

# **Fundamentos de Redes de Datos**

2º Grado en Ciencia e Ingeniería de Datos

## **Capítulo 3**

### **Capa de red**

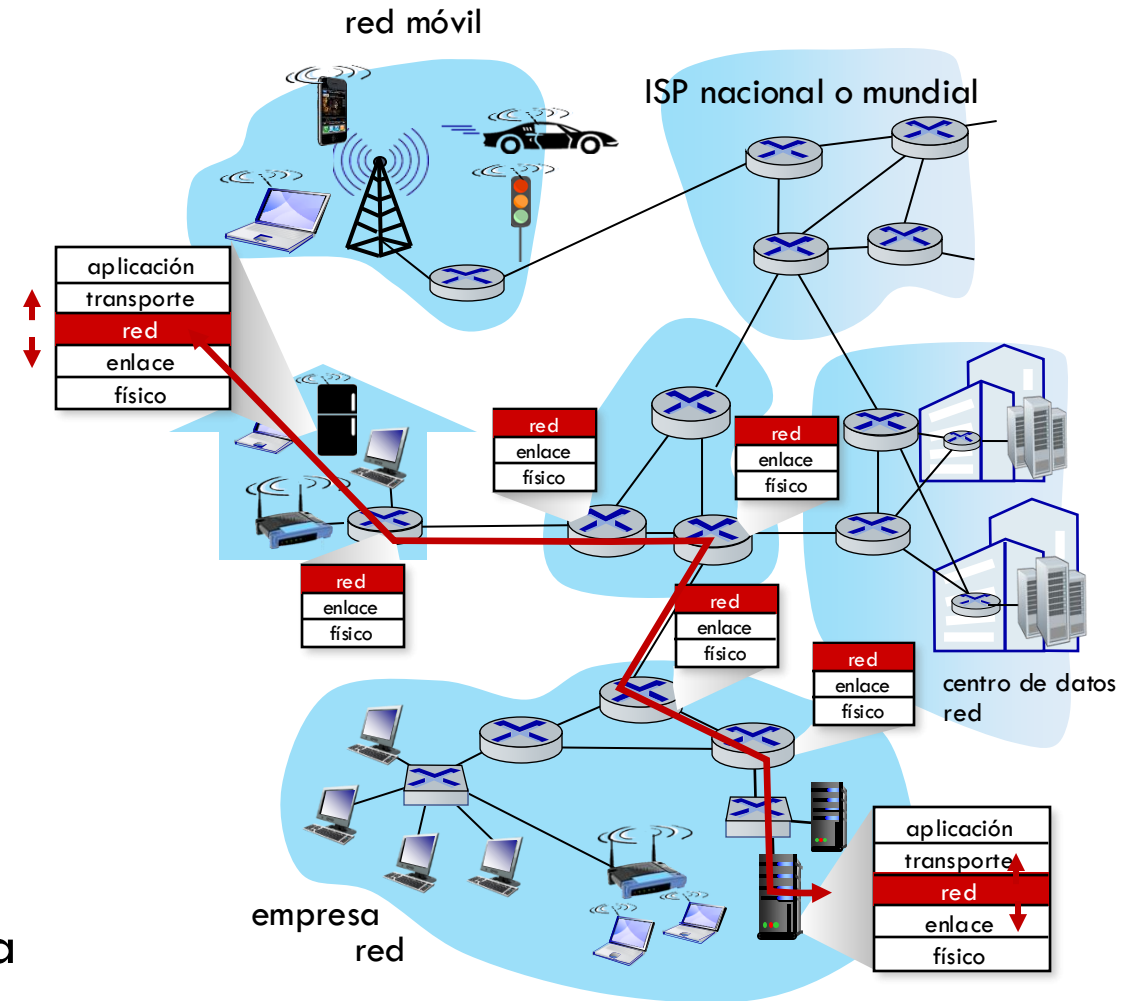
# Capítulo 3: Capa de red

## Contenidos:

- Capa de red: visión general
- Qué hay dentro de un router
- IP: Protocolo de Internet
- NAT: Traducción de direcciones de red
- ICMP: protocolo de mensajes de control de Internet
- Plano de control y encaminamiento
- Enfoque SDN

# Servicios y protocolos de la capa de red

- segmento de transporte desde el host emisor al receptor
  - **emisor:** encapsula segmentos en datagramas, los pasa a la capa de enlace
  - **receptor:** entrega segmentos al protocolo de la capa de transporte
- protocolos de capa de red en **todos los dispositivos de Internet:** hosts, routers
- **routers:**
  - examina los campos de cabecera de todos los datagramas IP que pasan por él
  - mueve datagramas de puertos de entrada a puertos de salida para transferir datagramas a lo largo de la ruta final



# Dos funciones clave de la capa de red

## funciones de la capa de red:

- **reenvío:** mover paquetes del enlace de entrada de un enrutador al enlace de salida del enrutador apropiado
- **encaminamiento:** determinar la ruta que siguen los paquetes desde el origen hasta el destino
  - algoritmos de enrutamiento

## analogía: hacer un viaje

- **reenvío:** proceso de pasar a través de un único intercambio
- **encaminamiento:** proceso de planificación del viaje desde el origen hasta el destino



reenvío

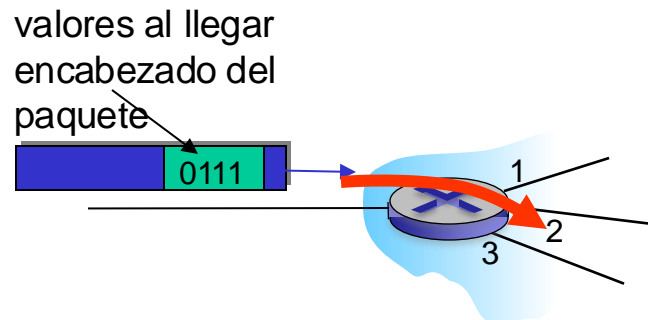


enrutamiento

# Capa de red: planos de datos y de control

## Plano de datos:

- función *local* por enrutador
- determina cómo se reenvía el datagrama que llega al puerto de entrada del enrutador al puerto de salida del enrutador



## Plano de control

- lógica de *red*
- determina cómo se encamina el datagrama entre los routers a lo largo de la ruta final desde el host de origen al host de destino
- dos enfoques de plano de control:
  - algoritmos de encaminamiento tradicionales: se aplican en los encaminadores
  - redes definidas por software (SDN): implantadas en servidores (remotos)

# Modelo de servicio de red

**P:** ¿Qué **modelo de servicio** de "canal" transporta datagramas del emisor al receptor?

**servicios de ejemplo para datagramas *individuales*:**

- entrega garantizada
- entrega garantizada con menos de 40 ms de retraso

**servicios de ejemplo para un *flujo* de datagramas:**

- entrega de datagramas en orden
- ancho de banda mínimo garantizado
- restricciones a los cambios en la separación entre paquetes

# Modelo de servicio en la capa de red

Red Arquitectura	Servicio Modelo	Garantías de calidad de servicio (QoS) ?		
		Ancho de banda	Contra Pérdida	Temporización
Internet	mejor esfuerzo	ninguno	no	no

## Modelo de servicio de "mejor esfuerzo" en Internet

**Sin** garantías:

- i. entrega satisfactoria del datagrama al destino
- ii. calendario u orden de entrega
- iii. ancho de banda disponible para el flujo final

# Reflexiones sobre el servicio best-effort:

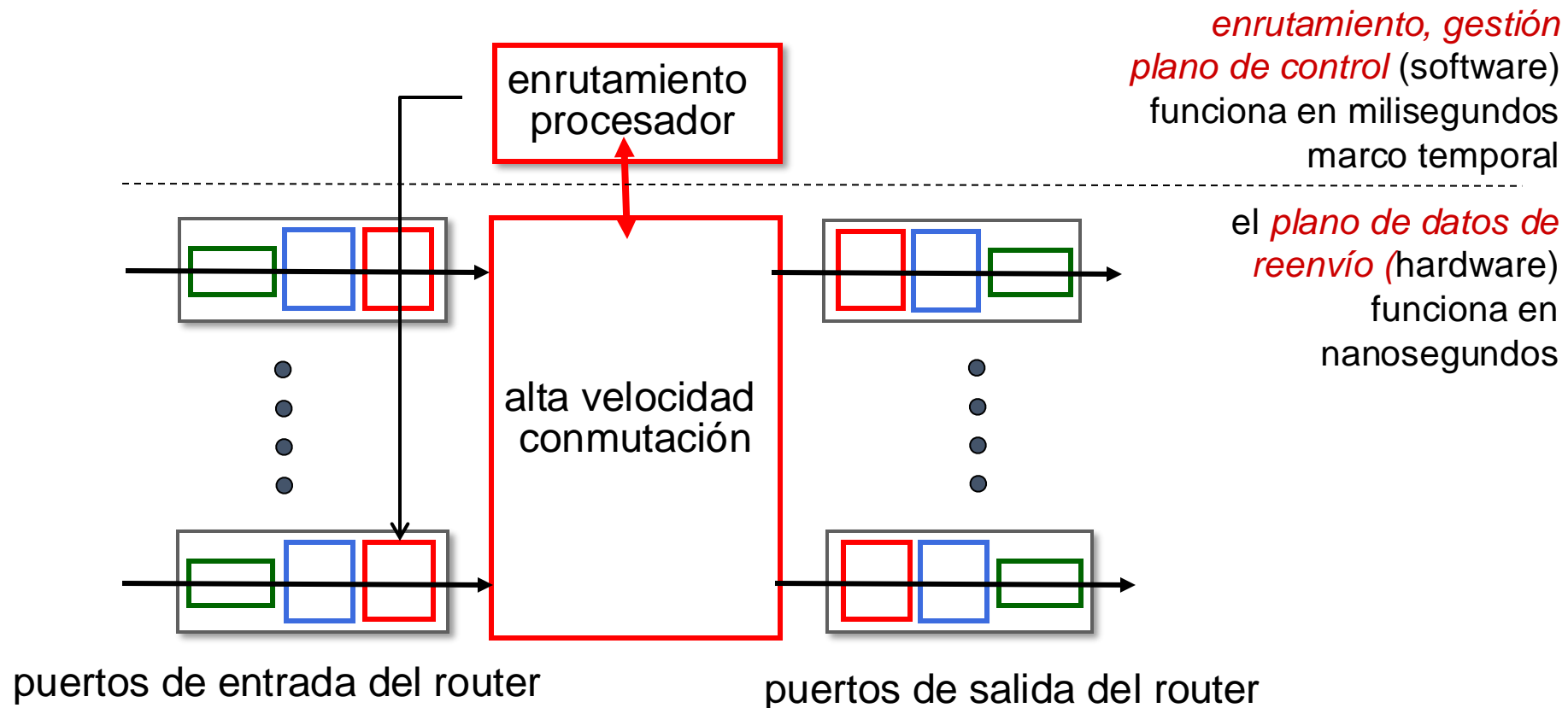
- La **simplicidad del mecanismo** ha permitido que Internet se adopte ampliamente
- una **dotación suficiente de ancho de banda** permite que el rendimiento de las aplicaciones en tiempo real (por ejemplo, voz interactiva, vídeo) sea "suficientemente bueno" durante "la mayor parte del tiempo"
- **servicios distribuidos replicados en la capa de aplicación** (centros de datos, redes de distribución de contenidos) que se conectan cerca de las redes de los clientes, permiten prestar servicios desde múltiples ubicaciones
- Control de la congestión de los servicios "elásticos"

**Es difícil discutir el éxito del modelo de servicio best-effort**



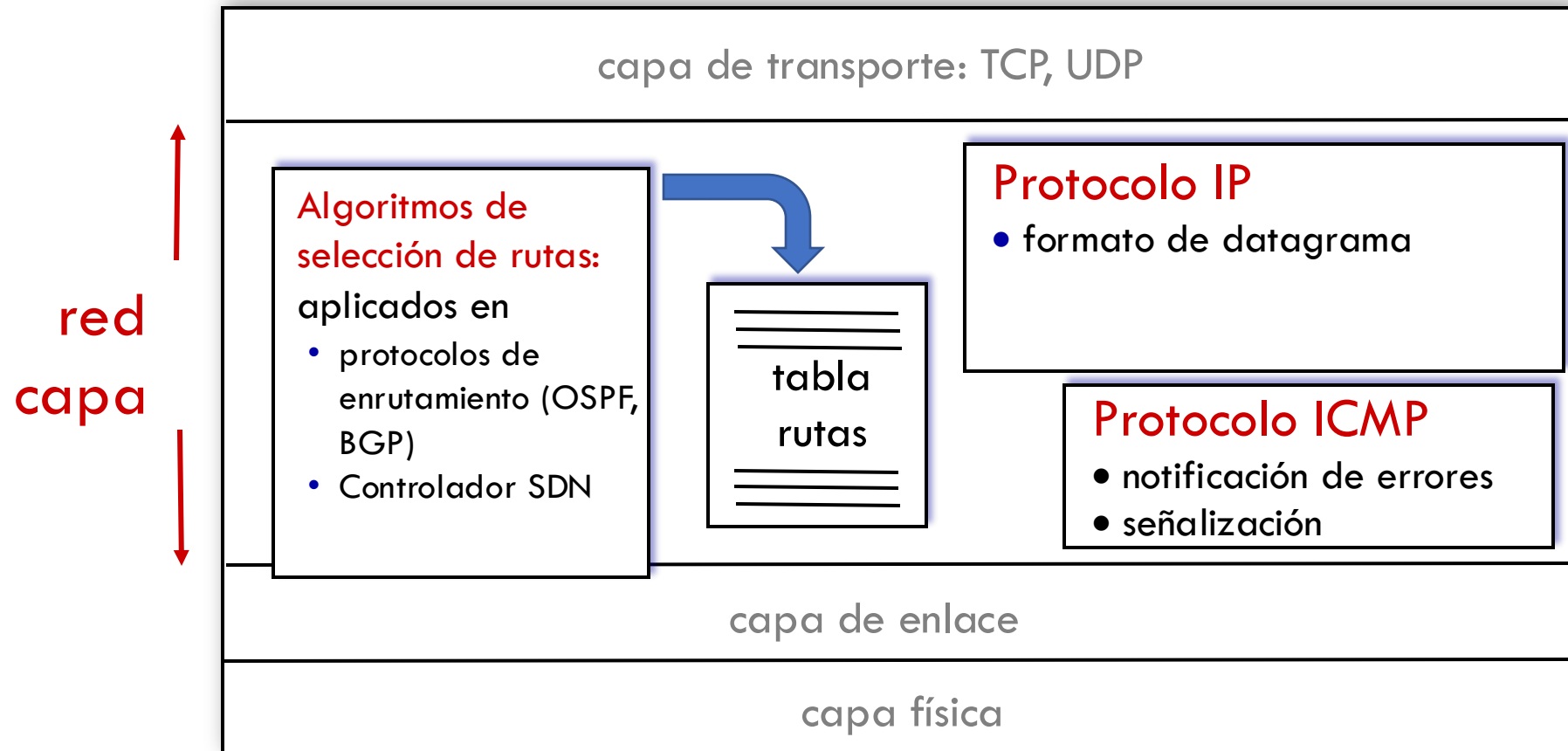
# Visión general de la arquitectura del router

vista de alto nivel de la arquitectura genérica del router:

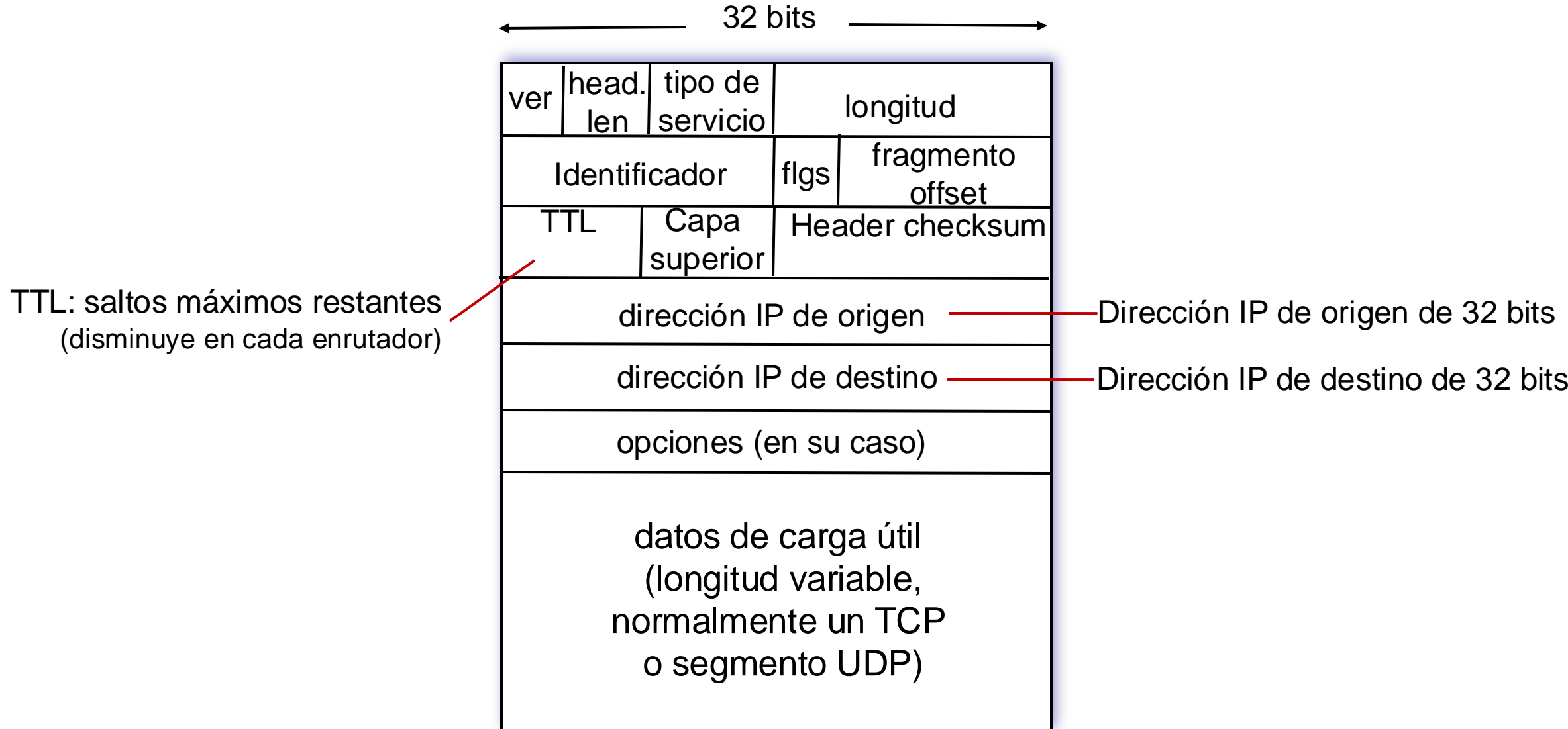


# Capa de red: Internet

Funciones de la capa de red (para hosts o routers):



# Formato de datagrama IP



# Direccionamiento IP

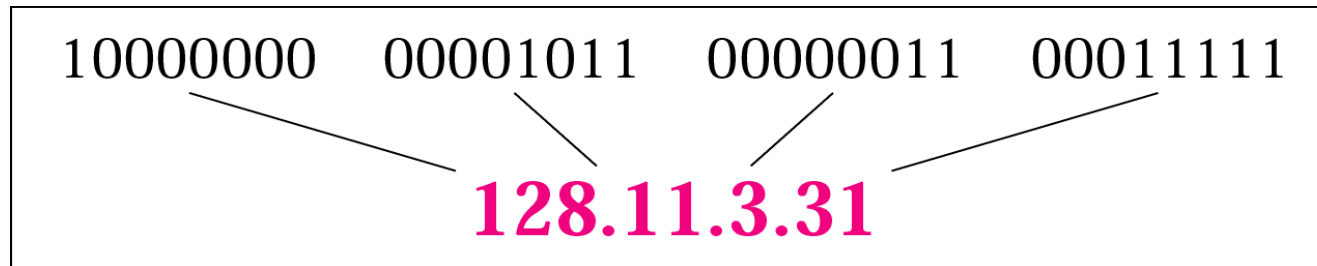
## ■ Interfaces

- Un host puede estar conectado a distintas redes
  - Ejemplo: conexiones Ethernet, WiFi y teléfono móvil
- La conexión entre un host y el medio físico recibe el nombre de interfaz
- Un router tiene tantas interfaces como enlaces físicos a los que esté conectado (dos como mínimo)
- El protocolo IP requiere que cada interfaz disponga de su propia dirección IP
- Debemos pensar en una dirección IP como un identificador de una interfaz y no del equipo al que pertenece la interfaz

# Direccionamiento IP

## ■ Direccionamiento IP

- Cada interfaz de red tiene asignada una dirección IP de 32 bits
- La dirección IP suele expresarse como 4 números entre 0 y 255 separados por puntos:

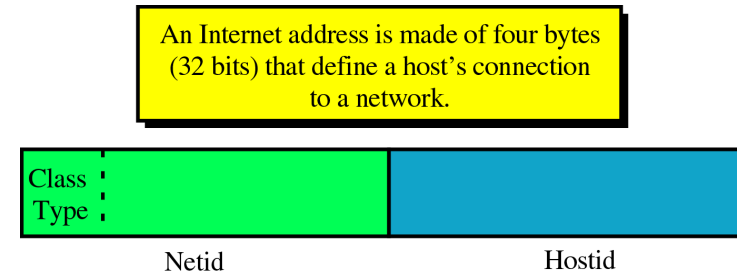


- Las direcciones IP públicas son únicas
- ICANN (Internet Corporation for Assigned Names and Numbers): organismo que asigna las direcciones IP

# Direccionamiento IP

## ■ La dirección IP se compone de dos partes:

- Dirección de red (netid)
  - Clase de dirección
- Dirección de host (hostid)



## ■ Direcciones especiales (no se usan para hosts):

- Dirección de red (hostid es 0s)
- Dirección de broadcast (hostid es 1s)

### Dirección IP

NETID.00...00

NETID.1 1...1 1

### Significado

Dirección de la red

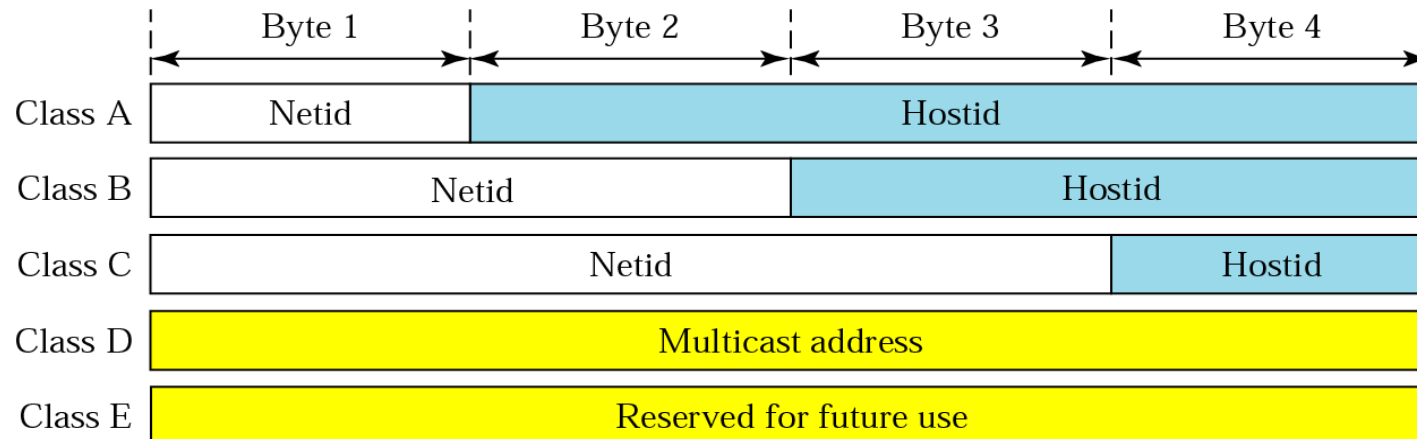
Emisión de la red

# Direccionamiento IP

## ■ Direccionamiento por clases

- Clases de direcciones:

	First byte	Second byte	Third byte	Fourth byte
Class A	0			
Class B	10			
Class C	110			
Class D	1110			
Class E	1111			



# Direccionamiento IP

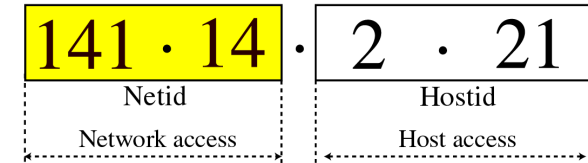
- CIDR (Enrutamiento entre dominios sin clases)
  - Esquema de direccionamiento IP que permite un mayor aprovechamiento del espacio de direcciones IP
  - Cada dirección IP se expresa como a.b.c.d/x siendo x el número de bits de la máscara de red
    - Máscara de red (netid y subnetid a 1, y hostid a 0)
  - Con CIDR, los routers deben almacenar también la máscara de red porque no es posible deducirla de la clase de las direcciones



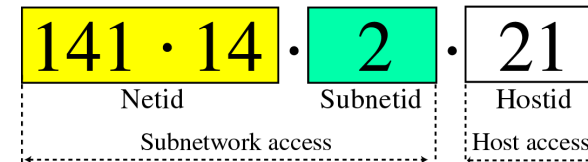
# Direccionamiento IP

## ■ Direccionamiento IP

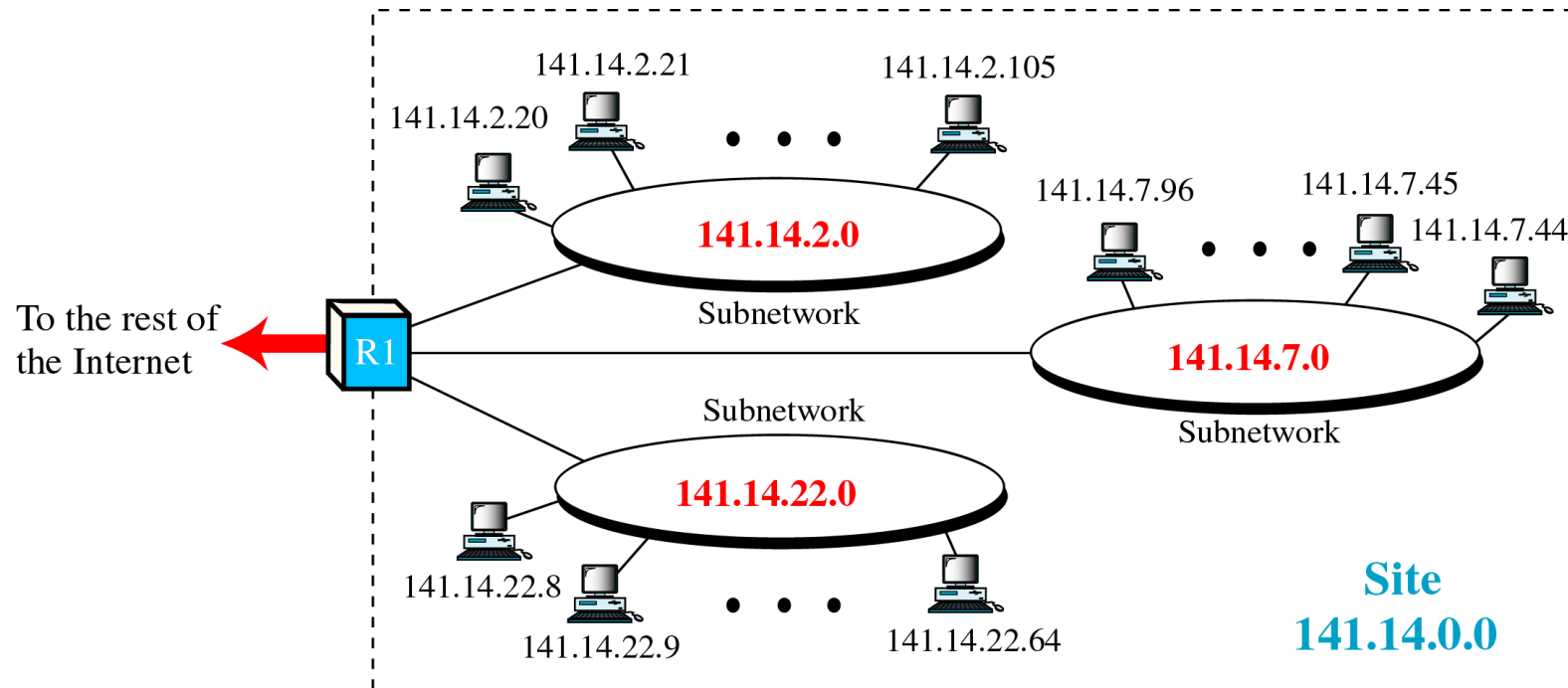
- Con CIDR
  - Dirección Clase B con subnetting
    - Hosts en tres subredes IP distintas



a. Without subnetting



b. With subnetting



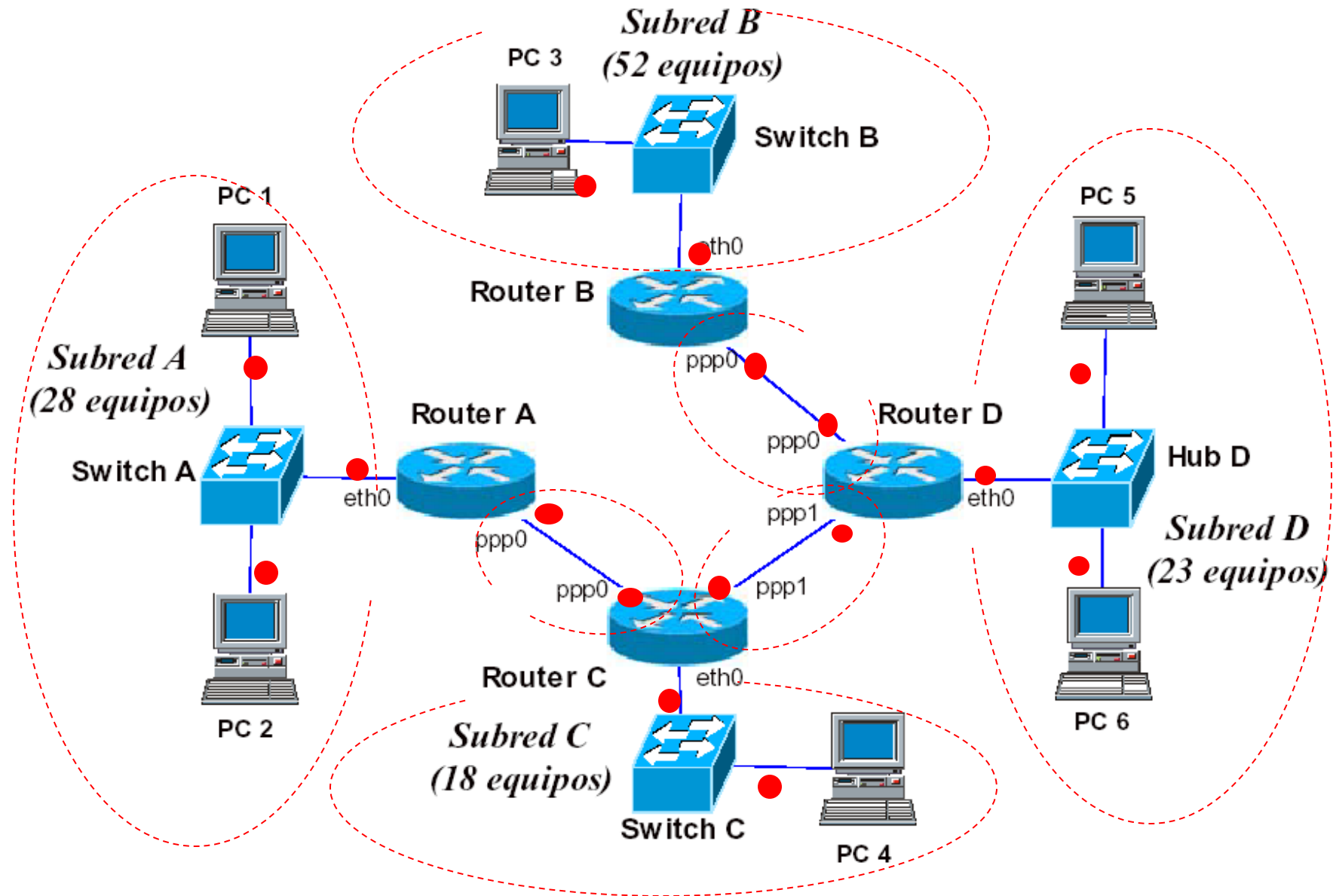
# Direccionamiento IP

- La configuración de un host consta de tres valores principales:
  - Dirección IP del host
  - Máscara de subred
  - Dirección IP de un router (router por defecto o gateway)
- La especificación de estos valores puede realizarse mediante dos alternativas:
  - Mediante configuración manual hecha por un administrador
  - Mediante DHCP (Protocolo de configuración dinámica de host)

# Direccionamiento IP

- Problema. Dada la dirección de red asignada 10.10.10.0/24, asigne una dirección IP a cada una de la subredes e interfaces de la figura, teniendo en cuenta que:
  - El tamaño de las subredes debe ser lo más ajustado posible al número de equipos presentes en la subred
  - Las primeras direcciones de cada subred deben asignarse a los routers de dicha subred

# Direccionamiento IP



# Direccionamiento IP

Subred Interfaces+2 NetId | HostId

A 31 3|5  
B 55 2|6  
C 21 3|5  
D 26 3|5  
RaRc 4 6|2  
RcRd 4 6|2  
RdRb 4 6|2

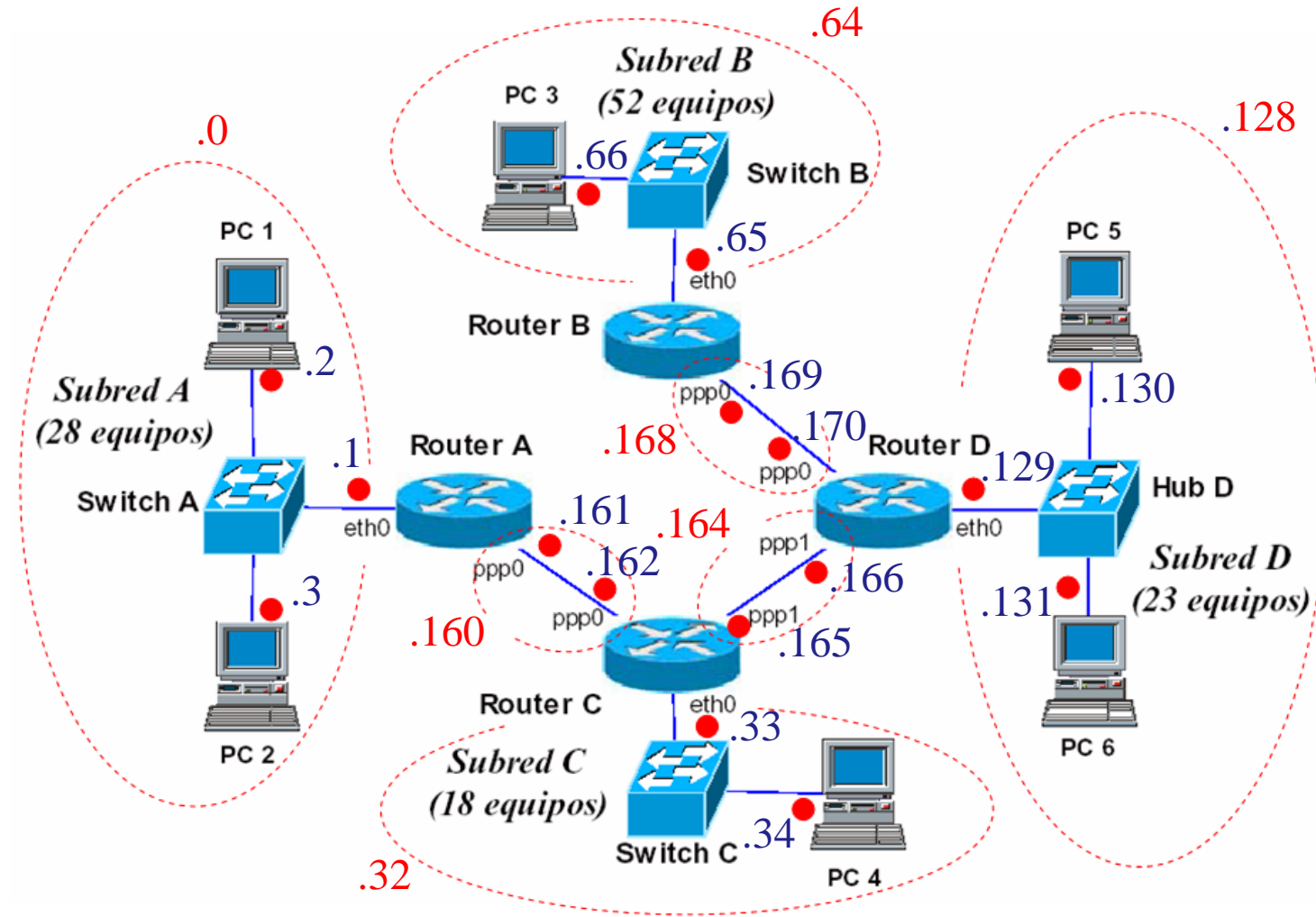
Subred Dirección de red

A 10.10.10.0/27  
B 10.10.10.64/26  
C 10.10.10.32/27  
D 10.10.10.128/27  
Ra-Rc 10.10.10.160/30  
Rc-Rd 10.10.10.164/30  
Rd-Rb 10.10.10.168/30

10.10.10.(000) 00000 = 10.10.10.0/27 Subred A  
10.10.10.(001) 00000 = 10.10.10.32/27 Subred C  
10.10.10.(010) 00000 = 10.10.10.64/26 Subred B

10.10.10.(100) 00000 = 10.10.10.128 Subred D  
10.10.10.(101) 00000 = 10.10.10.160  
Subredes Ra-Rc / Rc-Rd / Rd-Rb

# Direccionamiento IP



# Direcciones IP: ¿cómo conseguir una?

En realidad son **dos** preguntas:

1. P: ¿Cómo obtiene un host la dirección IP dentro de su red?
2. P: ¿Cómo obtiene una red su propia dirección?

¿Cómo obtiene el host la dirección IP?

- codificado por el administrador del sistema en el archivo de configuración (por ejemplo, /etc/rc.config en UNIX)
- **DHCP**: Protocolo de configuración dinámica de host: obtiene dinámicamente la dirección de un servidor.
  - "enchufar y usar"

# DHCP: Protocolo de configuración dinámica de host

**Objetivo:** el host obtiene dinámicamente la dirección IP del servidor de red cuando se "une" a la red.

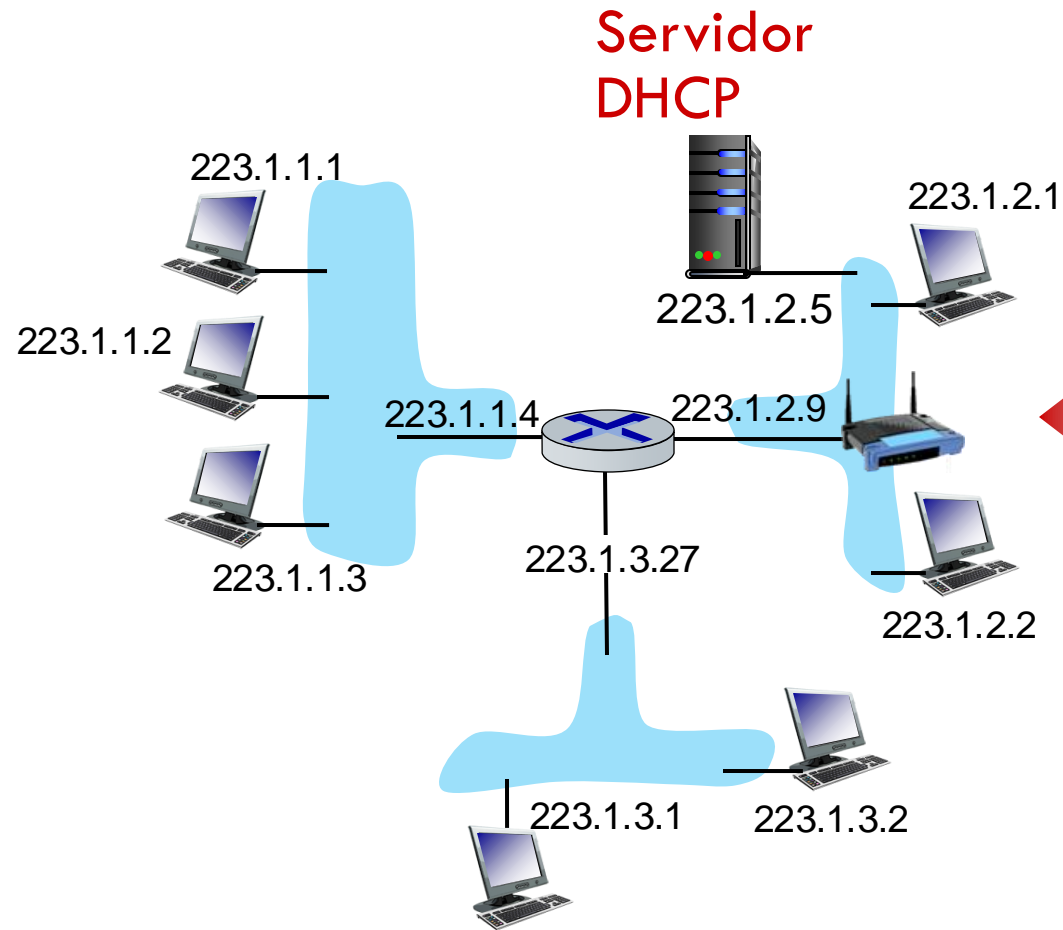
- puede renovar su contrato de arrendamiento de la dirección en uso
- permite la reutilización de direcciones (sólo mantiene la dirección mientras está conectado/encendido)
- apoyo a los usuarios móviles que entran y salen de la red

## Visión general de DHCP:

- host difunde **DHCP discover** msg [opcional]
- El servidor DHCP responde con un mensaje de **oferta DHCP** [opcional].
- El host solicita una dirección IP: Mensaje de **solicitud DHCP**
- El servidor DHCP envía la dirección: **DHCP ack** msg



# Escenario cliente-servidor DHCP



Normalmente, el servidor DHCP estará ubicado en el enrutador y prestará servicio a todas las subredes a las que esté conectado el enrutador.



Llegar **cliente DHCP** necesita dirección en esta red

# Escenario cliente-servidor DHCP

Servidor DHCP: 223.1.2.5



Descubrir DHCP

Difusión: ¿existe un  
servidor DHCP?

Cliente que llega



Oferta DHCP

Difusión: ¡Soy un servidor  
DHCP! Aquí tienes una  
dirección IP que puedes  
utilizar

Solicitud DHCP

Emisión: OK. Me gustaría  
utilizar esta dirección IP.

DHCP ACK

Emisión: OK. Ya tienes la  
dirección IP.

Los dos pasos anteriores  
pueden omitirse "si un  
cliente recuerda y desea  
reutilizar una dirección de  
red previamente asignada"  
[RFC 2131].

# Escenario cliente-servidor DHCP

Servidor DHCP: 223.1.2.5

## Descubrir DHCP

src : 0.0.0.0, 68  
dest.: 255.255.255.255, 67  
yiaddr: 0.0.0.0  
número de transacción: 654

Cliente que llega

## Oferta DHCP

src: 223.1.2.5, 67  
dest: 255.255.255.255, 68  
yiaddr: 223.1.2.4  
número de transacción: 654  
duración: 3600 segundos

## Solicitud DHCP

src: 0.0.0.0, 68  
dest.: 255.255.255.255, 67  
yiaddr: 223.1.2.4  
número de transacción: 655  
duración: 3600 segundos

## DHCP ACK

src: 223.1.2.5, 67  
dest: 255.255.255.255, 68  
yiaddr: 223.1.2.4  
número de transacción: 655  
duración: 3600 segundos

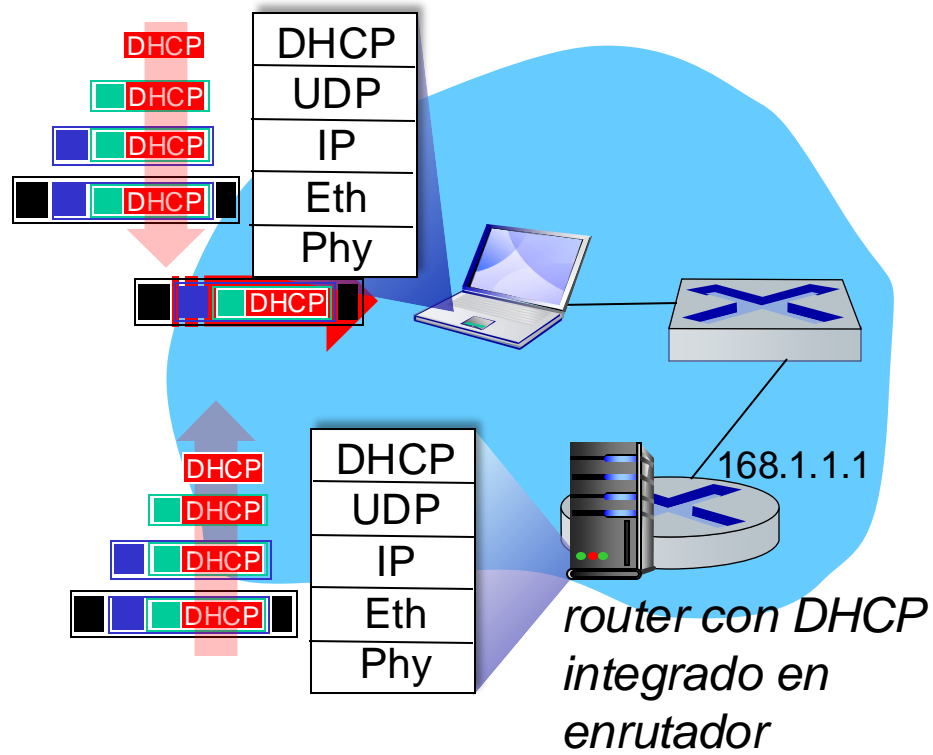
Los dos pasos anteriores pueden omitirse "si un cliente recuerda y desea reutilizar una dirección de red previamente asignada" [RFC 2131].

# DHCP: más que direcciones IP

DHCP puede devolver algo más que la dirección IP asignada en la subred:

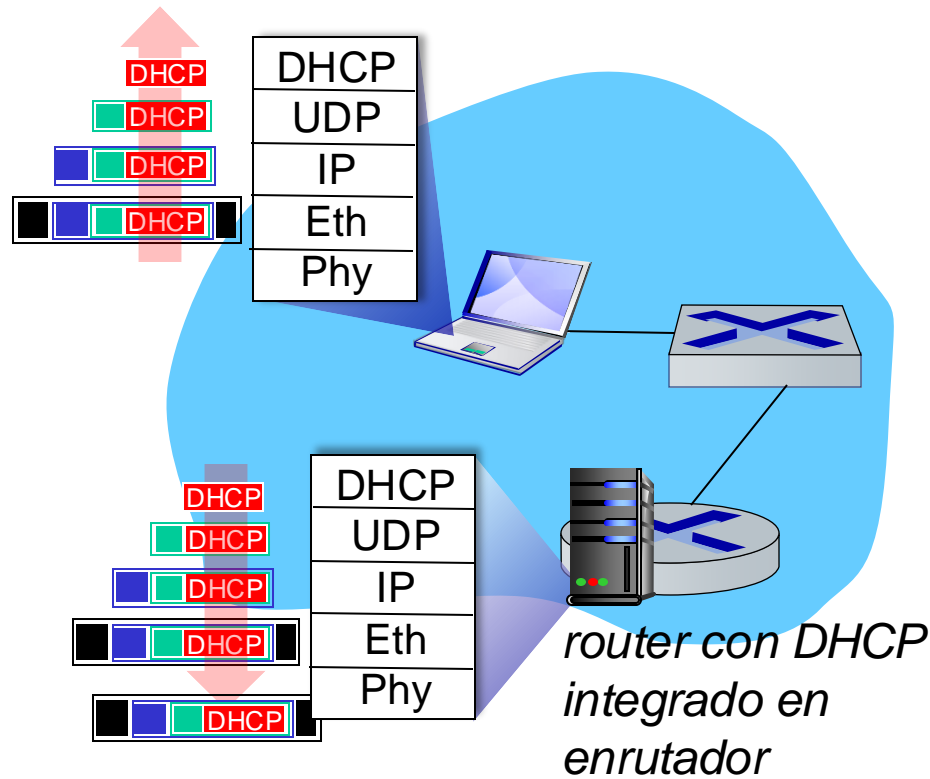
- dirección del enrutador de primer salto para el cliente
- nombre y dirección IP del servidor DNS
- máscara de red (indica la parte de red frente a la parte de host de la dirección)

# DHCP: ejemplo



- El portátil conectado utilizará DHCP para obtener la dirección IP, la dirección del router de primer salto y la dirección del servidor DNS.
- Mensaje DHCP REQUEST encapsulado en UDP, encapsulado en IP, encapsulado en Ethernet
- Difusión de trama Ethernet (dest: FFFFFFFF) en LAN, recibida en el router que ejecuta el servidor DHCP.
- Ethernet demux'ed a IP demux'ed, UDP demux'ed a DHCP

# DHCP: ejemplo



- El servidor DHCP formula un DHCP ACK que contiene la dirección IP del cliente, la dirección IP del router de primer salto para el cliente, el nombre y la dirección IP del servidor DNS.
- respuesta encapsulada del servidor DHCP reenviada al cliente, demuxing hasta DHCP en el cliente
- el cliente conoce ahora su dirección IP, el nombre y la dirección IP del servidor DNS, la dirección IP de su enrutador de primer salto

# Direcciones IP: ¿cómo conseguir una?

**P:** ¿Cómo obtiene la red la parte de subred de la dirección IP?

**A:** se le asigna una parte del espacio de direcciones de su proveedor ISP

Bloqueo del ISP 11001000 00010111 00010000 00000000 200.23.16.0/20

El ISP puede asignar su espacio de direcciones en 8 bloques:

Organización 0 11001000 00010111 00010000 00000000 200.23.16.0/23

Organización 1 11001000 00010111 00010010 00000000 200.23.18.0/23

Organización 2 11001000 00010111 00010100 00000000 200.23.20.0/23

... ..

....

....

Organización 7 11001000 00010111 00011110 00000000 200.23.30.0/23

# Direccionamiento IP: últimas palabras ...

**P:** ¿Cómo consigue un ISP un bloque de direcciones?

**A:** **ICANN:** Corporación de Asignación de Nombres y Números de Internet  
<http://www.icann.org/>

- asigna direcciones IP a través de **5 registros regionales (RR)** (que a su vez pueden asignarlas a registros locales)
- gestiona la zona raíz DNS, incluida la delegación de la gestión de TLD individuales (.com, .edu , ...)

**P:** ¿Hay suficientes direcciones IP de 32 bits?

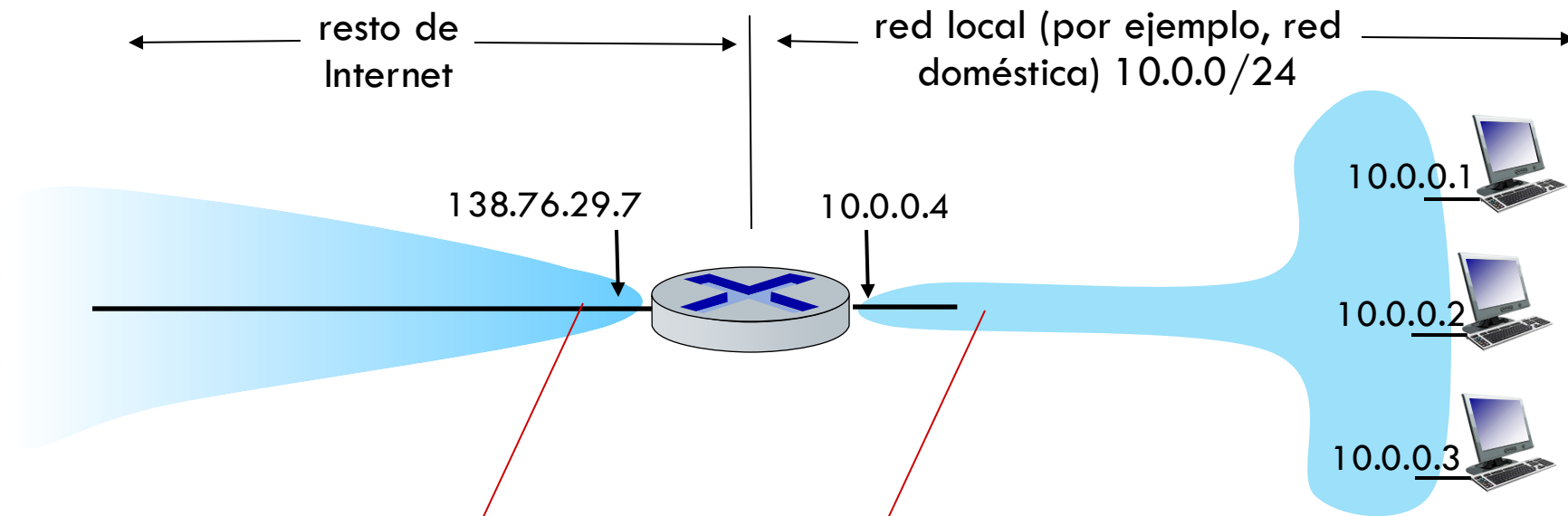
- ICANN asignó la última parte de las direcciones IPv4 a los RR en 2011
- NAT (siguiente) ayuda a agotar el espacio de direcciones IPv4
- IPv6 tiene un espacio de direcciones de 128 bits

"¿Quién demonios sabía cuánto espacio de direcciones necesitábamos?" Vint Cerf (reflexionando sobre la decisión de hacer la dirección IPv4 de 32 bits)



# NAT: traducción de direcciones de red

**NAT:** todos los dispositivos de la red local comparten **una única** dirección IPv4 de cara al exterior.



**todos los** datagramas **que salen de** la red local tienen **la misma** dirección IP NAT de origen 138.76.29.7, pero números de puerto de origen diferentes

los datagramas con origen o destino en esta red tienen la dirección 10.0.0/24 como origen, destino (como es habitual)

# NAT: traducción de direcciones de red

- Todos los dispositivos de la red local tienen direcciones de 32 bits en un espacio de direcciones IP "privado" (prefijos 10/8, 172.16/12, 192.168/16) que sólo pueden utilizarse en la red local.
- Ventajas:
  - sólo se necesita **una** dirección IP del proveedor ISP para **todos los** dispositivos
  - puede cambiar las direcciones de los hosts de la red local sin notificarlo al mundo exterior
  - puede cambiar de ISP sin cambiar las direcciones de los dispositivos de la red local
  - seguridad: dispositivos dentro de la red local no direccionables directamente, visibles desde el exterior

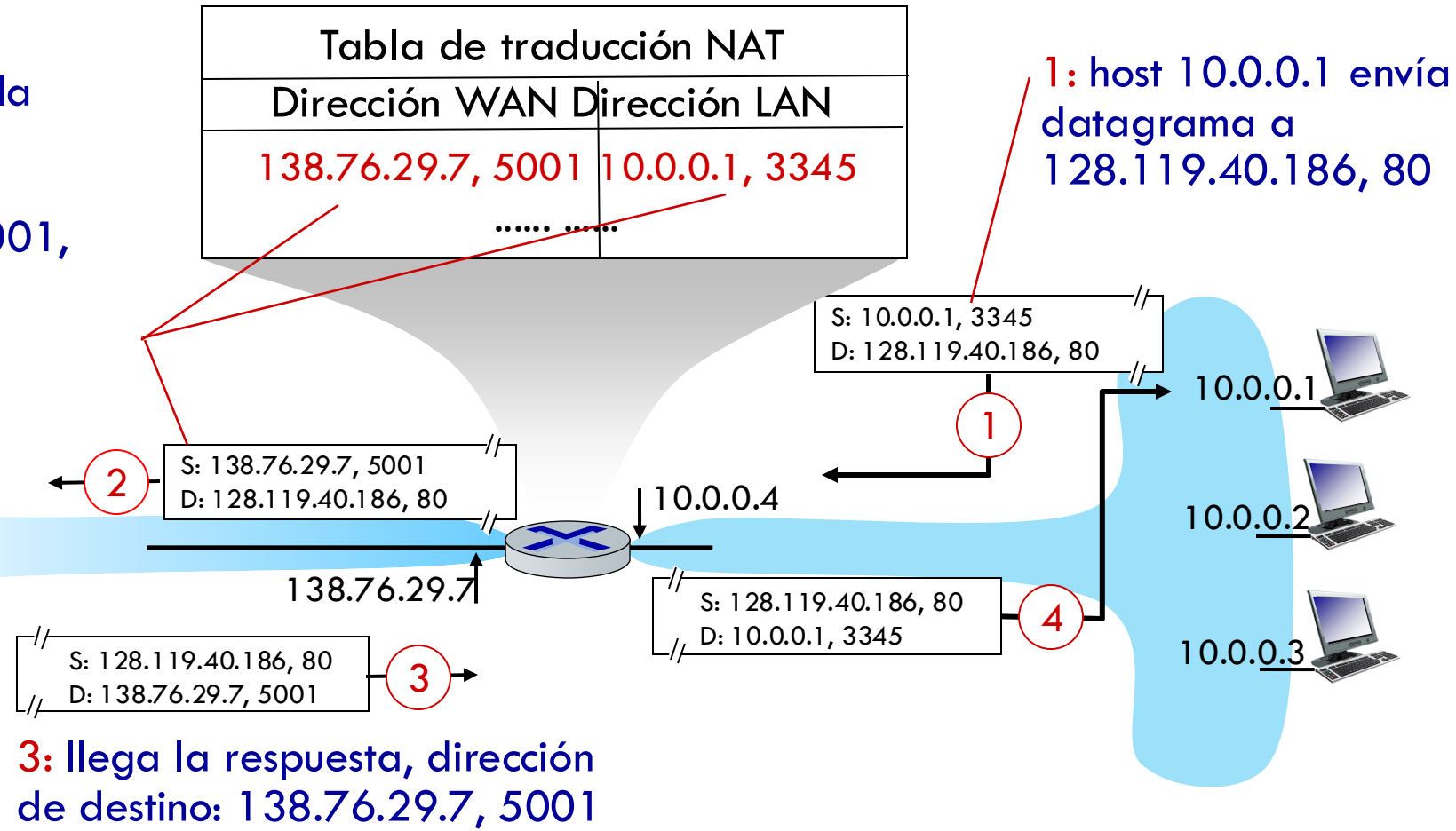
# NAT: traducción de direcciones de red

**implementación:** El router NAT debe (de forma transparente):

- **datagramas salientes:** **sustituir** (dirección IP de origen, puerto #) de cada datagrama saliente por (dirección IP NAT, nuevo puerto #)
  - los clientes/servidores remotos responderán utilizando (dirección IP NAT, nuevo puerto #) como dirección de destino
- **recordar (en la tabla de traducción NAT)** cada par de traducción (dirección IP de origen, puerto #) a (dirección IP NAT, nuevo puerto #)
- **datagramas entrantes:** **sustituir** (dirección IP NAT, nuevo puerto n°) en los campos de destino de cada datagrama entrante por los correspondientes (dirección IP de origen, puerto n°) almacenados en la tabla NAT.

# NAT: traducción de direcciones de red

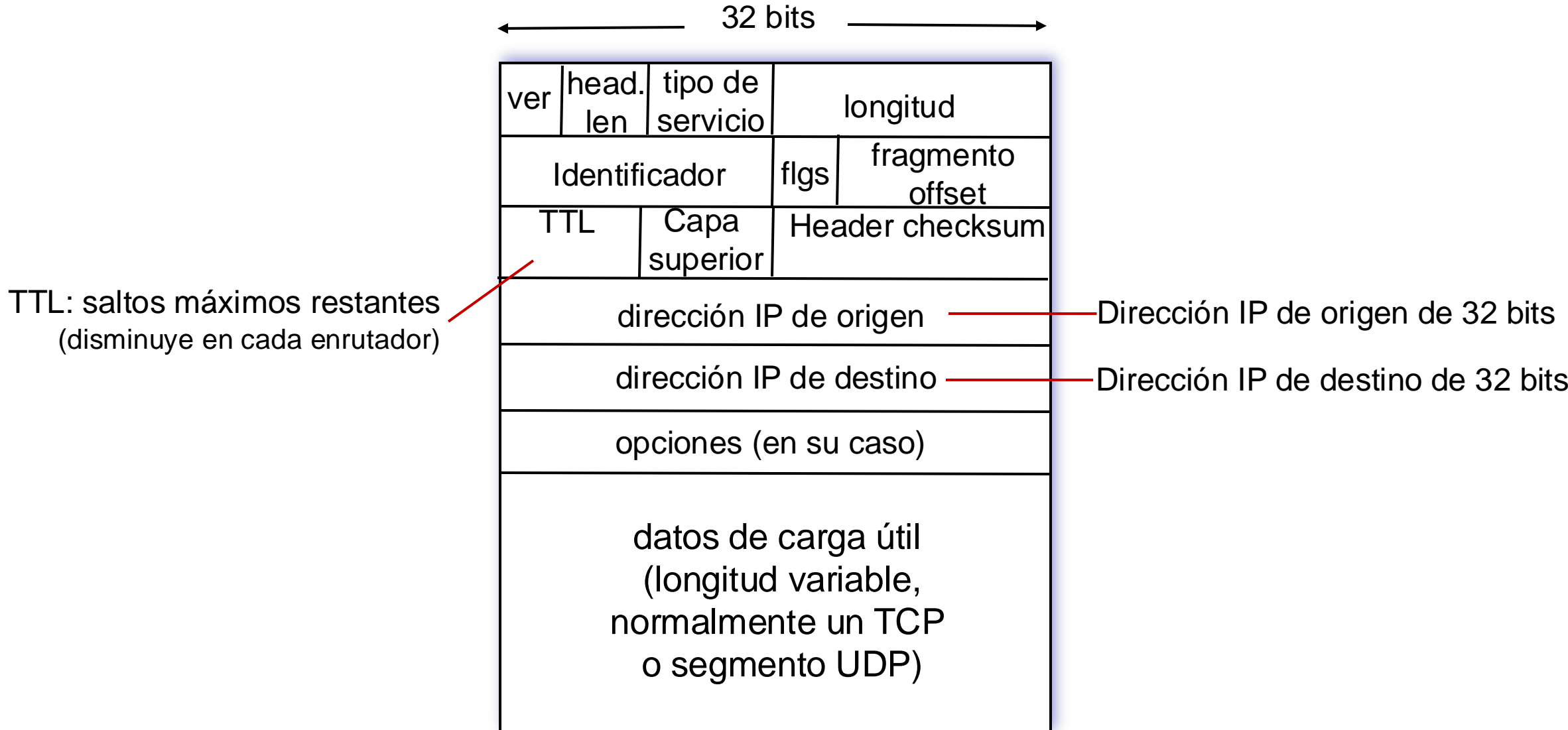
2: El router NAT cambia la dirección de origen del datagrama de 10.0.0.1, 3345 a 138.76.29.7, 5001, tabla de actualizaciones



# NAT: traducción de direcciones de red

- NAT ha sido controvertido:
  - los routers "deberían" procesar sólo hasta la capa 3
  - la "escasez" de direcciones debería resolverse con IPv6
  - viola el argumento de extremo a extremo (manipulación # del puerto por el dispositivo de capa de red)
  - NAT traversal: ¿qué pasa si el cliente quiere conectarse al servidor detrás de NAT?
- pero NAT está aquí para quedarse:
  - muy utilizado en redes domésticas e institucionales, redes celulares 4G/5G

# Formato de datagrama IP

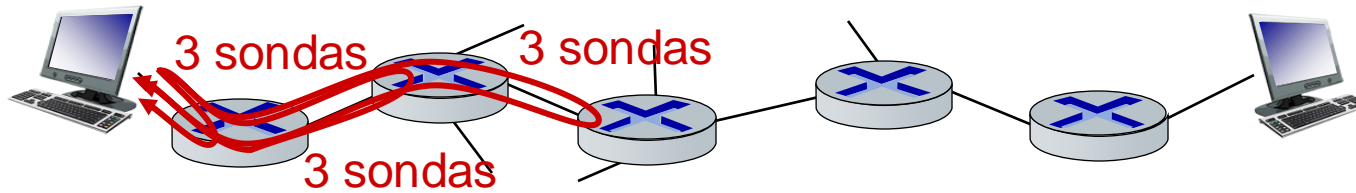


# ICMP: protocolo de mensajes de control de Internet

- utilizado por hosts y routers para comunicar información a nivel de red
  - notificación de errores: host, red, puerto, protocolo inalcanzables
  - echo request/reply (usado por ping)
- capa de red "por encima" de IP:
  - Mensajes ICMP transportados en datagramas IP
- **Mensaje ICMP:** tipo, código más los 8 primeros bytes del datagrama IP causante del error.

Tipo	Descripción del código
0 0	eco respuesta (ping)
3 0	red dest. inalcanzable
3 1	dest host inalcanzable
3 2	protocolo dest inalcanzable
3 3	puerto dest inalcanzable
3 6	red dest desconocida
3 7	dest host desconocido
4 0	source quench (congestión control - no utilizado)
8 0	solicitud de eco (ping)
9 0	anuncio de ruta
10 0	descubrimiento de enrutador
11 0	TTL expirado
12 0	cabecera IP errónea

# Traceroute e ICMP



- el origen envía conjuntos de segmentos UDP al destino
    - 1<sup>st</sup> set tiene TTL = 1, 2<sup>nd</sup> set tiene TTL=2, etc.
  - datagrama del enésimo conjunto llega al enésimo encaminador:
    - el enrutador descarta el datagrama y envía un mensaje ICMP de origen (tipo 11, código 0)
    - El mensaje ICMP posiblemente incluye el nombre del router y la dirección IP
  - cuando el mensaje ICMP llega a la fuente: registrar RTTs
- criterios de parada:**
- El segmento UDP llega finalmente al host de destino
  - el destino devuelve el mensaje ICMP "puerto inalcanzable" (tipo 3, código 3)
  - paradas de origen



# Principios de encaminamiento IP

## ■ Enrutamiento IP entre dos hosts

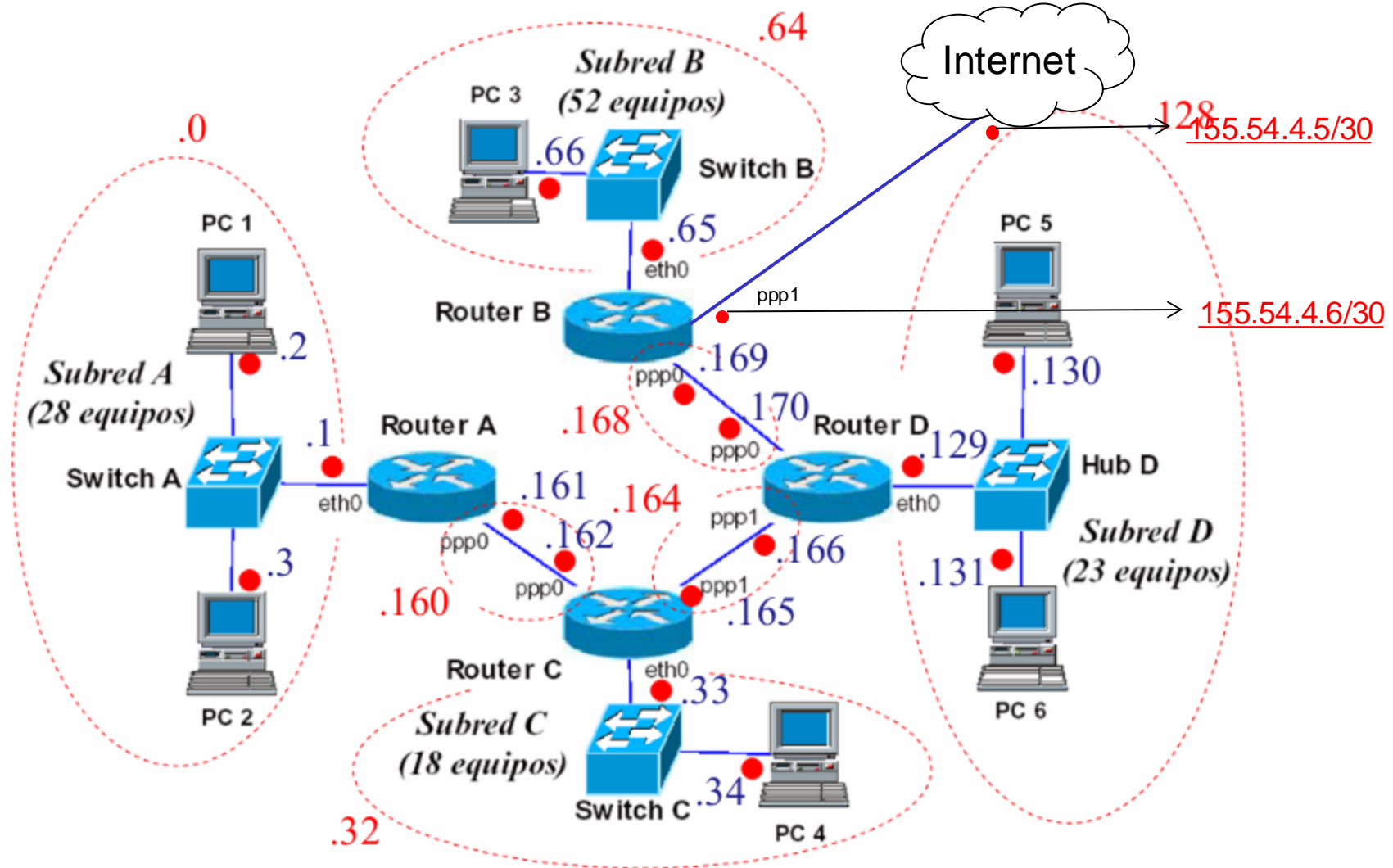
- Si dos anfitriones se encuentran en la misma (sub)red, pueden comunicarse directamente
  - Se puede determinar si dos hosts se encuentran en la misma (sub)red comparando el netid(+subnetid) de sus direcciones IP
- Si dos hosts no se encuentran en la misma (sub)red, el host origen envía el paquete al router por defecto
  - Todos los equipos deben conocer la dirección IP del router por defecto al que enviarán todos los paquetes destinados a una (sub)red diferente a la que encuentran
  - La dirección IP de destino del paquete es la del host destino
- Cuando un router recibe una trama, extrae el paquete IP y lo procesa:
  - Si la dirección IP de destino del paquete es distinta a la suya, reenviará el paquete en base a su tabla de encaminamiento
- Los paquetes pasan de un router a otro hasta llegar al que está conectado directamente a la (sub)red destino

# Principios de encaminamiento IP

- Problema (cont.). Construye las tablas de enrutamiento para todos los routers y un PC de ejemplo con el siguiente formato:

<u>Router/PC</u>	<u>Destino</u>	<u>Gateway</u>	<u>Máscara</u>	<u>Interfaz</u>
RA	...	...	...	...
		...	...	...
RB	...	...	...	...
		...	...	...
...	...	...	...	...
		...	...	...
PCX	...	...	...	...
		...	...	...

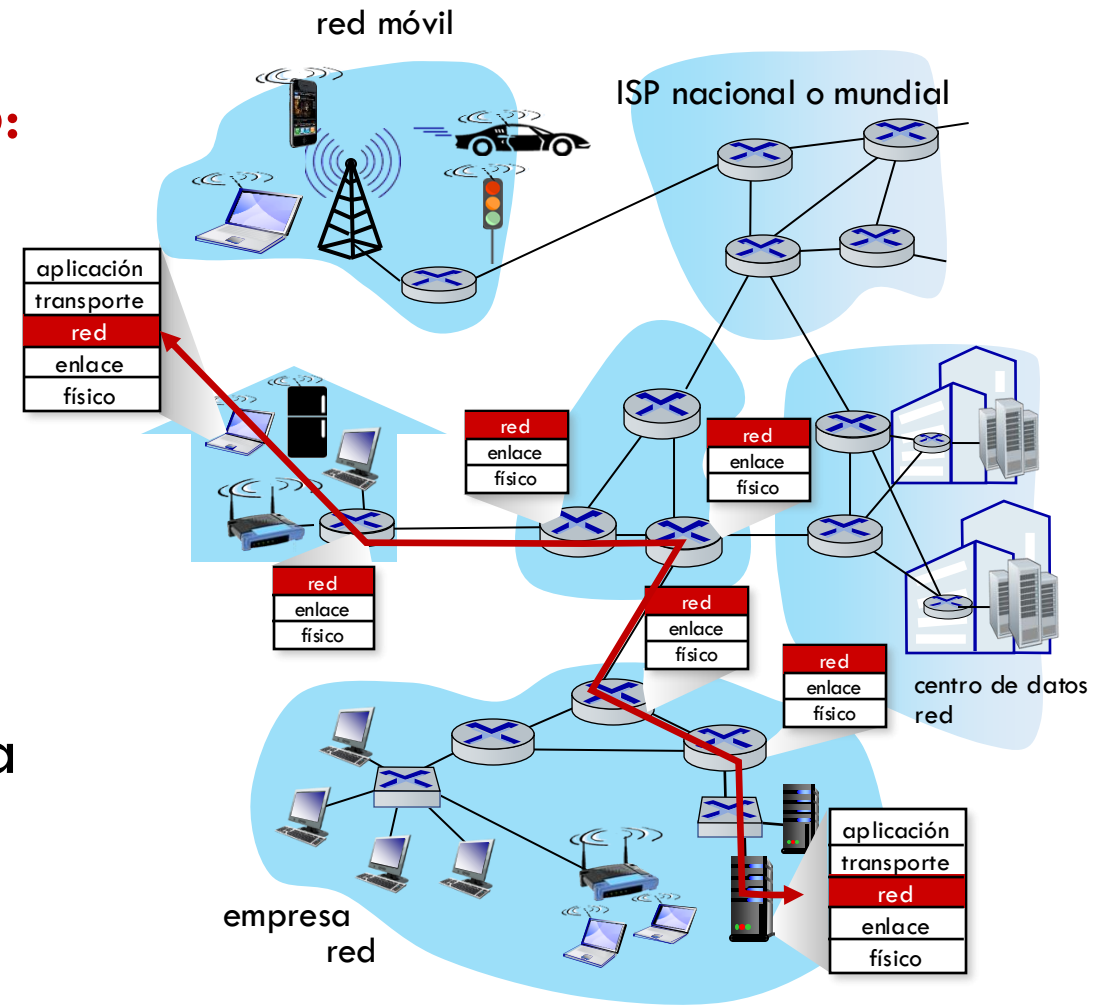
- Problema (cont.). ¿Y si Router B tuviese salida a Internet?:



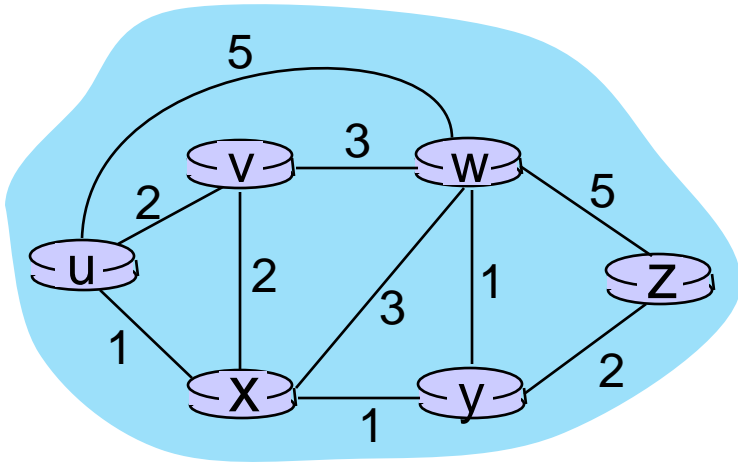
# Protocolos de enrutamiento

**Objetivo del protocolo de enrutamiento:**  
determinar "buenos" caminos  
(equivalentemente, rutas), desde los hosts  
emisores a los hosts receptores, a través  
de una red de enrutadores.

- **ruta:** secuencia de enrutadores que atraviesan los paquetes desde un determinado host de origen inicial hasta el host de destino final
- **"bueno":** menor "coste", "más rápido", "menos congestionado"



# Abstracción gráfica: costes de enlace



$c_{a,b}$  : coste del enlace directo que conecta a y b

por ejemplo,  $c_{w,z} = 5$ ,  $c_{u,z} = \infty$

coste definido por el operador de la red: podría ser siempre 1, o inversamente relacionado con el ancho de banda, o inversamente relacionado con la congestión

gráfico:  $G = (N,E)$

N: conjunto de encaminadores =  $\{ u, v, w, x, y, z \}$

E: conjunto de enlaces =  $\{ (u,v), (u,x), (v,x), (v,w), (x,w), (x,y), (w,y), (w,z), (y,z) \}$

# Clasificación de los algoritmos de encaminamiento

