

Capítulo 4: Capa Red - III

ELO322: Redes de Computadores
Agustín J. González

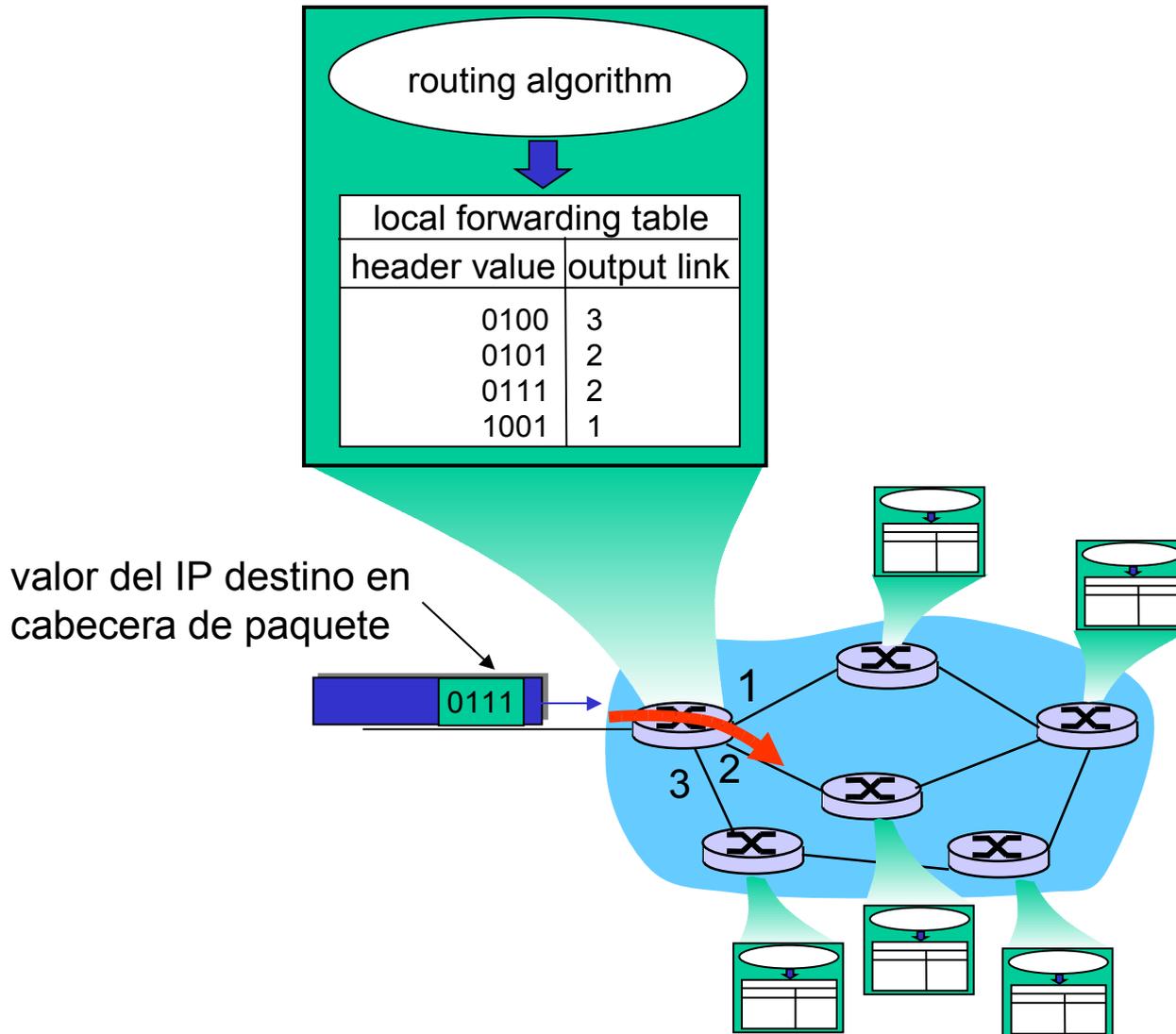
Este material está basado en:

- Material de apoyo al texto *Computer Networking: A Top Down Approach Featuring the Internet* 3rd edition. Jim Kurose, Keith Ross Addison-Wesley, 2004.
- Material del curso anterior ELO322 del Prof. Tomás Arredondo V.

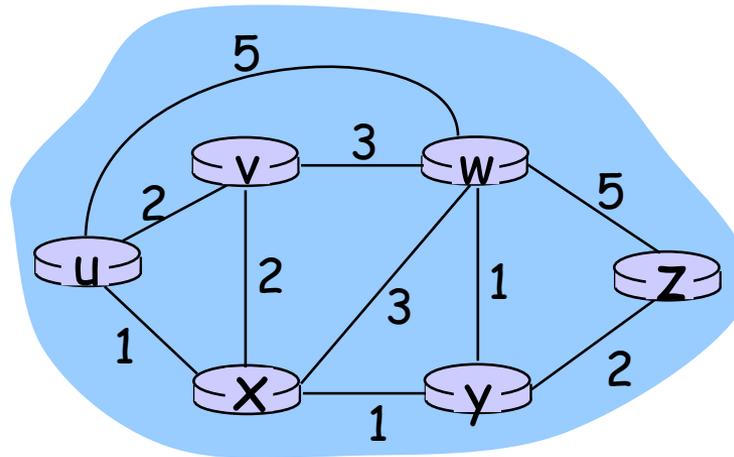
Capítulo 4: Capa de Red

- ❑ 4.1 Introducción
- ❑ 4.2 Circuitos virtuales y redes de datagramas
- ❑ 4.3 ¿Qué hay dentro de un router?
- ❑ 4.4 IP: Internet Protocol
 - Formato de Datagrama
 - Direccionamiento IPv4
 - ICMP
 - IPv6
- ❑ 4.5 **Algoritmos de ruteo**
 - Estado de enlace
 - Vector de Distancias
 - Ruteo Jerárquico
- ❑ 4.6 Ruteo en la Internet
 - RIP
 - OSPF
 - BGP
- ❑ 4.7 Ruteo Broadcast y multicast

Interacción de ruteo y re-envío



Abstracción de Grafos

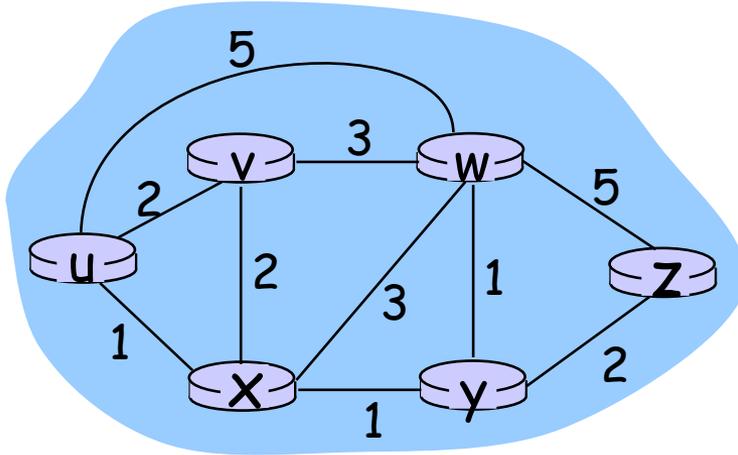


Grafo: $G = (N,E)$

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

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

Abstracción de Grafos : costos



- $c(x, y)$ = costo de enlace (x, y)
 - e.g., $c(w, z) = 5$
- costo siempre puede ser 1, o inversamente relacionado al ancho de banda o directamente relacionado a la congestión

Costo de la ruta $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_p) = c(x_1, x_2) + c(x_2, x_3) + \dots + c(x_{p-1}, x_p)$

Pregunta: ¿Cuál es la ruta de mínimo costo entre u y z ?

Algoritmo de ruteo: algoritmo que encuentra el costo mínimo

Clasificación de los algoritmos de ruteo

Según información global o descentralizada?

Global:

- ❑ Todos los routers conocen la topología completa y costos de enlaces
- ❑ Algoritmos de "estado de enlace" (link state)

Descentralizada:

- ❑ El router conoce vecinos conectados físicamente y el costo del enlace a ellos.
- ❑ Proceso iterativo de cómputo e intercambio de información con sus vecinos
- ❑ Algoritmos de "vector de distancia"

Según si es estático o dinámico?

Estático:

- ❑ Rutas cambian lentamente en el tiempo

Dinámico:

- ❑ Rutas cambian más rápidamente
 - Actualizaciones periódicas
 - En respuesta a cambios de costos de enlaces

Capítulo 4: Capa de Red

- 4.1 Introducción
- 4.2 Circuitos virtuales y redes de datagramas
- 4.3 ¿Qué hay dentro de un router?
- 4.4 IP: Internet Protocol
 - Formato de Datagrama
 - Direccionamiento IPv4
 - ICMP
 - IPv6
- 4.5 Algoritmos de ruteo
 - Estado de enlace
 - Vector de Distancias
 - Ruteo Jerárquico
- 4.6 Ruteo en la Internet
 - RIP
 - OSPF
 - BGP
- 4.7 Ruteo Broadcast y multicast

Un Algoritmo de ruteo de estado de enlace

Algoritmo de Dijkstra

- Supone topología de red y costos de enlaces conocidos a todos los nodos
 - Se logra vía "difusión de estado de enlace"
 - Todos los nodos tienen la misma información
- Se calcula el camino de costo menor desde un nodo (fuente) a todos los otros
 - Determina **tabla de re-envío** para ese nodo
- Iterativo: después de k iteraciones, se conoce el camino de menor costo a k destinos (ver los valores de $p(v)$ en el camino resultante)

Notación:

- $c(x,y)$: costo del enlace desde nodo x a y ; $= \infty$ si no es vecino directo
- $D(v)$: valor actual del costo del camino desde fuente a destino v .
- $p(v)$: nodo predecesor a v en el camino de fuente a v .
- N' : conjunto de nodos cuyo camino de costo mínimo ya se conoce

Modelo abstracto para la red

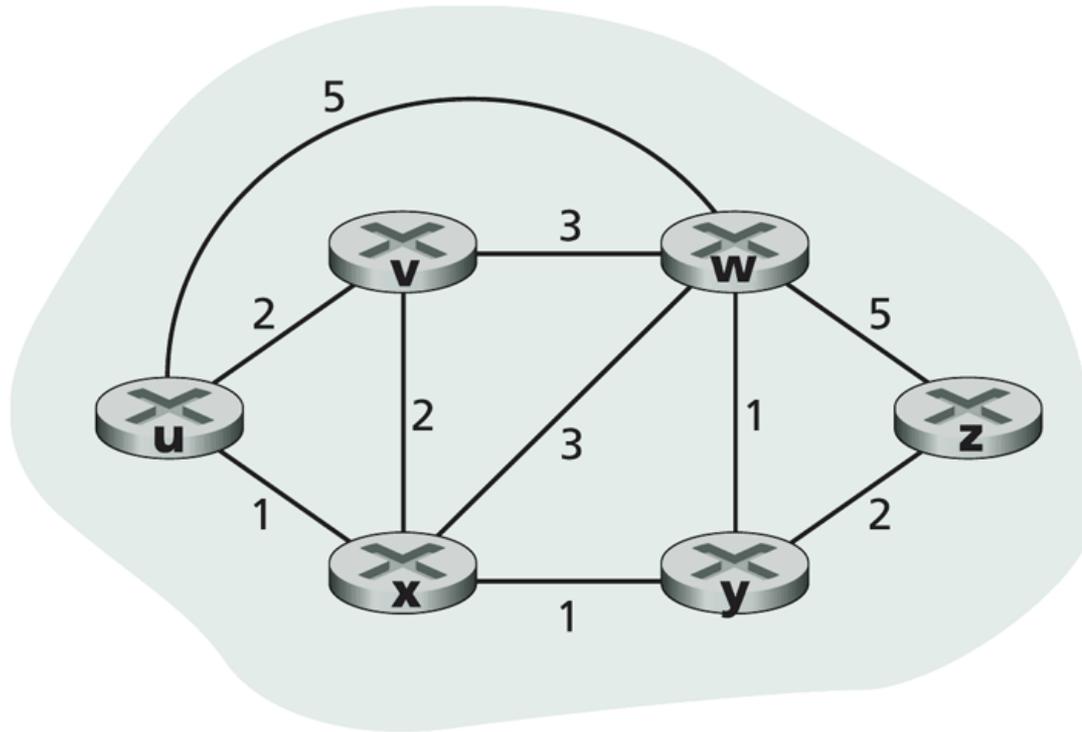


Figure 4.25 ♦ Abstract graph model of a computer network

Algoritmo de Dijkstra

1 **Inicialización:**

2 $N' = \{u\}$

3 for all nodes v

4 if v adjacent to u

5 then $D(v) = c(u,v)$

6 else $D(v) = \infty$

7

8 **Loop**

9 find w not in N' such that $D(w)$ is a minimum

10 add w to N'

11 actualiza $D(v)$ para todo v adyacente a w que no está en N' usando:

12 $D(v) = \min(D(v), D(w) + c(w,v))$

13 /* nuevo costo a v es el costo del camino actual a v o

14 el costo del camino más corto conocido a w más el costo de w a v */

15 **until all nodes in N'**

Notación:

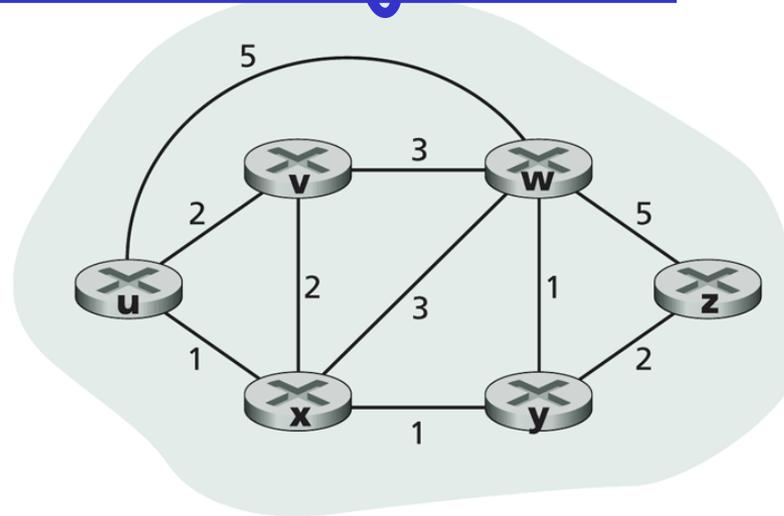
$c(x,y)$: costo del enlace desde nodo x a y ; $= \infty$ si no es vecino directo

$D(v)$: valor actual del costo del camino desde fuente a destino v .

$p(v)$: nodo predecesor a v en el camino de fuente a v .

N' : conjunto de nodos cuyo camino de costo mínimo (desde origen) ya se conoce

Algoritmo de Dijkstra



step	N'	$D(v),p(v)$	$D(w),p(w)$	$D(x),p(x)$	$D(y),p(y)$	$D(z),p(z)$
0	u	2,u	5,u	<u>1,u</u>	∞	∞
1	ux	2,u	4,x		<u>2,x</u>	∞
2	uxy	<u>2,u</u>	3,y			4,y
3	uxyv		<u>3,y</u>			4,y
4	uxyvw					<u>4,y</u>
5	uxyvwz					

Table 4.3 ♦ Running the link-state algorithm on the network in Figure 4.25

Algoritmo de Dijkstra, discusión

Complejidad: n nodos

- ❑ Cada iteración: ve todos los nodos, w , no en N
- ❑ $n(n+1)/2$ comparaciones: $O(n^2)$
- ❑ Otras implementaciones son posibles: $O(n \log n)$

Oscilaciones en cálculos son posibles:

- ❑ e.g., si costo enlace = cantidad de tráfico enviado por enlace

Capítulo 4: Capa de Red

- 4.1 Introducción
- 4.2 Circuitos virtuales y redes de datagramas
- 4.3 ¿Qué hay dentro de un router?
- 4.4 IP: Internet Protocol
 - Formato de Datagrama
 - Direccionamiento IPv4
 - ICMP
 - IPv6
- 4.5 **Algoritmos de ruteo**
 - Estado de enlace
 - **Vector de Distancias**
 - Ruteo Jerárquico
- 4.6 Ruteo en la Internet
 - RIP
 - OSPF
 - BGP
- 4.7 Ruteo Broadcast y multicast

Algoritmo Vector de Distancia (1)

Ecuación de Bellman-Ford (programación dinámica)

Define

$d_x(y) :=$ costo del camino de menor costo de x a y

Entonces:

$$d_x(y) = \min \{c(x,v) + d_v(y)\}$$

v es vecino de x

Donde min es tomado sobre todos los vecinos v de x

Algoritmo Vector de Distancia (2)

- $D_x(y)$ = costo mínimo estimado de x a y
- Vector de distancia: $D_x = [D_x(y): y \in N]$
- Nodo x conoce el costo a cada vecino v : $c(x,v)$
- Nodo x mantiene $D_x = [D_x(y): y \in N]$
- Nodo x también mantiene los vectores de distancia de sus vecinos
 - Para cada vecino v , x mantiene $D_v = [D_v(y): y \in N]$

Algoritmo Vector de distancia (3)

Idea básica:

- Cada nodo envía periódicamente su vector de distancia estimado a sus vecinos
- Cuando el nodo x recibe un nuevo vector de dist. estimado desde un vecino, éste actualiza su propio vector de dist. usando la ecuación de B-F:

$$D_x(y) \leftarrow \min_v \{c(x,v) + D_v(y)\} \quad \text{para cada nodo } y \text{ en } N$$

- Si el vector de dist. cambia entonces el nodo x envía su valor nuevo a sus vecinos, y ellos a su vez pueden actualizar sus vectores de distancia
- Bajo condiciones normales, el valor estimado de $D_x(y)$ converge al menor costo real $d_x(y)$

Algoritmo Vector de Distancia (4)

Iterativo y asincrónico:

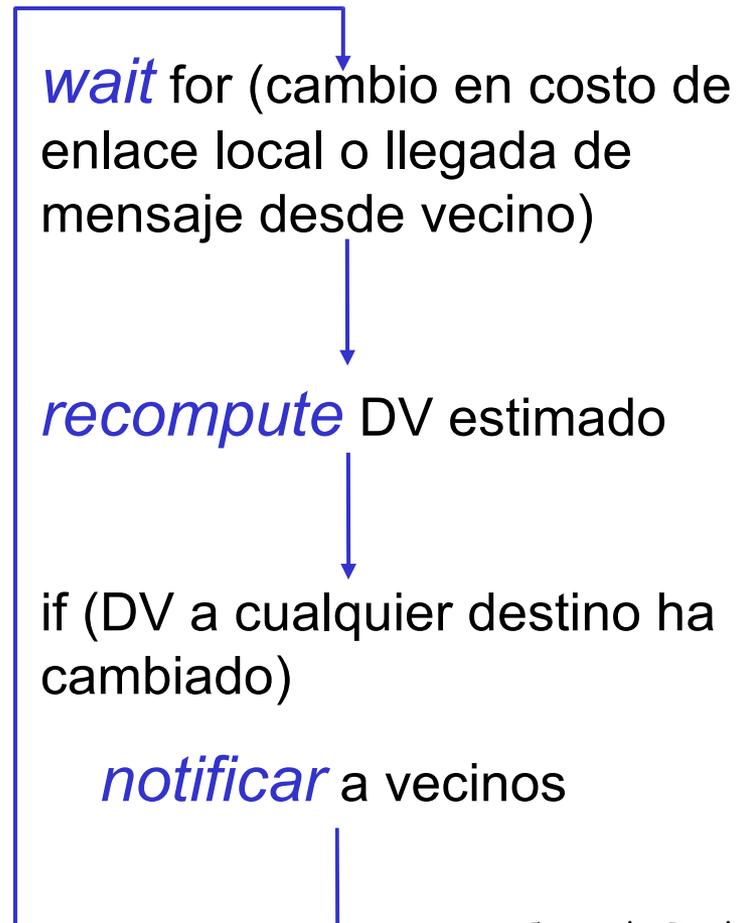
cada iteración local es causada por:

- ❑ Cambio en costo de enlace local
- ❑ Actualización de vector por mensaje de vecino

Distribuido:

- ❑ Cada nodo notifica a sus vecinos *sólo* cuando su vector cambia
 - Vecinos entonces notifican a sus vecinos si es necesario

Cada nodo:



$$D_x(y) = \min\{c(x,y) + D_y(y), c(x,z) + D_z(y)\}$$

$$= \min\{2+0, 7+1\} = 2$$

$$D_x(z) = \min\{c(x,y) + D_y(z), c(x,z) + D_z(z)\}$$

$$= \min\{2+1, 7+0\} = 3$$

node x table

		cost to		
		x	y	z
from	x	0	2	7
	y	∞	∞	∞
	z	∞	∞	∞

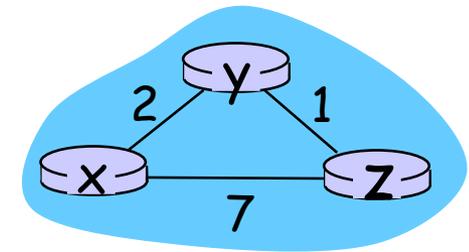
node y table

		cost to		
		x	y	z
from	x	∞	∞	∞
	y	2	0	1
	z	∞	∞	∞

node z table

		cost to		
		x	y	z
from	x	∞	∞	∞
	y	∞	∞	∞
	z	7	1	0

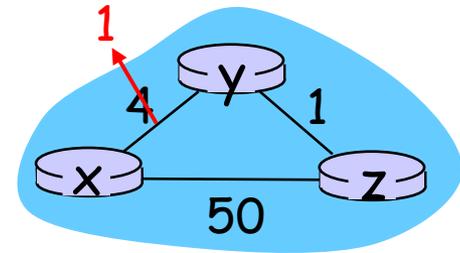
Ejemplo: Vector de distancia



Vector de distancia: cambios en costos de enlaces

Cambios en costos de enlaces:

- ❑ nodo detecta un cambio de costo en uno de sus enlaces
- ❑ actualiza información de ruteo, recalcula vector de distancia
- ❑ si hay cambio en DV notifica a sus vecinos



“buenas
noticias
viajan
rápido”

En el tiempo t_0 , y detecta un cambio en costo de enlace, actualiza su DV e informa a sus vecinos.

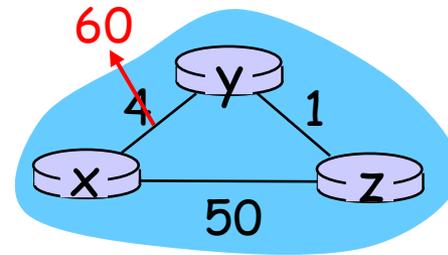
En el tiempo t_1 , z recibe la información de y, también actualiza su tabla. Calcula un nuevo costo para x y le envía su DV a sus vecinos.

En el tiempo t_2 , y recibe la actualización de z y actualiza su tabla de distancia. Los costos mínimos de y no cambian, y no envía ningún nuevo mensaje a z.

Vector de distancia: cambio en costo de enlaces

Cambio en costos de enlaces:

- ❑ buenas noticias viajan rápido
- ❑ noticias malas viajan lento - problema de "contar hasta el infinito"
- ❑ ¿Cómo pasa esto?



Vector de distancia: cambio en costo de enlaces (e.g. incremento de costo)

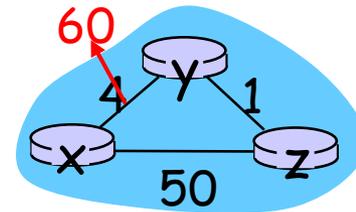
- Inicialmente: $D_y(x) = 4$, $D_y(z) = 1$, $D_z(x) = 5$, $D_z(y) = 1$
- En el tiempo t_0 y detecta el cambio de costo y calcula:

$$D_y(x) = \min \{c(y,x) + D_x(x), c(y,z) + D_z(x)\} =$$

$$= \min \{60 + 0, 1 + 5\} = 6$$

node y table

	x	y	z
from x	0	4	5
y	4	0	1
z	5	1	0



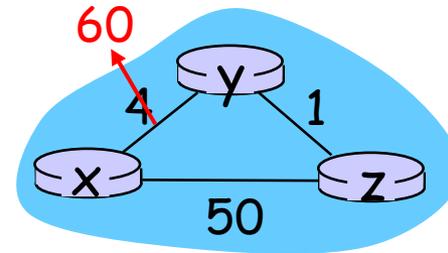
node y table

	x	y	z
from x	0	4	5
y	6	0	1
z	5	1	0

Vector de distancia: cambio en costo de enlaces

Reversa envenenada:

- Si Z routea a través de Y para llegar a X:
 - Z le dice a Y que su distancia a X es infinita (para que Y no rutee a X vía Z)
- ¿Resuelve completamente el problema de contar hasta el infinito? No, ¿por qué?



Comparación de algoritmos de estado (LS) de enlace y vector de distancia (DV)

Complejidad de mensajes

- **LS:** con n nodos, E enlaces, $O(nE)$ mensajes son enviados
- **DV:** sólo intercambios entre vecinos
 - Tiempo de convergencia varía

Rapidez de convergencia

- **LS:** $O(n^2)$, algoritmo requiere $O(nE)$ mensajes
 - Puede tener oscilaciones
- **DV:** tiempo de convergencia varía
 - Podría estar en loops
 - Problema de cuenta infinita

Robustez: ¿qué pasa si un router funciona mal?

LS:

- Nodos pueden comunicar incorrecto costo del *link*
- Cada nodo computa sólo su propia tabla

DV:

- DV nodo puede comunicar costo de *camino* incorrecto
- La tabla de cada nodo es usada por otros
 - error se propaga a través de la red

Capítulo 4: Capa de Red

- 4.1 Introducción
- 4.2 Circuitos virtuales y redes de datagramas
- 4.3 ¿Qué hay dentro de un router?
- 4.4 IP: Internet Protocol
 - Formato de Datagrama
 - Direccionamiento IPv4
 - ICMP
 - IPv6
- 4.5 **Algoritmos de ruteo**
 - Estado de enlace
 - Vector de Distancias
 - **Ruteo Jerárquico**
- 4.6 Ruteo en la Internet
 - RIP
 - OSPF
 - BGP
- 4.7 Ruteo Broadcast y multicast

Ruteo Jerárquico

Nuestro estudio del ruteo hasta ahora es idealizado. Suponemos que:

- ❑ Todos los routers son idénticos
- ❑ La red es "plana"

... esto *no es* verdad en la práctica

Escala: con 200 millones de destinos:

- ❑ No podemos almacenar todos los destinos en tablas de ruteo!
- ❑ Los intercambios de tablas de ruteo inundarían los enlaces!

Autonomía administrativa

- ❑ Internet = red de redes
- ❑ Cada administrador de red puede querer controlar el ruteo en su propia red

Ruteo Jerárquico

- Agrupar router en regiones, "sistemas autónomos" (autonomous systems o AS)
- Routers en el mismo AS usan el mismo protocolo de ruteo
 - Protocolo de ruteo "intra-AS"
 - Routers en diferentes AS pueden correr diferentes protocolos intra-AS

Router de borde (Gateway router)

- Tienen enlace directo a router en otros sistemas autónomos

Ruteo Jerárquico

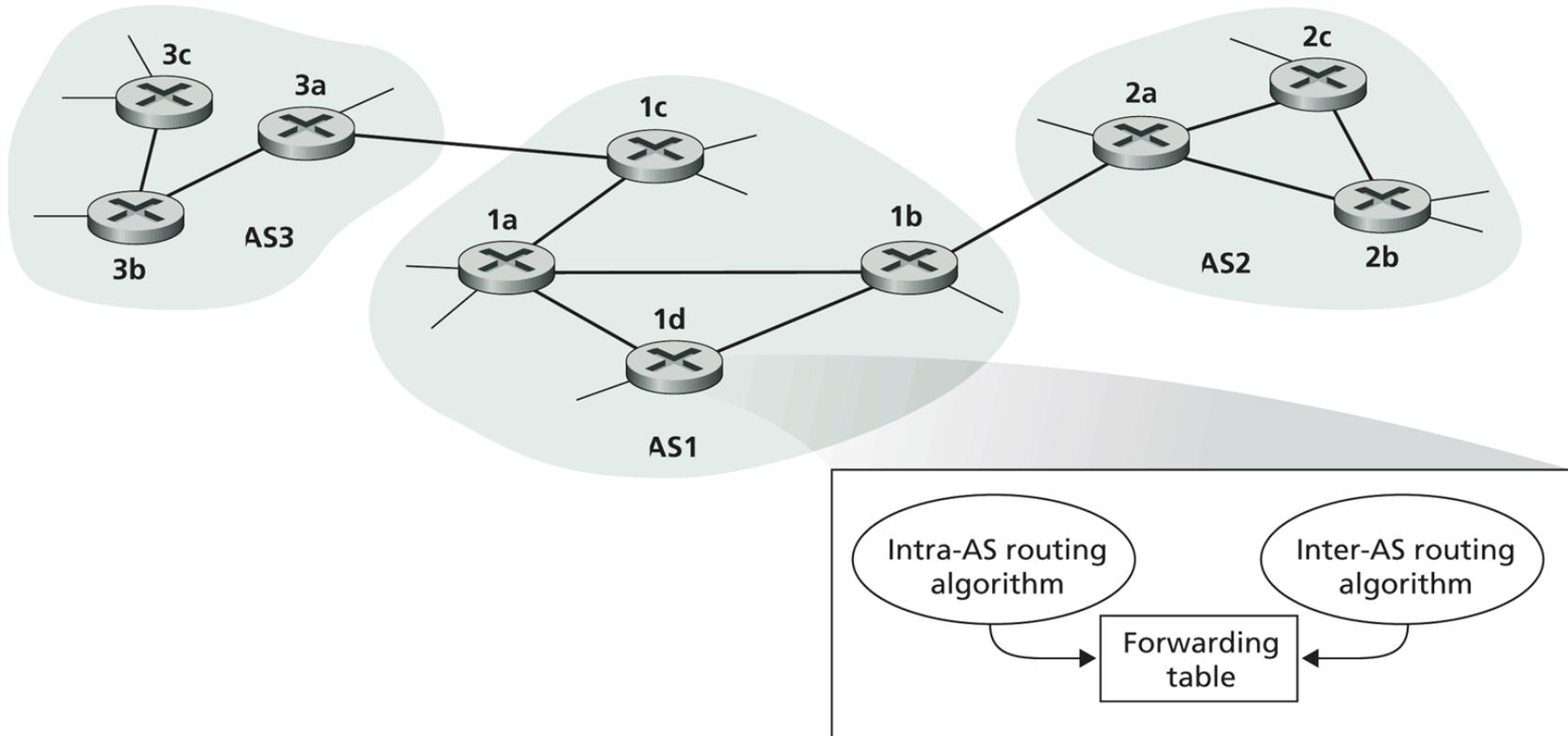


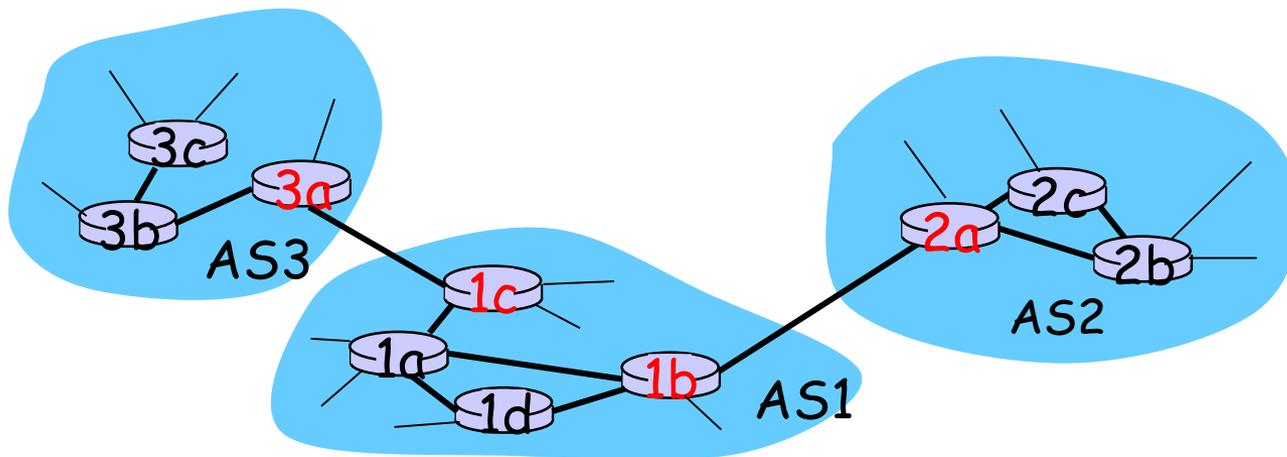
Figure 4.29 ♦ An example of interconnected autonomous systems

Ruteo Inter-AS

- Router en AS1 recibe un datagrama para un destino afuera de AS1
 - A cuál Router debería enviar el paquete?

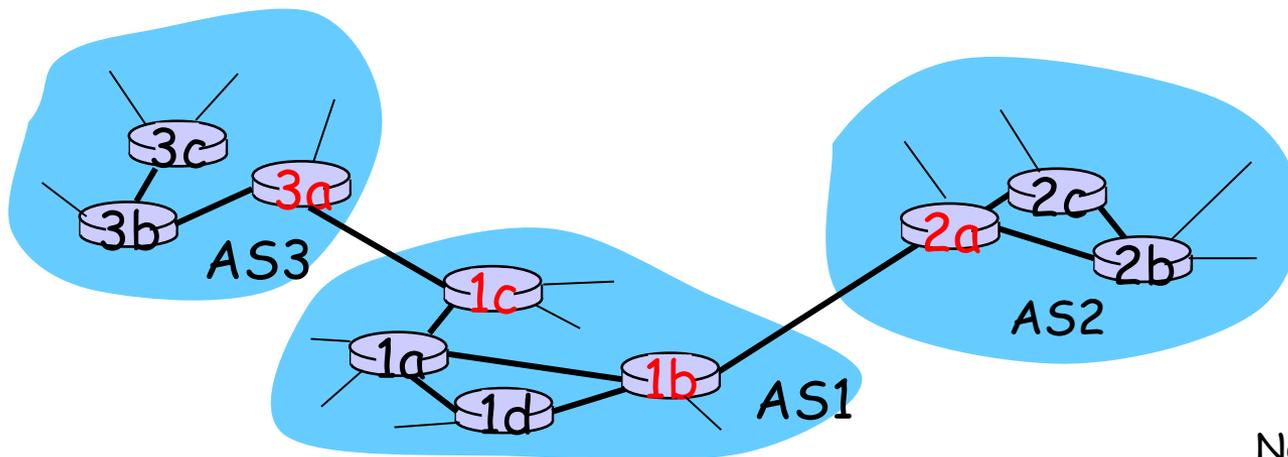
AS1 necesita:

2. aprender cuales destinos son alcanzables a través de AS2 y cuales a través de AS3
3. propagar esta información a todos los routers en AS1



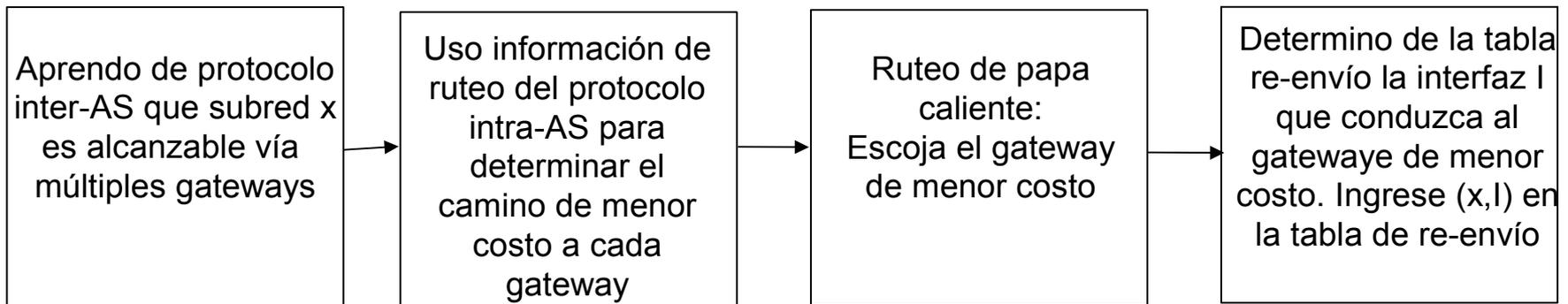
Ejemplo: definición de la tabla de re-envío en router 1d

- Supongamos que AS1 sabe por el protocolo inter-AS que la subred x es alcanzable desde AS3 (gateway 1c) pero no desde AS2.
- El protocolo intra-AS propaga la información de alcance a todos los routers internos.
- Router 1d determina de la información de ruteo intra-AS que su interfaz I está en el camino de costo mínimo a 1c.
- Luego éste pone en su tabla de re-envío: (x, I) .



Ejemplo: Elección entre múltiples AS

- Ahora supongamos que AS1 sabe por el protocolo inter-AS que la subred **x** es alcanzable desde AS3 y desde AS2.
- Para configurar la tabla de re-envío, router 1d debe determinar hacia qué gateway éste debería re-enviar los paquetes destinados a **x**.
- Ésta es también una tarea del protocolo de ruteo inter-AS
- **Ruteo de la papa caliente (Hot potato routing)**: enviar el paquete hacia el router más cercano de los dos.



Capítulo 4: Capa de Red

- 4.1 Introducción
- 4.2 Circuitos virtuales y redes de datagramas
- 4.3 ¿Qué hay dentro de un router?
- 4.4 IP: Internet Protocol
 - Formato de Datagrama
 - Direccionamiento IPv4
 - ICMP
 - IPv6
- 4.5 Algoritmos de ruteo
 - Estado de enlace
 - Vector de Distancias
 - Ruteo Jerárquico
- 4.6 Ruteo en la Internet
 - RIP
 - OSPF
 - BGP
- 4.7 Ruteo Broadcast y multicast