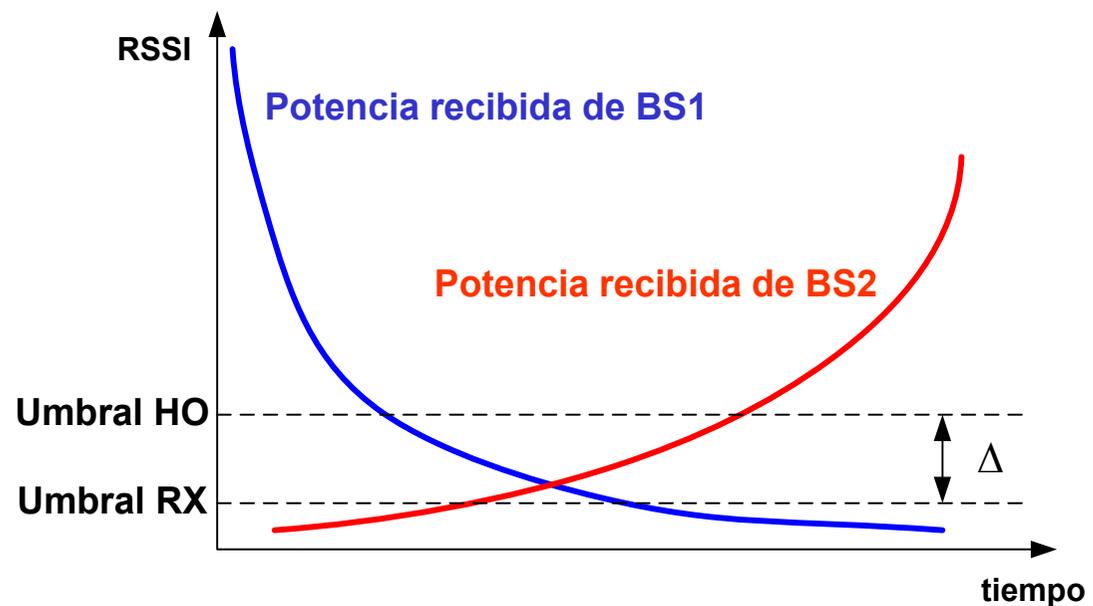
## ¿Qué son los *handovers*?<sup>(1)</sup>

- Proceso de transferir una llamada en curso entre dos células cuando el móvil se desplaza
- Cuando la calidad del enlace con la BS actual baja, la comunicación pasa:
  - A una nueva célula (*inter-cell handover*)
  - A otro canal de la misma BS (*intra-cell handover*)
- Hay varios parámetros que se pueden utilizar para caracterizar la calidad de los enlaces
  - RSSI (Received Signal Strength Indicator)
  - BER (Bit Error Rate)
  - C/I
  - Carga (Tráfico actual)
  - ...
- Depende de la posibilidad de medida del sistema
- Puede no ser suficiente realizar medidas puntuales

(1) A veces también se les denomina **Handoffs**

## Realización de *handovers*

- Los *handovers* (HO) deben realizarse de manera automática, sin la intervención directa del usuario
- Llevan asociado un incremento de la señalización y consumen tiempo
- Seleccionar un umbral a partir del cual iniciar el proceso de traspaso
  - Normalmente se selecciona un valor ligeramente superior al mínimo necesario para que una comunicación sea factible:  $\text{Umbral HO} = \text{Umbral RX} + \Delta$
- Si  $\Delta$  es grande: se producirían un número elevado (innecesario) de traspasos
- Si  $\Delta$  es pequeño: habría poco tiempo para completar el traspaso antes de alcanzar el umbral de RX



# Tipos de *handovers*

- Puede haber diferentes clasificaciones de los trasposos; la más habitual atiende a la entidad que toma la decisión de realizar el HO
- Network Controlled HandOff (NCHO)
  - La red es la que tiene la responsabilidad completa en el proceso de traspaso
  - También se encarga de realizar las medidas para conocer la calidad de los enlaces
  - Se utilizó en los sistemas celulares de 1ª generación: AMPS, NMT, TACS
- Mobile Assisted HandOff (MAHO)
  - Para reducir la responsabilidad de la red, el móvil se encarga de monitorizar el estado de los enlaces
  - Envío periódico de la información a la red
  - Se emplea en los sistemas celulares de 2ª generación: GSM, IS-95
- Mobile Controlled HandOff (MCHO)
  - El móvil controla completamente el proceso de traspaso
  - La red puede enviar medidas de calidad a los terminales
  - Se emplea en sistemas de telefonía sin hilos (DECT)

## Medidas de rendimiento

- Probabilidad de bloqueo de nuevas llamadas
- Probabilidad de bloqueo de un traspaso
  - Terminación anómala de una llamada
- Probabilidad de realizar un traspaso
  - Tasa de cruce de fronteras entre células
- Tasa de HO por unidad de tiempo
  - La probabilidad de HO se puede determinar a partir de este parámetro y de la duración media de la llamada
- Probabilidad de HO no necesarios
- Retardo entre el momento en el que se inicializa y se completa el HO

## Estrategias en los *handovers*

- Hay sistemas que tratan las peticiones de traspaso como si fuera una nueva llamada
  - En este caso la probabilidad de no aceptar un HO es igual a la de bloqueo de nuevas peticiones
- Otros sistemas priorizan los HO
  - Se considera que para el usuario es más molesto el terminar una llamada de manera abrupta una vez que ha comenzado
  - **Canal de guarda** (*Guard channel*)
    - Una fracción de los recursos totales se reserva únicamente para las peticiones de HO
    - El resto de recursos se emplea tanto para las nuevas llamadas como para los HO
    - Incrementa la probabilidad de bloqueo de nuevas llamadas
    - Se puede emplear con esquemas de gestión dinámica de recursos
  - **Encolamiento de traspasos** (Queuing of handoffs)
    - Se mantienen las peticiones en el sistema (cuando no hay recursos) durante cierto tiempo
    - Se puede llevar a cabo en el intervalo que va desde el Umbral\_HO hasta el Umbral\_RX