

Títol: Estudio de la evolución de la topología de Internet a partir de tablas BGP

Volum: 1/1

Alumne: David Domingo Alegre

Director: Josep M^a Barceló Ordinas

Departament: Arquitectura de Computadors

Data: 4 de Febrer del 2004

*Querría agradecer la dirección de José M^a Barceló, la
colaboración de mis compañeros Sergio Menéndez y
Xavier Domènech y el soporte de todas aquellas
personas que me han ayudado y que sin ellas este
proyecto no habría podido realizarse.*

*David Domingo
sml@fuzzion.org*

1.	RESUMEN.....	7
2.	OBJETIVOS.....	11
2.1.	Planteamiento de los objetivos	13
2.2.	Obtención de los objetivos	15
3.	INTRODUCCIÓN.....	17
3.1.	Internet y su crecimiento	19
3.2.	Los Sistemas Autónomos	19
3.3.	Métodos de análisis de rutas	21
3.4.	BGP	23
3.5.	Análisis de las tablas BGP	24
3.6.	Estudio temporal de los datos.....	25
3.7.	Extracción de conclusiones.....	25
4.	BACKGROUND	27
4.1.	Arquitectura de Internet.....	29
4.1.1.	<i>Introducción</i>	<i>29</i>
4.1.2.	<i>El Modelo OSI.....</i>	<i>30</i>
4.1.3.	<i>TCP/IP</i>	<i>32</i>
4.1.4.	<i>Encaminamiento IP</i>	<i>37</i>
4.2.	Sistemas Autónomos	41
4.2.1.	<i>Sistemas Autónomos.....</i>	<i>41</i>
4.2.2.	<i>Encaminamiento de Sistemas Autónomos</i>	<i>43</i>
4.3.	BGP (Border Gateway Protocol).....	45
4.3.1.	<i>Tablas BGP.....</i>	<i>48</i>
4.3.2.	<i>Internet Routing Registry (IRR).....</i>	<i>51</i>
4.4.	Relaciones entre AS.....	52
4.5.	Otros conceptos	53
4.5.1.	<i>ISP (Internet Service Provider).....</i>	<i>53</i>
4.5.2.	<i>Backbone.....</i>	<i>53</i>
4.5.3.	<i>Puntos neutros.....</i>	<i>54</i>
4.6.	Las zonas de Internet.....	55
4.7.	Representación matemática y métricas.....	57
4.7.1.	<i>Grafo.....</i>	<i>57</i>
4.7.2.	<i>Datos Básicos.....</i>	<i>57</i>
4.7.3.	<i>Coeficiente de clustering</i>	<i>58</i>

5.	METODOLOGÍA	59
5.1.	Las tablas BGP	61
5.2.	El grafo de AS	63
5.2.1.	<i>Matriz</i>	64
5.2.2.	<i>Grado</i>	65
5.2.3.	<i>Tipos de relaciones entre AS</i>	66
5.2.4.	<i>Coefficiente de clustering</i>	69
5.3.	Customers, Regional ISP y Core	70
5.4.	Repartición geográfica de los AS	74
5.4.1.	<i>Base de datos de AS</i>	75
5.4.2.	<i>Clasificación por IRR y países</i>	76
5.4.3.	<i>TOP20 AS</i>	77
5.5.	La evolución temporal	78
5.5.1.	<i>Tiempo de cálculo</i>	78
6.	ESTUDIO	79
6.1.	Evolución de las métricas básicas	81
6.1.1.	<i>Sistemas autónomos, enlaces y prefijos</i>	81
6.1.2.	<i>Diámetro y grado</i>	85
6.1.3.	<i>Coefficiente de Clustering</i>	88
6.2.	Evolución del TOP20 AS	90
6.3.	Evolución de la repartición geográfica	94
6.3.1.	<i>IRRs</i>	94
6.3.2.	<i>Países</i>	98
6.3.3.	<i>Comparación de países</i>	103
6.4.	Evolución de las zonas de Internet	106
6.4.1.	<i>Número de AS</i>	106
6.4.2.	<i>Número de enlaces</i>	108
6.4.3.	<i>Grado medio</i>	110
6.4.4.	<i>Relaciones entre AS</i>	112
6.5.	Evolución del Core de Internet	113
6.5.1.	<i>Evolución del Coeficiente de Clustering</i>	114
6.5.2.	<i>Evolución de las relaciones entre AS</i>	115
6.5.3.	<i>TOP20 del Core</i>	117
7.	CONCLUSIONES	121
7.1.	Conclusiones globales	123
7.2.	Trabajos futuros	128

ÍNDICE

7.3.	Alternativas.....	128
8.	COSTE Y PLANIFICACIÓN	131
8.1.	Planificación y Recursos Humanos	133
8.2.	Coste de Hardware y Software	135
8.3.	Coste General del proyecto	136
8.4.	Ejecución de la planificación.....	136
9.	GLOSARIO.....	139
10.	REFERENCIAS.....	143
11.	ANEXOS.....	147
11.1.	Participantes en el proyecto <i>RouteViews</i>	149
11.2.	Números de AS sin datos.....	151
11.3.	Evolución detallada del TOP20.....	152
11.4.	Contenido del CD	162
12.	ÍNDICE DE FIGURAS.....	163
13.	ÍNDICE DE TABLAS.....	167
14.	ÍNDICE DE GRÁFICAS	171
15.	ÍNDICE DE ALGORITMOS.....	175

Capítulo

1

RESUMEN

El crecimiento de Internet es algo imparable desde su creación. Las necesidades de ancho de banda, retardo, escalabilidad y calidad de servicio han ido aumentando sin parar y no hay síntomas de que cese. Cada año aparecen nuevos servicios que hacen uso de Internet y que permiten la apertura de nuevos campos de negocio y posibilidades para los usuarios finales. Esto requiere una gran demanda de recursos adicional a la ya existente y que Internet debe absorber creciendo en diversas direcciones.

Internet es una compleja red que se soporta sobre una topología de interconexión de redes y computadoras en forma de grafo, que no pertenece a ningún organismo ni existe un control centralizado. Su evolución no está definida, depende de una serie de factores sociales, económicos y tecnológicos, que provocan que el crecimiento de la demanda influya directamente en la evolución de esta topología. No se trata de un proceso inmediato sino que a lo largo del tiempo se puede ver la evolución del crecimiento debido a la suma de muchos pequeños cambios.

El análisis de este crecimiento de la topología permite, por una parte, conocer de cerca el funcionamiento de interconexión de Internet y detectar a tiempo los posibles problemas que cause este crecimiento. Por otra parte, se obtiene una visión global del estado de su topología y se puede recorrer la evolución pasada y futura de su crecimiento.

Este proyecto hace una serie de estudios orientados a comprender la evolución temporal de la topología de Internet en los últimos cinco años. Concretamente, esta evolución se aplica al nivel de interconectividad, repartición por zonas geográficas y países, segmentación por tipos e identificación de los proveedores más importantes de Internet a nivel de interconectividad.

Las motivaciones personal que me han llevado a realizar este trabajo pueden resumirse en dos aspectos. En primer lugar, el

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

interés que he desarrollado durante toda mi vida informática por el mundo de las redes y comunicaciones y concretamente por Internet, por investigar su funcionamiento y su forma de llegar a todas partes atravesando continentes. Tenía una gran curiosidad por ver en datos reales la evolución de la interconexión a lo largo de los últimos años y como se reparte geográficamente.

En segundo lugar, la forma de conseguir los resultados es muy elegante y atractiva: a partir de una fuente de datos obtenida de manera local y sencilla y a través de proceso y cálculo matemático, puedo extraer información de todo Internet a nivel global. Con los datos de un único punto de Internet puedo inferir toda la topología, construir un modelo y observar su evolución.

En el fondo, esta es una de las características básicas de Internet y una de las razones de la revolución que ha causado en nuestro mundo.

Capítulo

2

OBJETIVOS

2.1. Planteamiento de los objetivos

El proyecto consiste en el estudio de la topología de Internet a través de la información contenida en tablas BGP. Mediante el proceso y análisis estadístico de los datos de una tabla de un solo *router* se obtendrán resultados y conclusiones sobre el estado de la conectividad y topología de toda Internet.

BGP (*Border Gateway Protocol*) es un protocolo de encaminamiento de tipo externo entre *routers* de diferentes Sistemas Autónomos (AS).

Un Sistema Autónomo es un grupo de redes IP con políticas de encaminamiento independientes que realizan su propia gestión del tráfico que fluye entre él y los restantes Sistemas Autónomos. La agregación de Sistemas Autónomos conectados entre si es lo que forma Internet.

Cada *router* de un AS conectado a otro AS mantiene una tabla BGP que contiene la ruta para que un paquete de datos llegue hasta una red cualquiera de Internet. En estas tablas se encuentran para cada prefijo de red destino, el siguiente salto a visitar y el camino de AS que debe atravesar para llegar a su destino. Por tanto, los AS intercambian tráfico con sus AS vecinos a través de estas rutas definidas con BGP de manera totalmente dinámica.

La topología formada por esta interconexión entre AS tiene forma de grafo, que varía dinámicamente con la creación de nuevas rutas y con la eliminación de otras. Además, este grafo de AS puede separarse en tres grupos: *Customers*, *Regional ISP* y *Core*. Los *Customers* son los AS que dan servicio a los usuarios finales de Internet, los *Regional ISP* son AS que conectan los *Customers* con el *Core* y el *Core* es el centro de Internet, es donde los AS están más interconectados entre si y por donde transita un mayor tráfico de datos de Internet.

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

Esta topología puede estudiarse desde muchos puntos de vista, pero este proyecto se concentra solamente en su evolución temporal de los últimos cinco años (1999-2003). Para estudiar como esta topología ha crecido y evolucionado a lo largo de este tiempo, se analizarán una serie de métricas y datos que caracterizan la interconexión en Internet y cada uno de los grupos de AS (*Customers, Regional ISP, Core*).

El estudio se ha dividido en varias partes, según los aspectos que se analizan, aunque están relacionados entre sí. Concretamente, estos son los casos que abarca el proyecto:

- Estudio de la evolución de las métricas básicas de la topología de Internet. Se trata de analizar la evolución de métricas como el número de AS, número de enlaces, tamaño del prefijo medio, grado máximo, grado medio, coeficiente de clustering, diámetro, etc. de toda Internet.
- Estudio de la evolución del TOP 20 AS de Internet. Se trata de analizar la evolución de los 20 AS más interconectados e identificar cada uno con el nombre de la empresa que lo gestiona y su ubicación geográfica.
- Estudio de la evolución de los IRRs y países. Se trata de analizar la evolución de la repartición de los AS y conexiones entre los IRRs y entre los países más importantes que existen en la topología de Internet.
- Estudio de la evolución de los *Customers, Regional ISP* y *Core*. Se trata de separar Internet en estos tres grupos y después analizar las medidas básicas para cada uno de los grupos de forma separada. Comprobar si la evolución afecta a todos igual o que diferencias encontramos.
- Estudio de la evolución del *Core* de Internet. Se trata de una vez separados los tres grupos, estudiar con más profundidad

la evolución del centro de Internet, creando clasificaciones de los 20 AS más interconectados del *Core* por ejemplo.

2.2. Obtención de los objetivos

Para conseguir todos los datos necesarios para hacer los estudios, se analizarán las tablas del protocolo BGP que se encuentran en los *routers*. En estas tablas está contenida una gran información sobre la topología de Internet y para extraer los datos se programarán un conjunto de *scripts* en lenguaje Perl que permiten el análisis automático e iterativo de cada tabla.

No obstante, para estudiar la evolución temporal de estos resultados no es suficiente con analizar una tabla BGP de un instante concreto, sino que se necesitan datos de varios instantes a lo largo del tiempo. Para ello, en la Universidad de Oregon (EEUU) existe un repositorio de tablas BGP de los últimos siete años, tomadas cada dos horas. Gracias a esto, se puede analizar el estado de la topología de Internet en cualquier momento de los últimos siete años procesando la tabla BGP correspondiente de este repositorio. Por tanto se construirán otro conjunto de *scripts* para analizar los mismos parámetros en varias tablas y extraer datos de su evolución.

Por otra parte, existen bases de datos de los AS que contienen la información administrativa y ubicación de cada uno. Su consulta nos permitirá la identificación independiente de cada AS y se podrán conseguir resultados por países o zonas geográficas.

Finalmente, todos estos resultados han de tratarse estadísticamente y mediante su análisis inferir las conclusiones finales del estudio sobre la evolución temporal de la topología de Internet.

Capítulo

3

INTRODUCCIÓN

"Internet actual es el resultado de un crecimiento rápido y distribuido sin una planificación controlada por una autoridad centralizada."

- Danica Vukadinovic, Polly Huang, Thomas Erlebach

3.1. Internet y su crecimiento

Internet es la evolución de la interconexión progresiva de multitud de redes de todo el mundo, que ha convergido en una compleja red de millones de *routers* y máquinas que usan la estandarización de los protocolos de la pila OSI (en su versión práctica de TCP/IP) para comunicarse e intercambiarse información.

La historia del estudio de Internet siempre ha tratado de modelar y reproducir esta estructura matemáticamente, pero su naturaleza escapa a veces de los conceptos más lógicos, puesto que el significado de distancia o de relación puede llegar a no estar muy claro. Por otra parte, el número de máquinas, ancho de banda requerido, retardo y nuevos servicios ofrecidos ha ido siempre en aumento desde su creación, pero este crecimiento de la red no ha sido controlado por ningún organismo ni estandarización.

Por este motivo, el estudio de la evolución también cobra un interés especial por descubrir como ha aumentado la interconectividad entre las redes y como se ha escalado la estructura del grafo para albergar a todos estos nuevos miembros de Internet.

3.2. Los Sistemas Autónomos

Una de las formas de estudio de la topología de Internet es abstraer esta compleja red de máquinas y *routers* a una red formada por Sistemas Autónomos (de ahora en adelante, AS, de

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

Autonomous System). Un AS es un grupo de redes IP compuesto por máquinas y *routers* bajo una administración común que tienen una política de encaminamiento común e independiente del resto de AS. Un AS podría ser una gran empresa, un proveedor de servicios de Internet (o ISP) o un centro de investigación, por ejemplo.

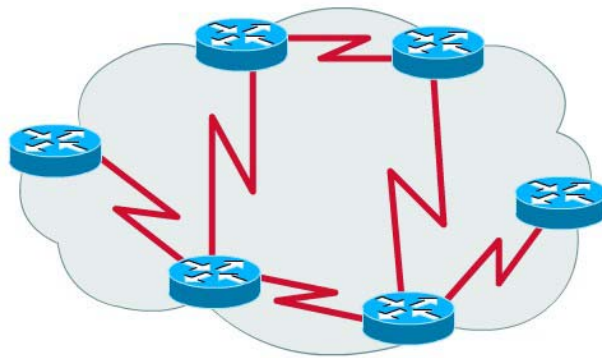


Figura 1 Representación de un AS

Cada AS tiene un número de 16 bits único que le identifica y que le ha sido asignado por un centro Registrador de Rutas de Internet (o *Internet Routing Registry*, IRR).

Esta red de interconexión de AS es mucho más pequeña que la red de máquinas y *routers* que forma Internet, pero conserva muchos de los datos e indicadores útiles para estudiar su evolución y crecimiento, puesto que las rutas en Internet se construyen a partir de los AS. La red de AS tiene forma de grafo, donde cada AS es un nodo y cada conexión entre dos AS forma un enlace. Aunque un AS tenga muchos *routers* y conexiones externas con otros *routers* de otros AS, si se usa esta abstracción se tiene que todos los *routers* y máquinas de un AS_i quedan englobadas dentro del nodo del AS_i y todas las conexiones entre varios *routers* de un mismo AS_i con otro AS_j quedan englobadas dentro del mismo enlace que conecta los dos AS.

La política de encaminamiento común para todos los *routers* de un AS hace posible esta abstracción.

Las conexiones entre AS se establecen mediante contratos entre los dos AS participantes y pueden ser de varios tipos (de proveedor a cliente, de cliente a proveedor, de cliente a cliente, peering o siblings). Este tipo de conexiones identifica el sentido de las rutas que comunican ambos AS y el rol que adoptará cada uno en el intercambio de datos.

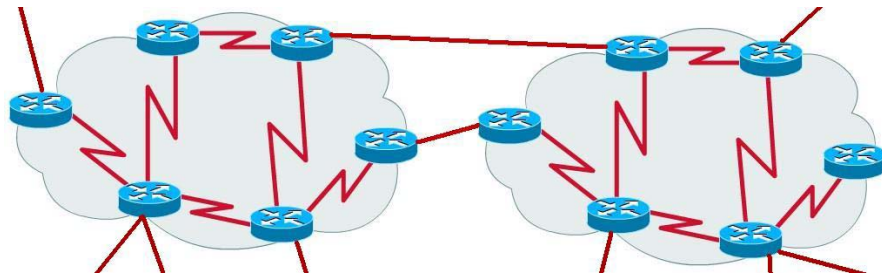


Figura 2 Interconexión entre 2 AS

3.3. Métodos de análisis de rutas

Para estudiar la evolución de la topología de Internet se usa como datos básicos las rutas definidas entre AS. En ellas se puede encontrar tanto los nodos (los propios AS) como los enlaces (conexiones entre un AS y el siguiente) de toda Internet.

La forma de obtener las rutas de un AS puede realizarse de dos maneras:

En primer lugar, efectuando pruebas activas. Consiste en lanzar *traceroutes*¹ desde un punto hacia muchos otros de toda

¹ *traceroute* es una aplicación que retorna el camino (traza) en máquinas o *routers* desde el lugar donde es ejecutado hasta el destino indicado. Ejemplo recortado de una salida de un *traceroute*:

```
> tracert www.yahoo.com
1 moche.fib.upc.es [147.83.58.16]
2 anella-upc.cesca.es [193.147.232.17]
3 GE1-0-0.EB-Barcelona0.red.rediris.es [130.206.202.1]
...
```

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

Internet y analizar los caminos generados para llegar a su destino. Realizando un gran número de pruebas se obtiene un conjunto de caminos que cruzan Internet en aquel momento pero esto no es útil para nuestro estudio por varios motivos:

- Los nodos de los caminos representan *routers* o máquinas, y para identificarlos con sus AS es necesario un proceso extra. Este coste extra para conseguir los números de AS es un lastre si se puede conseguir directamente los AS de otro manera.
- Se necesitaría una lista muy extensa de destinos (en el caso ideal serían todas las direcciones IP posibles) para que los *traceroutes* pudieran dar con todos los mejores caminos de Internet y llegar a todas las partes. Además, aún teniendo estos destinos, mientras se ejecutaran todas las pruebas las rutas cambiarían dinámicamente y nuestro modelo resultante podría no ser coherente además de incompleto.
- Las pruebas activas retornarían datos del instante en el que se ejecutan, pero no se pueden obtener datos del pasado para estudiar la evolución. Empiezan a existir históricos de este tipo de datos pero todavía son muy recientes y no tienen la suficiente antigüedad para ser datos útiles para este estudio.

En segundo lugar, realizando procesos pasivos sobre las tablas BGP. Las tablas BGP son volcados directos de los *routers* de su tabla de encaminamiento BGP y en ellas se pueden encontrar todas las rutas de AS desde un punto hasta cualquier red de destino de Internet. Además, al ser una imagen instantánea extraída de un *router*, no se tiene el problema de incoherencia de datos entre unas rutas y otras. Y por último, al ser una fuente de

datos de mucho valor, existe un histórico de tablas BGP de los últimos siete años disponible para su análisis y uso estadístico.

3.4. BGP

El protocolo de encaminamiento que se utiliza para la gestión de las rutas entre AS es BGP (*Border Gateway Protocol*). BGP se encarga de mantener, aprender y comunicar las rutas entre AS y también de encaminar cada paquete de datos que circula a través del AS. El funcionamiento de BGP es complejo y muy amplio, pero para este estudio solamente es necesario comprender como estructura y almacena las rutas en las tablas BGP.

Una tabla BGP de un AS consiste en una lista con todos los prefijos de red IP disponibles en Internet y para cada prefijo, una secuencia de números de AS que indica la ruta que tiene que seguir un paquete de datos para llegar a la red destino de dicho prefijo. Además de la ruta de AS, también tiene la dirección IP del próximo *router* o salto a visitar y una serie de parámetros más que utiliza el protocolo BGP.

El formato de una tabla BGP es el siguiente:

```

BGP table version is 952470, local router ID is 198.32.162.100
Status codes: s suppressed, d damped, h history, * valid, > best, i -
internal
Origin codes: i - IGP, e - EGP, ? - incomplete

Network          Next Hop          Metric  LocPrf  Weight  Path
*> 4.56.204.0/24  66.185.128.48    514                    0  1668 10753 i
* 194.12.178.0/23 192.121.154.25                    0  1755 6754
* 204.71.102.0     204.42.253.253                    0  267 701 5056
* 216.205.0.0/19  192.121.154.25                    0  1755 701 i
    
```

Figura 3 Formato de las tablas BGP

3.5. Análisis de las tablas BGP

En una tabla BGP esta contenida una gran información sobre la topología de Internet. Para extraer estos datos, se programan un conjunto de *scripts* en lenguaje Perl que permiten el análisis automático e iterativo de cada tabla. Este primer grupo de *scripts* generan un gran volumen de datos con la representación de la topología de toda Internet en forma de grafo. Como la tabla contiene todo un enorme conjunto de caminos, se pueden fijar todos los AS conocidos y después añadir todos los enlaces entre ellos que indiquen los caminos.

Por tanto, de la tabla BGP se ha obtenido el grafo de AS de Internet. De este grafo, se puede obtener directamente ciertas métricas de su topología, como puede ser el grado de cada nodo o AS, el coeficiente de clustering o la longitud media del camino.

Posteriormente, estos datos generados por el primer conjunto de *scripts* se filtran y analizan por un segundo conjunto de *scripts*, que son los que profundizan más para sacar métricas más avanzadas, extraen la ubicación geográfica e IRR de cada AS (utilizando una base de datos externa a la tabla) y separan Internet en los tres grupos *Customers*, *Regional ISP* y *Core*. Una vez aplicados todos estos *scripts* se obtiene un conjunto de datos mucho más tratable y que se usará para obtener los resultados referentes a una sola tabla BGP.

El siguiente esquema ilustra el proceso para una tabla:

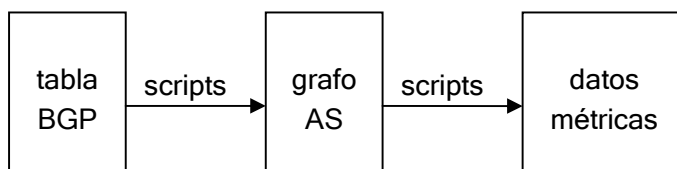


Figura 4 Esquema del proceso de análisis de una tabla

3.6. Estudio temporal de los datos

Hasta aquí se han conseguido los resultados sobre una tabla BGP de un instante puntual en el tiempo. Para que el proyecto obtenga una dimensión temporal, se obtendrán las tablas BGP de varios momentos en el pasado (concretamente, desde cinco años atrás hasta hoy) que contienen la información de Internet en la fecha en que se tomó la tabla.

El paso siguiente es programar *scripts* que apliquen todo el análisis de una tabla a cada una de las tablas de los sucesivos años. Una vez ejecutados estos *scripts* masivamente sobre muchas tablas, se tendrán N paquetes de resultados para N instantes del tiempo y solamente hará falta el último conjunto de *scripts* que procesen estos paquetes de resultados para calcular la evolución temporal de cada métrica o aspecto por separado y obtengan los resultados definitivos de estos estudios.

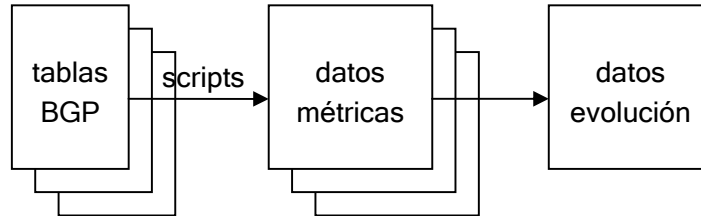


Figura 5 Esquema de proceso de N tablas

3.7. Extracción de conclusiones

Con el proceso de tratamiento de datos concluido, se tiene un conjunto de resultados sobre la evolución de las métricas y la topología de Internet en los últimos años que necesitarán del último estudio estadístico para extraer las conclusiones de este proyecto.

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

Estas conclusiones se basaran en los datos numéricos que haya proporcionado los estudios, pero hay otra serie de factores que afectan a la evolución de Internet y su topología y que no aparecen en las tablas BGP. Estos factores son bastante variados y afectan en mayor o menor medida al crecimiento de la red. Un ejemplo de ellos es el factor económico: el precio de obtener un número AS y de contratar relaciones de *peering* o provisión de tráfico con otras compañías es variable, y esto puede influir en la manera que Internet crece en una zona más que en otra.

Estos factores no se han tenido en cuenta en este estudio, porque pertenecen más al campo de la investigación comercial y sociológica que no al análisis matemático de los datos en el que esta basado.

Capítulo

4

BACKGROUND

4.1. Arquitectura de Internet

4.1.1. Introducción

Internet es la interconexión de redes que permite intercambiar información a aplicaciones que se ejecutan en máquinas distintas. En este contexto, nos uno se encuentra que en cada máquina puede haber varias aplicaciones ejecutándose simultáneamente y que necesitan de comunicarse con aplicaciones que se encuentran en otras máquinas de forma similar a la que lo harían con aplicaciones que se encuentren en su misma máquina. Además, las máquinas pueden estar conectadas a redes locales distintas y de tecnologías diferentes.

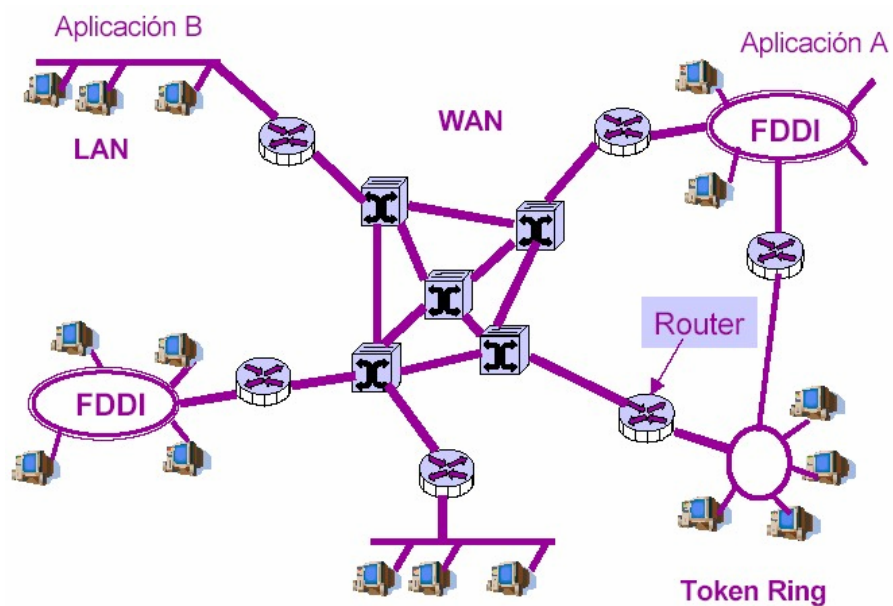


Figura 6 Arquitectura de interconexión de redes

Estas características nos llevan a la necesidad de unos dispositivos físicos específicos y de un software de comunicación que implemente protocolos de comunicación, estructurado en

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

niveles que se dividan el trabajo necesario para satisfacer las necesidades del sistema planteado.

Los requisitos fundamentales de la interconexión de redes son tres:

- la comunicación entre redes heterogéneas,
- el encaminamiento y entrega de los datos entre procesos en redes distintas y
- la no exigencia de cambios en la arquitectura de las redes que se conectan, acomodándose las diferencias a los sistemas anteriores.

La arquitectura de protocolos que se propone para resolver estos requisitos se desglosa en un modelo por niveles para reducir la complejidad. El problema global se subdivide en diversas áreas con problemas aislados y a cada uno de ellos se le asocia un nivel. El modelo de referencia es el Modelo OSI de siete niveles pero en la práctica la arquitectura de Internet sólo se implementa en cuatro.

4.1.2. El Modelo OSI

En 1977, la Organización Internacional de Estándares (OSI), integrada por industrias representativas del medio, creó un subcomité para desarrollar estándares de comunicación de datos que promovieran la accesibilidad universal y una interoperabilidad entre productos de diferentes fabricantes. El resultado de estos esfuerzos es el Modelo de Referencia de Interconexión de Sistemas Abiertos (Modelo OSI).

El Modelo OSI plantea solucionar los requisitos de la interconexión de redes en 7 niveles, que son los siguientes:

Nivel físico: Define el medio de comunicación utilizado para la transferencia de información mediante la definición de conexiones físicas entre computadoras. Describe el aspecto mecánico, eléctrico y funcional de la interfaz física.

Nivel enlace: Proporciona facilidades de transmisión de datos entre dos estaciones de red. Establece la comunicación lógica y el método de acceso que la máquina debe seguir para transmitir y recibir mensajes.

Nivel red (o interred): Define el encaminamiento y envío de paquetes entre redes. Es su responsabilidad establecer, mantener y terminar las conexiones y conmutar, encaminar y controlar la congestión de paquetes de información en una subred.

Nivel transporte: Actúa de puente entre los tres niveles inferiores de comunicación y los tres superiores de proceso y garantiza una entrega confiable de la información.

Nivel sesión: Establece el inicio y final de la sesión y su posible recuperación. Provee los servicios utilizados para la organización y sincronización del diálogo entre usuarios y el manejo e intercambio de datos.

Nivel presentación: Traduce el formato y asigna una sintaxis a los datos para su transmisión en la red. Determina la forma de presentación de los datos sin preocuparse de su significado o semántica.

Nivel aplicación: Proporciona servicios al usuario del Modelo OSI: comunicación entre dos procesos de aplicación, aspectos para aplicaciones específicos de redes, etc.

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

El esquema de la pila de protocolos para dos máquinas finales separadas por dos nodos intermedios sería el siguiente:

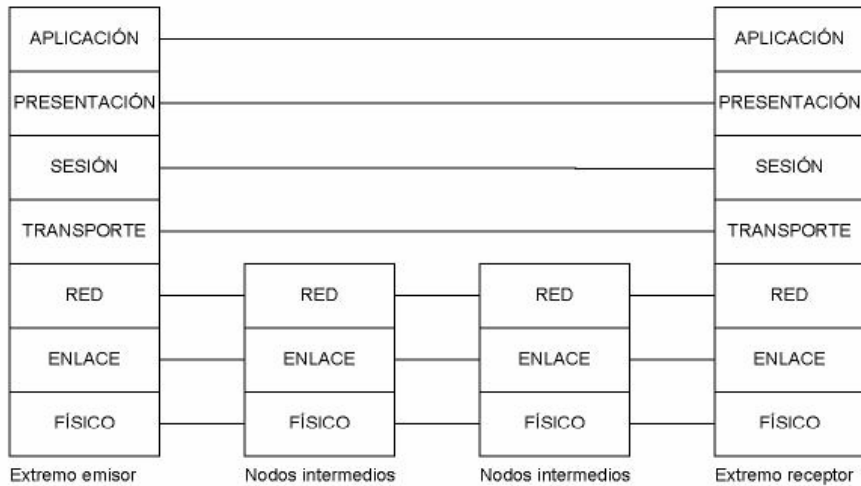


Figura 7 Estructura de capas del Modelo OSI

4.1.3. TCP/IP

El Modelo OSI es una estratificación funcional por niveles para tareas de comunicación pero no especifica un estándar de comunicación para dichas tareas. Sin embargo, muchos estándares y protocolos cumplen con las estratificaciones del Modelo OSI.

La arquitectura TCP/IP sobre la que se soporta Internet es uno de ellos, pero a diferencia del Modelo OSI, solamente tiene cuatro niveles conceptuales, que son enlace, red, transporte y aplicación. La correspondencia con el Modelo OSI sería la siguiente:

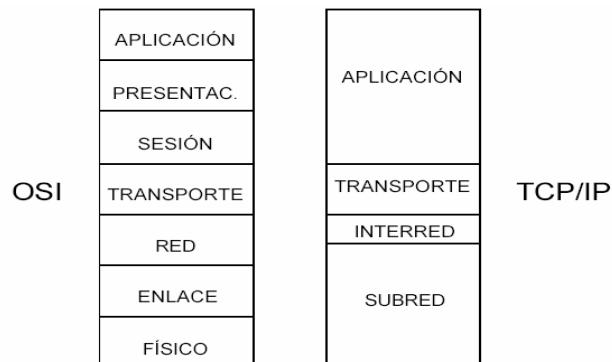


Figura 8 Correspondencia entre el Modelo OSI y TCP/IP

Esta pila de protocolos es la que hace funcionar Internet y dentro de ella, entre otros protocolos están el protocolo IP que se encarga del encaminamiento y direccionamiento en el nivel de interred y el protocolo TCP que se encarga del control de errores y flujo en el nivel de transporte.

4.1.3.1. IP (Internet Protocol)

El protocolo IP proporciona un sistema de distribución no fiable y especifica que la unidad básica de transferencia de datos es el datagrama. Los datagramas pueden ser retrasados, perdidos, duplicados, enviados en una secuencia incorrecta porque IP no tiene control de errores, esto será solucionado en el nivel inmediatamente superior. También pueden ser fragmentados intencionadamente para permitir que un nodo con un buffer limitado pueda coger todo el datagrama, es responsabilidad del protocolo IP reensamblar los fragmentos del datagrama en el orden correcto en el destino.

Otra de sus características es que cuando los datagramas viajan de unos equipos a otros, es posible que atraviesen diferentes tipos de redes. El tamaño máximo de estos paquetes puede variar de una red a otra, dependiendo del medio físico que se emplee para la transmisión. A este tamaño máximo se le denomina MTU (*Maximum Transmission Unit*), y ninguna red puede transmitir un paquete de tamaño mayor a esta MTU.

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

4.1.3.2. Direccionamiento IP

Para poder identificar una máquina dentro de una red se utiliza lo que se llama direccionamiento IP. Cada máquina con el protocolo IP tiene un número de 32 bits único en toda la red, en este caso, es único para toda Internet. Esta dirección IP consta de dos partes: el identificador de red y el identificador de *host* o máquina. El identificador de red distingue una red y debe ser asignado por el *Network Information Center* (InterNIC) si la red forma parte de Internet. Un ISP puede comprar bloques de direcciones de red a InterNIC y puede asignarlos como crea necesario. El identificador de *host* distingue a un *host* en una red y es asignado por el administrador de red.

Para facilitar la escritura y memorización, estos números de 32 bits se suelen expresar con 4 números decimales, entre 0 y 255, separados por un punto. Por ejemplo:

Valor binario: 1010110 00010000 01111101 11001100
Valor decimal: 172.16.121.204

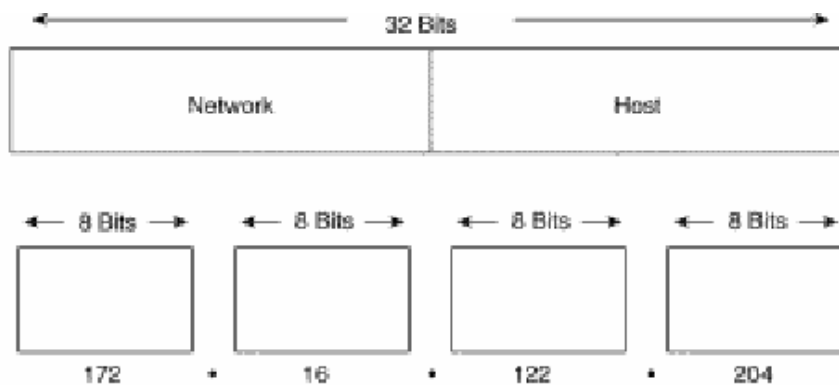


Figura 9 Estructura de una dirección IP

Las redes IP pueden dividirse en redes más pequeñas llamadas subredes (o *subnets*). El *subnetting* aporta ciertos beneficios al administrador de la red, entre ellos mayor

flexibilidad, uso más eficiente de las direcciones de red y la capacidad de contener tráfico *broadcast*.

Las subredes están bajo control administrativo local. De este modo el mundo exterior a una organización la ve como una sola red y no tiene conocimiento detallado de la estructura interna de dicha organización

Una misma dirección de red puede partirse en varias subredes, por ejemplo 172.16.1.0, 172.16.2.0, 172.16.3.0 y 172.16.4.0 son subredes dentro de la misma red 171.16.0.0. (Todos los ceros en la porción del *host* de una dirección especifican la red entera)

Una dirección de subred se crea quitando bits del campo de *host* y asignándolos al campo de subred. El número de bits agregados es variable y se especifican mediante la máscara de subred. Esta máscara puede expresarse en binario del mismo modo que la dirección IP o bien en decimal adjunta a la dirección (por ejemplo, 234.122.7.34/24). Dicha máscara nos indica cuantos bits de la dirección indican la red a la que pertenece.

Las direcciones IP hacen que el envío de datos entre ordenadores se haga de forma eficaz, de un modo similar al que se utilizan los números de teléfono.

4.1.3.3. Notación CIDR (*Classless Inter-Domain Routing*)

CIDR especifica un rango de direcciones IP combinando una dirección y su máscara asociada. Con la aparición de CIDR, se deja atrás el concepto de clase (A, B, C, D y E) introducido inicialmente en el estándar IP. CIDR usa el siguiente formato:

XXX.XXX.XXX.XXX/n

donde n es el la posición del último bit con valor 1 de la máscara.

Por ejemplo: 192.168.12.0/24, se refiere una máscara de 11111111.11111111.11111111.00000000, o como suele expresarse, 255.255.255.0

Además, especifica que el último octeto se refiere al identificador de *host*.

4.1.3.4. TCP (Transfer Control Protocol)

El protocolo TCP proporciona un servicio de comunicación que forma un circuito, es decir, que el flujo de datos entre el origen y el destino parece que sea continuo. Este circuito virtual se le llama conexión. El principal propósito de TCP es proporcionar una conexión lógica fiable entre dos procesos remotos.

Sus características principales son:

- **Transferencia de datos a través de un canal:** Desde el punto de vista del nivel de aplicación, TCP transmite un flujo continuo de bytes a través de Internet. TCP es el que se encarga internamente de trocear los datos en bloques para transmitirlos a través de IP y de reensamblar los recibidos.
- **Fiabilidad:** TCP asigna un número de secuencia a cada byte transmitido, y espera un reconocimiento afirmativo (ACK) del TCP receptor. Si el ACK no se recibe dentro de un intervalo de *timeout*, los datos se retransmiten. Como los datos se transmiten en bloques (segmentos de TCP), a la máquina de destino sólo se le envía el número de secuencia del byte de cada segmento. El TCP receptor utiliza los números de secuencia para organizar los segmentos cuando llegan fuera de orden, así como para eliminar segmentos duplicados.
- **Control de flujo:** El TCP receptor, al enviar un ACK al emisor, indica también el número de bytes que puede recibir aún, sin que se produzca sobrecarga y desbordamiento de sus *buffers* internos. Este valor se envía en el ACK en la forma del número de secuencia más elevado que se puede recibir sin problemas. Este mecanismo se conoce también como mecanismo de ventana.

- **Multiplexación:** Consiste en poder mantener varias conexiones TCP entre dos máquinas. Se consigue usando puertos que son dispositivos lógicos que identifican a las aplicaciones.

En resumen, TCP coordina múltiples aplicaciones que se encuentren interactuando con la red simultáneamente de tal manera que los datos que envíe una aplicación sean recibidos correctamente por la aplicación remota. La forma de asegurarlo es añadiendo identificadores de cada una de las aplicaciones. Realiza además una verificación por suma, para asegurar que la información no sufrió alteraciones durante su transmisión.

4.1.4. Encaminamiento IP

El encaminamiento es el encargado de hacer llegar los paquetes de información a destinos que no se encuentren en la misma red.

Físicamente dos redes sólo pueden estar conectadas mediante una máquina, pero la conexión puede no ser óptima, ya que no se puede garantizar que la máquina que une las dos redes coopere en la comunicación de otras máquinas. Para tener una conexión estable se necesitan máquinas dedicadas a transferir continuamente paquetes de una red a la otra. Este tipo de máquinas se llaman *routers*.

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

Un esquema de dos redes diferentes que se interconectan a través de un *router* intermedios:

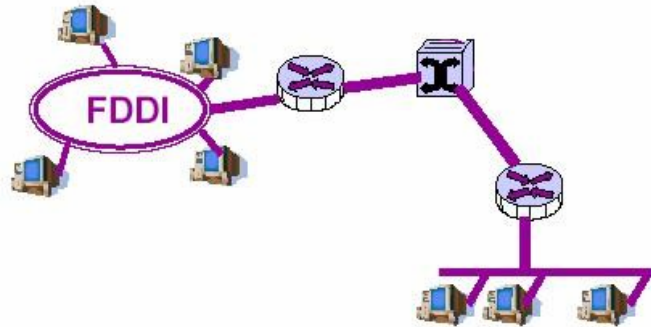


Figura 10 Interconexión de redes y encaminamiento IP a través de un router

4.1.4.1. Routers

Un *router* es un conmutador de paquetes que opera a nivel de red del Modelo OSI. Sus principales características son:

- Permite interconectar tanto redes de área local (LAN) como redes de área extensa (WAN).
- Proporcionan un control del tráfico y funciones de filtrado a nivel de red, es decir, trabajan con direcciones de nivel de red, como por ejemplo, con direcciones IP.
- Son capaces de encaminar dinámicamente, es decir, son capaces de seleccionar el camino que debe seguir un paquete en el momento en que les llega, teniendo en cuenta factores como líneas más rápidas, líneas más baratas, líneas menos saturadas, etc.
- A diferencia de los *switches* y *bridges*, que sólo leen la dirección MAC ², los *routers* analizan la información contenida

² Las direcciones MAC son las direcciones del nivel enlace, identificativas del dispositivo de red de cada máquina. Son útiles para el direccionamiento en ausencia de protocolos de nivel red.

en un paquete de red leyendo la dirección de red. Los *routers* leen cada paquete y lo envían a través del camino más eficiente posible al destino apropiado, según una serie de reglas recogidas en sus tablas de encaminamiento.

El *router* es entonces la conexión vital entre una red y el resto de las redes.

4.1.4.2. Tablas de encaminamiento

El encaminamiento se realiza mediante las tablas de encaminamiento. Estas tablas son una estructura con los posibles destinos y la manera de llegar hasta ellos. Cada vez que se tiene que encaminar un datagrama IP, cada *router* consulta su propia tabla para saber cual es el mejor camino para hacer llegarlo al destino correcto.

Una tabla es imposible que contenga toda la información de todos los posibles destinos y los caminos para llegar, pero con las subredes y el CIDR, las tablas solo han de tener los prefijos de red, en lugar de todas las direcciones IP.

Un ejemplo de tabla de encaminamiento IP:

Destino	Router	Máscara	Flags	MTU	Interfaz
149.76.1.0	149.76.1.2	255.255.255.0	U	1500	eth1
149.76.2.0	149.76.1.3	255.255.255.0	U	1500	eth1
0.0.0.0	149.76.1.1	0.0.0.0	U	1500	eth0

Figura 11 Tabla de encaminamiento IP

4.1.4.3. Rutas estáticas y rutas dinámicas

Las rutas de estas tablas pueden ser:

- **Rutas estáticas:** creadas por los administradores de red manualmente y no se verán nunca modificadas.
- **Rutas dinámicas:** generadas y modificadas dinámicamente a través de la comunicación automática entre *routers*, que se

intercambian información sobre sus rutas a través del protocolo ICMP y sus mensajes de actualización. Si, por ejemplo, un enlace se cae o un camino está saturado, se envían mensajes para que las tablas sean consistentes y estén actualizadas en todo momento.

4.1.4.4. Ruta por defecto (*Default Gateway*)

Como se ha dicho, no es posible que una tabla contenga todas las direcciones de redes de Internet, así que en la tabla de encaminamiento solo aparecen las direcciones de las redes que estén directamente conectadas a la red en la se encuentra el paquete a través de un *router*. Todo el resto de direcciones quedan englobadas en el llamado ruta por defecto (o *Default Gateway*), que indicará una salida para todos los paquetes que no se dirijan a máquinas de la red o a redes que se encuentren directamente conectadas a esa red. Es la ruta por defecto cuando no se encuentra la red destino en la tabla de encaminamiento.

4.1.4.5. Algoritmo de encaminamiento

A partir de una dirección IP y de la tabla de encaminamiento, un *router* puede determinar si:

- Los datos se entregarán de manera directa, porque la máquina de destino se encuentra en la misma red que el *router*.
- Los datos se enviarán a través de una pasarela (otro *router*) a la red donde se encuentra la máquina destino.
- Los datos se enviarán a la pasarela de la ruta por defecto, que determinará el siguiente paso en el encaminamiento de los datos.

4.2. Sistemas Autónomos

Al principio, Internet eran unas pocas redes interconectadas por *routers* y compartían la información de encaminamiento. Cada tabla contenía información de todas las redes IP conectadas, en realidad era como tener una única red. Pero debido al crecimiento de las redes, el aumento de su tamaño y de la frecuencia de intercambios de información llegó a ser inmanejable.

Por este motivo se cambió el modelo para el encaminamiento global considerando Internet dividida en varios Sistemas Autónomos (AS): conjuntos de redes y *routers* bajo la misma administración.

Hasta aquel momento se había mirado el encaminamiento desde el punto de vista de la arquitectura pero a partir de entonces se debía mirar desde el punto de vista de la administración.

4.2.1. Sistemas Autónomos

Un Sistema Autónomo o *Autonomous System* (de ahora en adelante, AS) es un grupo de redes de direcciones IP que son gestionadas por uno o más operadores de red que poseen una clara y sola política de encaminamiento. Esta definición hace referencia a la característica fundamental de un AS: realiza su propia gestión del tráfico que fluye entre él y los restantes AS que forman Internet.

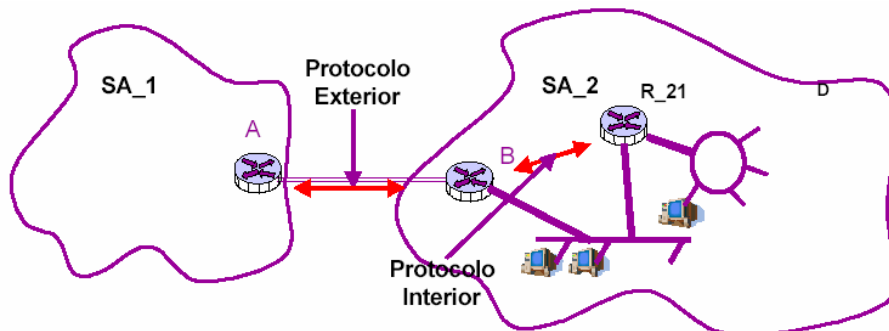


Figura 12 Protocolos de enrutamiento exteriores e interiores

A su vez cada AS es como una Internet en pequeño, ya que normalmente tiene nodos físicamente separados; por ejemplo el AS de *arsys.es* tiene nodos en Logroño, Madrid y Londres. Un AS está formado por otras redes más pequeñas, las cuales pueden ser también conjuntos de redes y así sucesivamente hasta llegar al nivel mínimo que es la red local o el equipo individual de un usuario.

Por tanto un AS es una red componente de Internet en el máximo nivel jerárquico. Internet es simplemente el resultado de la agregación de AS conectados entre sí.

Las redes dentro de un AS se comunican entre si información de enrutamiento de aplicación específica en ese AS usando un protocolo interior (*Interior Gateway Protocol, IGP*). Un sistema autónomo comparte información de enrutamiento con otros AS usando un protocolo exterior (*Exterior Gateway Protocol, EGP*). BGP (*Border Gateway Protocol*) es el protocolo estándar para enrutamiento exterior.

Cada AS tiene un número asociado el cual es usado como un identificador en el intercambio de información del enrutamiento externo. Este número es de 16 bits con lo que se puede llegar a los 65536 AS. Sin embargo, no todos están asignados y algunos de los asignados no están operativos. En la actualidad existen unos 16.000 AS registrados.

4.2.2. Encaminamiento de Sistemas Autónomos

4.2.2.1. Protocolos interiores (IGP)

A diferencia del encaminamiento exterior, donde se utiliza el BGP de forma estándar, en el encaminamiento interior hay un gran número de protocolos diferentes debido a la variedad de tipologías y tecnologías que pueden formar un AS. Aunque raramente dentro de un AS se utiliza más de uno para sus comunicaciones internas.

Los más conocidos son el *Routing Information Protocol* (RIP) basado en el principio "vector de distancias" y el *Open Shortest Path First Protocol* (OSPF) basado en "estado de enlaces".

4.2.2.2. Protocolos exteriores (EGP)

Se pueden clasificar los protocolos de encaminamiento exteriores según el modo que el protocolo representa la topología de la red y los prefijos IP que son alcanzables desde dicha red. Estas dos categorías son los protocolos de vector de distancias (*Distance Vector, DV*) y los protocolos de estado de enlaces (*Link State, LS*).

El funcionamiento de cada uno (sin entrar en detalles ni ejemplos porque no son relevantes para este proyecto) es el siguiente:

- **Vector de distancias (DV):** Esta clase es probablemente la más fácil de entender. Un protocolo DV que funcione sobre un nodo empieza inicializando una tabla con información acerca de los prefijos a los que está directamente conectado. El coste asociado a esos enlaces es cero. El coste para el resto de prefijos alcanzables se calcula sumando la métrica del enlace al coste que anuncia el *router* vecino por el que se llega ese prefijo.

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

La ventaja de los protocolos DV reside en que son fácilmente comprensibles y sencillos de implementar. Las desventajas son que contienen elementos que afectan negativamente a la escalabilidad y no pueden manejar ciertas situaciones en caso de fallo. La principal razón es que los mensajes que se pasan los *routers* unos a otros son básicamente tablas de encaminamiento. Esta información expira al cabo de cierto tiempo y por tanto es necesario retransmitir de nuevo a intervalos concretos. Como las redes de hoy en día pueden contener varios cientos de miles de prefijos, el factor de escalabilidad limita el uso de los protocolos DV.

- **Estado de enlace (LS):** Esta clase de protocolos trabaja de manera muy distinta a como lo hacen los protocolos DV. El modo en el que la información se comunica es a través de LSPs (*Link State Packets*). Estos paquetes contienen información del *router* que los genera y de los *routers* y redes a los que está conectado, incluyendo el coste para llegar a ellos. Un *router* genera un LSP por sí mismo y se lo envía al resto de sus vecinos. Esto se repite cada vez que el *router* se enciende, cada vez que hay un cambio topológico (por ejemplo, la caída de un enlace), o periódicamente para refrescar antiguos LSP en la red.

Hay un algoritmo que se encarga de asegurar que cada LSP de cada *router* es entregado al resto de *routers* en la red. Una vez que un *router* haya recibido todo el conjunto de LSP de la red, puede construir un mapa topológico de la red y después hacer cálculos para decidir cuál es el camino más corto para llegar a cualquier destino.

Una distinción importante entre los protocolos DV y LS es que los nodos que utilizan protocolos LS tienen información completa acerca de la topología de la red y de todos los caminos posibles. La implicación más importante de esta característica es que son protocolos que soportan mayor escalabilidad. Primero porque los mensajes que se envían son más reducidos y segundo porque

cuando hay un cambio en la topología de la red, la información que debe enviarse es proporcional al cambio que se ha producido. En los protocolos DV, si hay un cambio topológico, la cantidad de información que circula es función del número de prefijos que hay en la red (que suele ser muchísimo mayor).

4.3. BGP (Border Gateway Protocol)

BGP es un protocolo que utiliza algoritmos del tipo DV dentro de la clase de los EGPs. Usa TCP como protocolo de transporte y por ello siempre involucra dos nodos. En un momento dado pueden coexistir varias sesiones BGP dentro de una red, y un *router* puede tomar parte en varias de ellas, pero lo importante es que en una sesión concreta solo tiene lugar entre dos *routers*. Estos, antes de iniciar una sesión BGP establecen una conexión TCP y a partir de aquí, empiezan a intercambiar mensajes BGP.

Cuando un *router* anuncia un prefijo a uno de sus vecinos, se considera válida esta información hasta que el mismo *router* explícitamente anuncia que la información ya ha caducado o hasta que la sesión BGP se pierde. En otras palabras, BGP no requiere que la información de encaminamiento se refresque periódicamente.

Otra característica de BGP es que al anunciar un prefijo a cualquier vecino, se pueden asociar ciertos atributos a ese prefijo tales como:

- Siguiendo salto (*hop*) que deben hacer los paquetes a ese destino.
- Varias métricas especificando el grado de preferencia para esa ruta.
- El camino de AS que ha traspasado el anuncio de ruta.
- La manera como el prefijo ha entrado en la tabla de encaminamiento en el AS fuente.

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

BGP se encarga de mover paquetes de una red a otra pero en algunos casos debe preocuparse de otras cuestiones que no tienen por que estar relacionadas con el objetivo de mover los paquetes de la forma más eficiente posible. Es posible que se deban considerar algunas restricciones relacionadas con cuestiones comerciales o políticas, por ejemplo:

- “una empresa no hace de red de tránsito para los mensajes de la competencia”
- “nuestros mensajes no deben pasar por países enemigos”

La esencia de BGP es el intercambio de información de encaminamiento entre dispositivos de encaminamiento. La información de encaminamiento actualizada se va propagando a través de un conjunto de redes.

BGP involucra tres procedimientos funcionales, que son:

- **Adquisición de vecino**

Se dice que dos dispositivos de encaminamiento son vecinos si están conectados a la misma subred y se han puesto de acuerdo en que ambos quieren intercambiar regularmente información de encaminamiento. Para llevar a cabo la adquisición de vecino, un dispositivo de encaminamiento envía a otro un mensaje OPEN. Si el dispositivo destino acepta la solicitud, devuelve un mensaje KEEPALIVE (la vecindad se mantiene viva) como respuesta.

- **Detección de vecino alcanzable**

Una vez establecida la relación de vecino, para mantener la relación se realiza la detección de vecino alcanzable enviándose periódicamente mensajes KEEPALIVE.

- **Detección de red alcanzable**

Para la detección de red alcanzable es necesario que cada dispositivo de encaminamiento tenga una base de datos con todas las redes que puede alcanzar y la mejor ruta para alcanzarla. Cuando se realiza un cambio en la base de datos es necesario enviar un mensaje UPDATE por difusión a todos los dispositivos de encaminamiento que implementan BGP para que puedan acumular y mantener la información necesaria.

Todos los mensajes BGP tienen una cabecera de 19 bytes que consta de tres campos:

- **Marcador:** sirve de autenticación, es decir, para que el receptor pueda verificar la identidad del emisor.
- **Longitud:** indica el tamaño del mensaje en bytes.
- **Tipo:** OPEN, UPDATE, NOTIFICATION y KEEPALIVE.

Además de la cabecera alguno de estos mensajes puede tener unos campos adicionales.

- El mensaje OPEN incluye la dirección IP del dispositivo de encaminamiento que envía el mensaje, un identificador de la red a la que pertenece y un temporizador como propuesta del tiempo que puede pasar sin recibir un KEEPALIVE o un UPDATE. Para indicar que acepta la solicitud envía un KEEPALIVE pudiendo poner en el temporizador un valor menor.
- El mensaje KEEPALIVE consta solamente de la cabecera.
- El mensaje UPDATE facilita dos tipos de información que incluso pueden enviarse en el mismo mensaje: la de una ruta particular a través del conjunto de redes y una lista de rutas previamente anunciadas por este dispositivo para que sean anuladas.
- El mensaje NOTIFICATION se envía cuando se detecta una condición de error: error en la cabecera del mensaje, error en el mensaje OPEN, error en el mensaje UPDATE, tiempo de mantenimiento expirado, error en la máquina de estados

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

finitos y cese para cerrar una conexión con otro dispositivo en ausencia de cualquier error.

La manera más simplista en que BGP puede escoger el mejor camino para un prefijo dado es escogiendo el camino mas corto de AS. Sin embargo, BGP permite un rango mucho más amplio de políticas de encaminamiento, tales como dar preferencia a una ruta según algún acuerdo comercial previo.

Al recibir un UPDATE, un *router* puede escoger si usa ese camino o no según sus políticas de importación, y si finalmente se escoge ese camino, si lo propaga hacia sus vecinos o no según sus políticas de exportación. Estas políticas se configuran en el mismo *router*.

En la práctica, las políticas BGP reflejan las relaciones comerciales entre AS vecinos y por ello se convierten en un elemento indispensable para el desarrollo de este estudio.

4.3.1. Tablas BGP

El resultado final de las sesiones BGP es una tabla que reside en cada uno de los nodos y que nos proporciona información acerca de rutas, prefijos e interconexión entre AS. Esta tabla se llama tabla BGP y tiene el siguiente aspecto:

Network	Next Hop	Metric	LocPrf	Weight	Path
*> 1.0.0.0	64.50.230.1			0	4181 65333 i
*> 2.0.0.0	64.50.230.1			0	4181 65333 i
* 3.0.0.0	216.140.2.59	979		0	6395 7018 80 i
*	64.200.199.4			0	7911 7018 80 i
*	134.222.85.45	0		0	209 7018 80 i
*	196.7.106.245			0	2905 701 7018 80 i
*	216.218.252.145			0	6939 7911 7018 80 i
*	207.46.32.32			0	8075 7018 80 i
*	213.200.87.254	909		0	3257 1239 7018 80 i
*	129.250.0.11	6		0	2914 7018 80 i
*	129.250.0.85	11		0	2914 7018 80 i
*	216.140.8.59	3		0	6395 7018 80 i
*	217.75.96.60			0	8434 1239 718 80 i
*>	208.186.154.35	0		0	5650 7018 80 i

BACKGROUND

*	193.0.0.56		0	3333	3356	7018	80	i
*	208.186.154.36	0	0	5650	7018	80	i	
*	209.123.12.51		0	8001	7911	7018	80	i
*	216.191.65.126		0	15290	7018	80	i	
*	194.85.4.249		0	3343	2603	239	80	i
*	193.251.128.22		0	5511	7018	80	i	
*	203.194.0.12		0	9942	3356	7018	80	i
*	195.219.96.239		0	8297	6453	7018	80	i
*	203.62.252.26		0	1221	4637	7018	80	i
*	204.42.253.253	0	0	267	2914	7018	80	i
*	195.66.224.82	23302	0	4513	7018	7018	80	i

Los campos de la tabla tienen el siguiente significado:

- **Network:** Prefijos alcanzables (marcadas con ">" las que son óptimas).
- **Next Hop:** *Router* a través del cual se llega a ese prefijo.
- **Metric, LocPrf, Weight:** Métricas de preferencias de BGP
- **Path:** Camino de AS que se deben cruzar para llegar a la dirección indicada en *Network*

Sea $O(u)$ el conjunto de prefijos que se origina desde un AS.

Se considera una sesión BGP $(u, v) \in E$ entre dos AS, u y v . v recibe un conjunto de actualizaciones de rutas R de u . Sea $\text{import}(u, v)$ $[R]$ la actualización de v tras aplicar las políticas de importación.

Después de esto, el AS guarda todas las actualizaciones importadas en su tabla BGP. EL AS entonces, sigue un proceso de selección que escoge la mejor ruta para cada prefijo. Sea $B(u, d)$ la mejor ruta escogida por u para el prefijo d . $B(u, d)$ es seleccionado escogiendo la ruta con mayor LocPrf, y en caso de empate seleccionando la ruta con el camino de AS más pequeño. En caso de empate existen otras reglas que pueden aplicarse.

Cada AS envía sólo su mejor ruta para un prefijo a sus vecinos. Las políticas de exportación permiten a un AS determinar si deben o no enviar su mejor ruta a un vecino. El AS u aplica sus políticas de exportación $\text{export}(v, u)$ a su conjunto de mejores

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

rutas, R , antes de enviarlas a un AS vecino v . Finalmente se obtiene $\text{export}(v,u)[R]$ que es lo que se transmite de u a v mediante una sesión BGP.

De este modo, cada *router* mantiene su tabla BGP donde aparecen un conjunto de rutas candidatas para ese *router*. Nos referiremos a una ruta candidata como una entrada de la tabla, que incluye un prefijo de destino, next-hop, med, LocPrf y el camino de AS para esa ruta. Para simplificar, se describen las entradas de la tabla para un prefijo d fijado. La entrada de la tabla para del AS u para el prefijo d es una ruta con un camino vacío de AS, notado como $e(u,d)$, si u origina el prefijo d . Sino, las entradas de u para d dependen de la mejor ruta de su AS vecino v , $B(v,d)$, así como las políticas de importación de u hacia v , y de las políticas de exportación de v hacia u .

Un ejemplo de redes y AS interconectados por BGP:

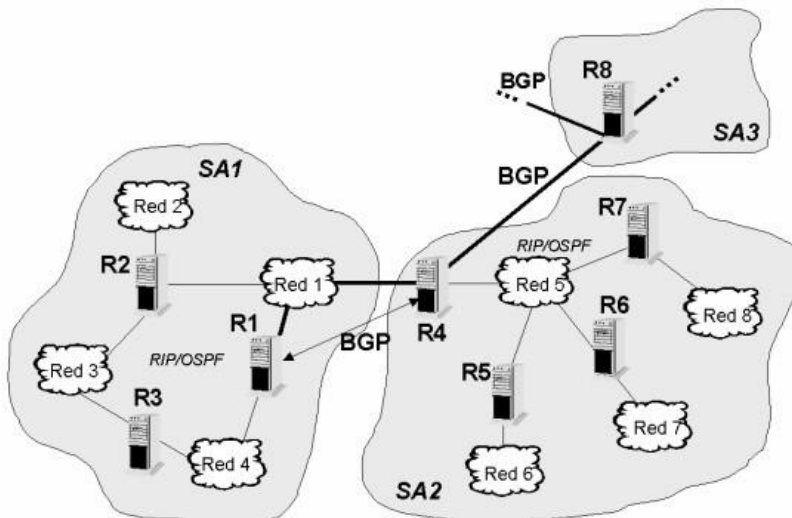


Figura 13 Redes y AS interconectados por BGP

Un AS puede especificar diversos conjuntos de políticas, incluyendo preferencias en la selección de rutas y filtrado. Sin embargo, las políticas de encaminamiento suelen estar restringidas a acuerdos comerciales negociados entre pares

administrativos. Hay un enorme potencial de conflicto y contradicción entre todas estas políticas, puesto que suelen configurarse manualmente en cada *router* por los operadores de un dominio administrativo. Para minimizar este potencial, se creó el *Internet Routing Registries* (IRR). El objetivo del IRR es hacer de repositorio de políticas de encaminamiento y realizar análisis de la consistencia de la información registrada. De todos modos, no todos los ISPs aceptan mostrar todas sus políticas y por ello el IRR no es una base de datos completa.

4.3.2. Internet Routing Registry (IRR)

Los IRRs son repositorios de políticas de encaminamiento. Surgen de la necesidad de conocer cual es la política de encaminamiento entre diversos AS, las topologías que hay entre ellos, cuales son las posibles rutas, o que componentes tiene la red (e.g. *routers*). Toda esta información se encuentra distribuida en varias bases de datos, agrupadas por zonas geográficas. Uniendo la información de todas ellas, se pueden obtener datos de cualquier AS registrado. Cuando un objeto se registra en el IRR puede ser consultado usando el servicio *Whois*³.

APNIC	Asia Pacífico
ARIN	Norte América, parte del caribe y África meridional
LACNIC	América Latina y el resto del caribe
RIPE	Europa, Medio Oriente, Asia central y África septentrional

Tabla 1 IRRs de Internet

En cuanto a las ventajas de mantener un registro actualizado con esta información, se pueden resumir en estos tres puntos:

- Proporciona una visión global de la topología de Internet.
- Facilita el trabajo a la hora de reconfigurar políticas de encaminamiento.
- Da soporte a la hora de detectar inconsistencias.

³ Whois es un servicio de los IRRs para consultar la información de sus registros en base a parámetros como el identificador de red o el número de AS

4.4. Relaciones entre AS

Los AS que forman Internet pueden relacionarse de diversas maneras desde el punto de vista administrativo y funcional. Estas relaciones son entre parejas de AS y se desprenden del análisis del grafo que forman la interconexión de los AS.

- *Provider to Customers (P2C) o Customers to Providers (C2P)*. Este tipo de relación, tal como su nombre indica, representa la relación que se da entre dos AS cuando uno de ellos provee al otro y para lo cual recibe una compensación económica.
- *Peering (PEER)*. La relación *peer-to-peer* (p2p) se da entre dos AS que intercambian información de sus rutas y de sus clientes pero no comparten información acerca de sus proveedores ni de sus *peerings*.
- *Sibling (SIB)*. Se dice que entre dos AS se da la relación de *Sibling* cuando hay intercambio total de información entre ambos (rutas, clientes, proveedores, etc.).

Un esquema de AS y redes interconectadas por BGP y con diferentes tipos de relaciones entre ellas:

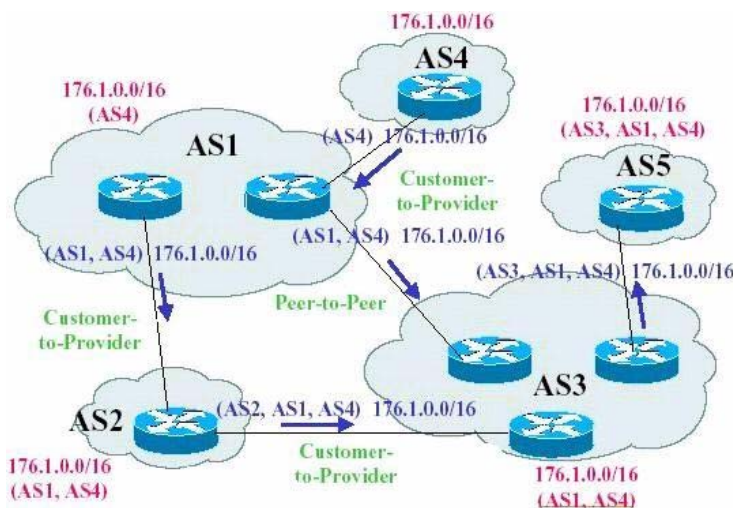


Figura 14 Tipos de relaciones entre AS

4.5. Otros conceptos

4.5.1. ISP (*Internet Service Provider*)

Un *Internet Service Provider* (ISP) es una compañía que ofrece acceso a Internet a otras compañías o a particulares. Un ISP se conecta a otras redes e ISPs, actuando como un *router* para el tráfico entre los ordenadores clientes y cualquier otra máquina conectada a Internet. Muchos ISPs se conectan a los proveedores de telecomunicaciones de un país.

Un ISP combina todas las peticiones de sus clientes y las envía a las líneas *backbone* de su operador de telecomunicaciones. Los grandes ISPs suelen contratar líneas privadas de banda ancha dependiendo en menor grado de los proveedores de telecomunicaciones. De este modo los clientes de dicho ISP no tienen que compartir la conexión con otros clientes de terceros ISPs que también usen ese proveedor de telecomunicaciones.

La mayoría de ISPs, además del servicio de conexión a Internet, ofrecen también correo electrónico, *hosting* para páginas web y otros servicios adicionales.

4.5.2. Backbone

Un *backbone*, traducido posiblemente como "espina dorsal", es el canal principal por donde viajan los datos de los nodos principales de una red. Permite conectar varias redes a una misma línea de alta velocidad y fiabilidad. Un *backbone* de Internet sigue la misma idea que un *backbone* en una red. Existen varias líneas en Internet que llevan la mayoría del tráfico de la red. Los grandes ISPs, las agencias de gobierno, las universidades y otras corporaciones suelen estar conectadas directamente a estas líneas. Esto les ofrece una conexión con mayor rendimiento y velocidad para acceder a los recursos de la red.

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

De este modo, se divide la red en subredes que se comunican a través de un canal más rápido y, por su tecnología, también más caro. Así se maximiza la eficiencia sin tener que cambiar toda la infraestructura de la red.

Ejemplo del *backbone* de la red académica catalana:

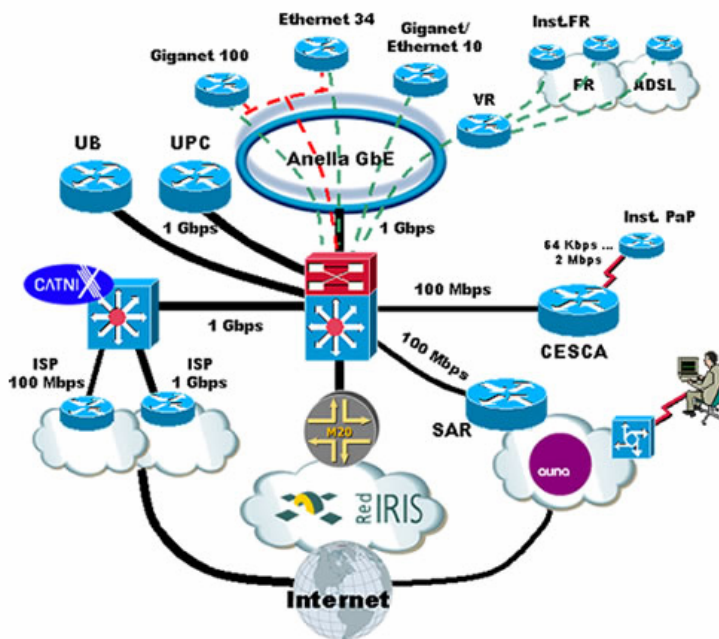


Figura 15 Backbone de la red académica catalana

4.5.3. Puntos neutros

Los puntos neutros son asociaciones donde los operadores y proveedores de Internet se reúnen para conectar directamente sus redes e intercambiar tráfico de Internet.

A los acuerdos de intercambio de tráfico entre proveedores de Internet se les denomina *peering*. Los principales beneficiados de los acuerdos de *peering* son los clientes de ambas empresas, ya que el tráfico que se dirija de la una a la otra lo hará a gran velocidad y sin pasar por intermediarios. Aunque normalmente se

exigen unas características concretas para poder hacerse miembro de un punto neutro.

Unos ejemplos de puntos neutros son:

- **CatNIX**, punto neutro de Catalunya localizado en el CESCA y que reúne a los proveedores más importantes que operan en Catalunya y a las universidades y redes públicas de la Generalitat de Catalunya.

- **Espanix**, punto neutro español localizado en el Centro de Datos de Banesto en Madrid y donde se reúnen operadores y proveedores de Internet para intercambiar su tráfico nacional, mejorando de esa forma la calidad de servicio ofrecida a sus clientes.

- **Linx** (London Internet Exchange), punto neutro más importante de Europa situado en Londres y distribuido entre varios centros de datos unidos entre si mediante anillos redundantes de fibra óptica. En el Linx coinciden operadores y proveedores de Internet de todo el mundo que intercambian continuamente más de 20 Gbps. En el Linx están publicadas aproximadamente el 48% de todas las rutas que existen en Internet.

4.6. Las zonas de Internet

Una interesante forma de dividir los AS de Internet en zonas es analizando su rol dentro de toda la red. De esta forma pueden separarse tres grupos:

- *Customers*. Son los AS clientes que están conectados únicamente a un sólo AS. Son el origen y el destino del tráfico y por consiguiente no proporcionan tránsito de datos. En este grupo estarían la mayoría de proveedores de servicios de Internet y

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

empresas con usuarios finales. Es el mayor grupo de todos y en él se encuentran un 70% de todos los AS.

- *Regional ISP*. Una vez se eliminan todos los AS del grupo *Customers* y sus relaciones, nos queda una red que ya no llega a usuarios finales pero que todavía tiene dos niveles de interconexión. El externo son los *Regional ISP*, que son proveedores de servicios de Internet importantes que dan servicio de interconexión a los *Customers*. Este grupo lo forman un 25% de los AS.

- *Core*. Finalmente, si se eliminan también los *Regional ISP* con sus relaciones, nos queda una red de AS muy interconectada entre ellos y compacta, que forma el *backbone* real de Internet y que a través de él circulan la mayoría de conexiones hechas en todo el mundo. En este grupo el número de AS es muy reducido y sólo representa el 5% del total.

Un dibujo básico de esta separación por zonas sería la siguiente. En ella se repartirían los AS en la proporción aproximada que se ha dicho.

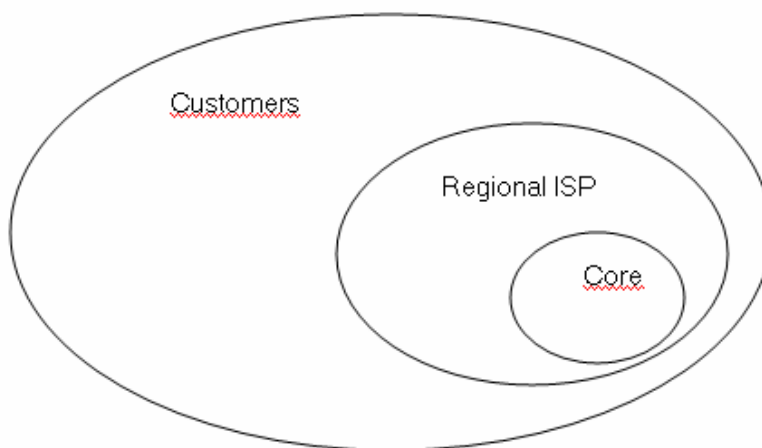


Figura 16 Representación de las zonas de Internet

4.7. Representación matemática y métricas

Nota: En toda la memoria y concretamente en esta sección, no se está usando un lenguaje formal ni matemático, sino que se están diciendo las cosas más "de palabra". La finalidad de este estudio no es la especificación exacta y matemática de la topología sino de un estudio más aproximado y cercano al significado de las redes, por este motivo me he permitido el no usar un lenguaje tan formal.

4.7.1. Grafo

La estructura de interconexión de Internet se modela matemáticamente como un grafo $G = (V, E)$, donde V es el conjunto de los vértices o nodos y E es el conjunto de las aristas o enlaces. Los nodos corresponden a los AS y los enlaces corresponden a las relaciones de encaminamiento que tienen dos AS.

El grafo puede ser dirigido si nos interesa conocer el tipo de relaciones que se establecen entre dos AS o no dirigido si simplemente se quiere saber si existe conectividad entre ellos o no.

4.7.2. Datos Básicos

- **Número de AS:** Es el número total de AS que están en el grafo
- **Número de enlaces:** Numero total de arcos que unen los nodos del grafo
- **Densidad:** Nos indica el grado de conectividad que hay en grafo. Densidad = número enlaces / número enlaces posibles, donde número enlaces posibles es $N(N-1)$, siendo N el número de nodos

- **Grado:** Es el número de enlaces que tiene un nodo o AS. Si es un grafo dirigido se separan el grado en grado de salida o grado de entrada dependiendo del sentido de los enlaces.
- **Diámetro:** es el cálculo de la distancia mayor que se recorre para llegar desde un AS_i a un AS_j .

4.7.3. Coeficiente de clustering

El coeficiente de clustering C_i de un nodo i es la relación entre el número de enlaces en el subgrafo generado por los vecinos de i dividido por el máximo número posible de enlaces que podría tener.

Esta magnitud cuantifica la tendencia que dos nodos conectados a un mismo nodo estén también conectados entre ellos.

$$C_i = \frac{\#links_G_i}{\frac{grado(i)(grado(i)-1)}{2}}$$

Donde G_i es el subgrafo resultante de eliminar el nodo i .

Una vez calculados los coeficientes de clustering de todos los nodos del grafo, se puede obtener el coeficiente de clustering del grafo calculando la media aritmética de todos los coeficientes.

$$C(G) = \frac{\sum_{i \in V(G)} C_i}{N}$$

Siendo N , el número de vértices del grafo con grado mayor de 2.

Capítulo

5

METODOLOGÍA

La mayoría de procesos del proyecto se realizan a través de *scripts* programados para tratar con tablas BGP y datos relacionados. Estos *scripts* no han sido programados completamente por mí, algunos se han tomado de estudios anteriores, otros han sido modificados y ampliados, y otros han sido programados completamente para este proyecto.

De todos los que he usado, querría nombrar los realizados por mis compañeros Xavi Domènech para la extracción de algunas métricas básicas, y por Sergio Menéndez para la construcción de la base de datos de Sistemas Autónomos.

5.1. Las tablas BGP

El primer paso consiste en conseguir las tablas BGP que son la fuente de datos básicas para el estudio. Las tablas BGP se encuentran en todos los *routers* que implementan el protocolo BGP y que se comunican con otros *routers* internos o externos al AS para intercambiar rutas. El problema reside en escoger el AS de donde obtener las tablas para que los datos no sean muy parciales y sesgados.

Cualquier AS de la red tiene una visión no completa de Internet, puesto que no conoce todos los caminos AS que existen. Esto se debe a tres motivos fundamentales:

- Por las políticas de encaminamiento, hay AS que no anuncian o transmiten ciertas rutas. Estos caminos quedan ocultos para los AS conectados a él.
- Los AS hacen agregación de rutas. Cuando un AS_i está conectado únicamente a un AS_j , las rutas que anuncia AS_j contienen las direcciones de AS_i y no aparece su número. AS_j incorpora las redes de AS_i como si fueran suyas. De esta forma hay AS que no aparecen en las tablas.

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

- Los AS solamente se intercambian las mejores rutas para llegar a un destino, pero hay muchos otros caminos peores que no se envían y son enlaces que se pierden.

En base a esto, para tener una visión completa de Internet se debería coger una tabla BGP de cada uno de los *routers* de todos los AS de Internet. Como esta opción no es viable, una solución aproximada es coger tablas BGP de los AS más interconectados, porque se podrá inferir un grafo más aproximado de la topología de red.

En la universidad de Oregon (EEUU) existe el proyecto *Route Views*, que es una herramienta para obtener información en tiempo real sobre el sistema global de encaminamiento de Internet. Entre otras investigaciones, en este proyecto han creado un sistema de *routers* que mantiene relaciones con una larga lista de los más importantes proveedores de todo el mundo (la lista completa puede encontrarse en el Anexo 9.3 *Participantes del proyecto RouteViews*) y que cada uno de ellos les envía su tabla BGP. Estos *routers* se encargan de fusionarlas y de ofrecerlas libremente para la investigación.

La extracción de estas tablas de los *routers* se realiza conectando por *telnet*⁴ a uno de los *routers* y ejecutando el comando (solamente para *routers* de la marca Cisco):

```
> sh ip bgp
```

que devuelve el volcado de toda la tabla por el terminal, pero *Route Views* lo pone más sencillo, ya que tiene habilitado un

⁴ Telnet es uno de los servicios más antiguos de Internet y se utiliza para conectar (login) con un equipo remoto a través de la red, de forma que el ordenador cliente se comporta como un terminal conectada con la máquina remota.

repositorio público con las tablas BGP de este *router* en ficheros separados para descargarse a través de FTP⁵.

El repositorio va actualizándose publicando la tabla BGP cada dos horas y así se tienen todas las tablas desde el año 1997, un completísimo histórico que sin él sería imposible haber realizado este proyecto.

Para este estudio únicamente nos hemos centrado en los últimos cinco años, desde Marzo del 1999 hasta Diciembre del 2003, porque es un período suficientemente largo para poder evaluar los datos del crecimiento, ya que el BGP en el año 1999 era un protocolo totalmente extendido y el sistema de registro de AS y relaciones estaba totalmente estabilizado.

La frecuencia con que se han tomado las tablas ha sido de tres meses, concretamente se han tomado las tablas de las 00:00 horas del día 1 de los meses de Marzo, Junio, Septiembre y Diciembre del período desde 1999 hasta 2003, que hacen un total de veinte tablas.

Para conseguir un análisis más detallado o más fino se pueden tomar muchas más tablas, pero dado que el procesado de cada tabla comporta un tiempo de cálculo considerable, veinte tablas se ha considerado suficiente para el nivel de detalle del estudio y del tiempo de proceso planificado.

5.2. El grafo de AS

El segundo paso consiste en el proceso de una sola tabla para extraer el modelo de Internet en grafo de AS, el número de AS, el número de enlaces y resto de métricas básicas.

⁵ FTP (File Transfer Protocol) es un protocolo de transmisión de ficheros usado bastante desde los inicios de Internet.

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

El primer objetivo es conseguir transformar la lista de caminos entre AS de toda Internet en el grafo de AS representado por su matriz de adyacencias, ya que el tamaño del grafo es enorme y no se puede tratar directamente con él.

Para ello lo primero que se hace es filtrar la tabla BGP original y dejar únicamente la columna de los caminos entre AS.

5.2.1. Matriz

Sobre este fichero resultante ya se puede aplicar el algoritmo para construir la matriz de adyacencias, que escrito en pseudo-código es el siguiente:

```
para cada línea (camino de AS) de la tabla hacer  
  para cada enlace del camino de AS hacer  
    escribir  $AS_i$  y  $AS_j$  en el fichero de salida  
  fpara  
fpara  
  
Coste:  $O(n*k)$  donde  $n$  es el número de caminos y  $k$  es  
la longitud máxima de los caminos.
```

Algoritmo 1 Construcción de la matriz de adyacencias del grafo de AS

Este algoritmo recorre todos los caminos y para cada enlace entre AS escribe una línea en el fichero de salida sus dos números. Al finalizar se tiene un fichero con todos los enlaces del grafo, que en la matriz representarían todas las celdas con valor 1, significando que hay enlace entre el AS_i y el AS_j .

No obstante, este grafo contiene enlaces falsos entre un AS y si mismo que en las tablas BGP aparecen cuando en un camino se repite el mismo AS varias veces consecutivamente. Este fenómeno se denomina *caminos hinchados* y es introducido por algunos *routers* para modificar el comportamiento del encaminamiento y engañar a BGP haciendo creer que el camino es más largo de lo que es realmente. Para eliminarlos se aplica el siguiente algoritmo:

```
# eliminar los caminos hinchados
para cada línea (enlace del grafo) del fichero de salida hacer
    si  $AS_i$  y  $AS_j$  son iguales entonces eliminar el enlace del
    fichero de salida;
fpara

Coste:  $O(n)$  donde  $n$  es el número de enlaces
```

Algoritmo 2 Eliminar los caminos hinchados de la tabla BGP

Ahora ya se tiene en el fichero de salida la matriz de adyacencias completa del grafo de AS de Internet. De este fichero se puede extraer trivialmente el número de enlaces (contando el número de líneas del fichero) y el número de AS (recorriendo todos los enlaces y contando todos los números diferentes) de Internet.

5.2.2. Grado

Se vuelve a tomar la tabla original que contenía los caminos para calcular el grado de cada AS. Aquí hay que tener en cuenta que cada enlace cuenta para dos AS, uno como grado de salida y otro como grado de entrada, aunque ahora no se distinga este hecho puesto que el grafo es no dirigido. El algoritmo que calcula los grados de cada AS es el siguiente:

```
para cada línea (camino de AS) de la tabla hacer
    para cada  $AS_i$  del camino de AS hacer
         $vecinos[AS_i] = vecinos[AS_i] \cup \{AS_{i+1}\};$ 
         $vecinos[AS_{i+1}] = vecinos[AS_{i+1}] \cup \{AS_i\};$ 
    fpara
fpara

para cada AS  $x$ 
     $Grado[x] = |vecinos[x]|;$ 
fpara

Coste:  $O(n*k)$  donde  $n$  es el número de caminos y  $k$  la
longitud máxima de los caminos.
```

Algoritmo 3 Cálculo del grado de una tabla BGP

Primero se guardan el conjunto de AS vecinos de cada AS a través de los caminos y finalmente se cuentan el número de elementos de dicho conjunto para saber el grado. Conocer el grado máximo y el grado medio de todos los AS es una tarea trivial de recorrido de todos los grados.

Para la extracción de los diámetros medio y máximo de los caminos de AS, número de prefijos y su longitud media se aplican el mismo tipo de algoritmos sencillos de recorridos de la tabla que para la extracción de la matriz del grafo o el cálculo del grado.

5.2.3. Tipos de relaciones entre AS

El siguiente objetivo es identificar el tipo de cada enlace del grafo de AS. Para averiguarlo se usa una heurística creada por *Lixin Gao* en el artículo *On inferring autonomous system relationships in the Internet* [9] que se basa en tres principios:

- La existencia de un *top-provider* en cada camino de AS que define el sentido del tránsito en cada uno de los enlaces del camino de AS.
- La clasificación de relaciones en P2C, C2P y SIB depende de si entre dos AS hay tránsito unidireccional o bidireccional.
- La clasificación de relaciones en PEER depende de si existe tráfico entre ellos y de un coeficiente de parecido de sus grados.

En base a estos principios se ha construido un algoritmo en tres pasos para calcular el tipo de relación de cada uno de los enlaces. El algoritmo utiliza como entrada la tabla de caminos de AS y la matriz de adyacencias del grafo. Como salida se obtiene un listado de cada enlace del grafo que tipo de relación tiene.

Paso 1. Identificar si hay tránsito entre cada par de AS. Se recorren todos los caminos de la tabla y se encuentra el AS con el mayor grado de todos consultando la tabla de grados de AS generada anteriormente. Este AS es el *top-provider* del camino y

los enlaces que haya anteriores a él y después de él indicaran que hay tránsito entre los dos AS que comunican. Los enlaces hacia o desde el *top-provider* no son considerados. Este tránsito unidireccional entre dos AS se marcará para luego clasificar cada relación de que tipo es.

```

para cada línea (camino de ASi..n) de la tabla
hacer
    encontrar el  $j$  del AS con mayor grado;
    para cada  $i=1..j-1$ 
        tránsito[ASi, ASi+1]=1;
    fpara
    para cada  $i=j..n-1$ 
        tránsito[ASi+1, ASi]=1;
    fpara
fpara

Coste:  $O(n*2*k)$  donde  $n$  es el número de caminos y  $k$ 
es la longitud máxima de los caminos.
    
```

Algoritmo 4 Paso 1 de inferencia de las relaciones entre AS

Paso 2. Clasificar los enlaces entre P2C, C2P y SIB. Se puede inferir que los enlaces entre AS anteriores al *top-provider* del camino de AS son relaciones de tipo C2P (o *Sibling*). Esto significa que en un enlace (AS_i, AS_j) antes del *top-provider* AS_j proporciona tráfico a AS_i. Análogamente, los enlaces que hay después del *top-provider* son relaciones de tipo P2C (o *Sibling*), puesto que siempre se sigue el sentido del recorrido que tendría un paquete enviado a través de este camino AS. Finalmente, si existe tránsito en ambas direcciones entre dos AS, la relación es *Sibling*.

Por tanto se vuelve a recorrer la tabla identificando cada enlace de que tipo es según este principio.

```
para cada línea (camino de  $AS_{i..n}$ ) de la tabla hacer
  para cada  $i=1..n-1$ 
    si  $transito[AS_i, AS_{i+1}] = 1$  y  $transito[AS_{i+1}, AS_i] = 1$ 
      entonces  $enlace[AS_i, AS_{i+1}] = SIB$ ;
    sino si  $transito[AS_i, AS_{i+1}] = 1$ 
      entonces  $enlace[AS_i, AS_{i+1}] = C2P$ ;
    sino si  $transito[AS_{i+1}, AS_i] = 1$ 
      entonces  $enlace[AS_i, AS_{i+1}] = P2C$ ;
  fpara
fpara

Coste:  $O(n*k)$  donde  $n$  es el número de caminos y  $k$  es la longitud
máxima de los caminos.
```

Algoritmo 5 Paso 2 de inferencia de las relaciones entre AS

Paso 3. Clasificar que enlaces son PEER. La clasificación en relaciones de *peering* tiene dos requisitos pero que no son condición necesaria:

- El primero es que ninguno de los dos AS proporcione tránsito al otro. Para detectar esto es necesario recorrer los caminos de AS y todos los enlaces entre dos AS (que alguno de ellos no sean el *top-provider*) ya no pueden ser relaciones de *peering* porque cualquier enlace ya es una relación de tránsito.
- El segundo es que la diferencia entre grados de los dos AS no sea superior a una constante R . La constante R indica el máximo número de veces que puede diferir el grado de dos AS que son *peerings*. El proceso de elección de esta constante R es complejo y queda fuera del alcance del estudio. Puede encontrarse en el artículo de *Lixin Gao*.

El algoritmo que comprueba estos dos requisitos e identifica las relaciones PEER es el siguiente:

```

para cada línea (camino de  $AS_{i..n}$ ) de la tabla hacer
  encuentra el  $AS_j$  tal que  $\text{grado}[AS_j] = \max \text{grado}[AS_i]$ ;
  para cada  $i=1..j-2$ 
     $\text{no-peering}[u_i, u_{i+1}] = 1$ ;
  fpara
  para cada  $i=j+1..n-1$ 
     $\text{no-peering}[u_{i+1}, u_i] = 1$ ;
  fpara
  si  $\text{enlace}[AS_{j-1}, AS_j] \neq \text{SIB}$  y  $\text{enlace}[AS_j, AS_{j+1}] \neq \text{SIB}$ 
  entonces
    si  $\text{grado}[AS_{j-1}] > \text{grado}[AS_{j+1}]$  entonces
       $\text{no-peering}[AS_j, AS_{j+1}] = 1$ ;
    sino  $\text{no-peering}[AS_{j-1}, AS_j] = 1$ ;
fpara

para cada línea (camino de  $AS_{i..n}$ ) de la tabla hacer
  para cada  $j=1..n-1$  hacer
    si  $\text{no-peering}[AS_j, AS_{j+1}] \neq 1$  y  $\text{no-peering}[AS_{j+1}, AS_j] \neq 1$ 
    y  $\text{grado}[AS_j]/\text{grado}[AS_{j+1}] < R$  y  $\text{grado}[AS_j]/\text{grado}[AS_{j+1}] < 1/R$  entonces
       $\text{enlace}[AS_j, AS_{j+1}] = \text{PEER}$ ;
  fpara
fpara

Coste:  $O(n*2*k) + O(n*k)$  donde  $n$  es el número de caminos y  $k$  es
la longitud máxima de los caminos.

```

Algoritmo 6 Cálculo de las relaciones PEER

Esta heurística ha sido demostrada como válida dado que en una prueba realizada coincidieron más del 95% de las relaciones con los datos reales que tenían en el proveedor AT&T.

5.2.4. Coeficiente de clustering

El último objetivo de este paso de la metodología es calcular el coeficiente de clustering de todo el grafo de AS de Internet. Para ello se usa este algoritmo que trabaja con el listado de AS y con la

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

matriz de adyacencias del grafo y nos devuelve el coeficiente de clustering del grafo.

```
para toda pareja grado  $g$  y  $AS_i$  hacer
  para todo  $AS_j$  que tiene enlace con  $AS_i$  hacer
    añadir  $AS_j$  al conjunto  $utemp$ ;
  fpara
    para todo  $AS_k$  que tiene enlace con  $AS_j$ 
      (una vez eliminado  $AS_i$ ) hacer
        si  $AS_k$  pertenece al conjunto  $utemp$ 
          entonces  $links = links + 1$ ;
        fpara
           $links = links / 2$ ;
           $links\ totales = g*(g-1)/2$ ;
           $Coef[AS_i] = links / links\ totales$ ;
    fpara
       $CoefClust = Suma\ de\ todos\ los\ Coef[AS_i] / número\ de\ AS$ ;

Coste:  $O(n*(2*m))$  donde  $n$  es el número de grados diferentes y  $m$ 
es la matriz.
```

Algoritmo 7 Cálculo del coeficiente de clustering

Una vez acabado este paso, ya se tienen los *scripts* para tratar una tabla y obtener los datos básicos del grafo de AS como son el número de links, número de AS, el grado de cada AS, la relación entre cada par de AS y el coeficiente de clustering total de cada tabla, además de la matriz de adyacencias del grafo que nos servirá como base para los siguientes pasos del estudio.

5.3. Customers, Regional ISP y Core

El tercer paso de la metodología consiste en separar el grafo de AS en los tres subconjuntos *Customers*, *Regional ISP* y *Core*. Para realizar esta separación se utiliza una heurística desarrollada por L. Subramanian, S. Agarwal, J. Rexford, R. H. Katz [X]. Esta heurística está basada en el grafo dirigido de AS, que dice que los AS *Customers* tienen grado de salida 0, dado

que al ser únicamente consumidores de servicios de tránsito, no pueden tener enlaces que salgan de él y den servicio a otros AS, porque sino dejarían de ser *Customers*.

Una vez se eliminan todos los AS *Customers* del grafo, nos quedan los *Regional ISP* y los AS que pertenecen al *Core*. Para separar estos dos grupos se vuelve a ejecutar la misma acción, los *Regional ISP* son los AS que tienen grado de salida 0 y que se dedican a consumir tránsito de los AS del *Core* (que después servirán a los *Customers* que se han eliminado antes) y el resto de AS que nos queden serán los que forman el *Core* de Internet.

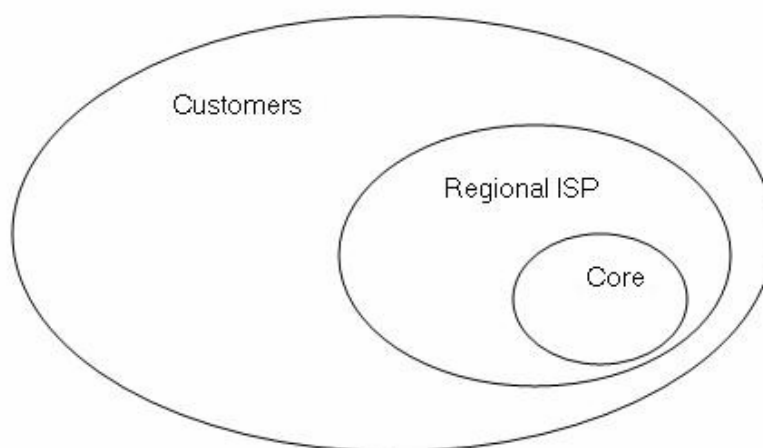


Figura 17 Representación de las zonas de Internet

Esta heurística se ha implementado en un algoritmo en tres pasos.

Paso 1. Calcular los grados de salida de cada AS.

Anteriormente se ha calculado el grado de los AS sin tener en cuenta el sentido de sus enlaces (tomando el grafo como no dirigido), ahora se deberá separar cuales de los enlaces son de salida y cuales son de entrada (tomando el grafo como dirigido).

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

Se puede hacer de dos maneras: la primera sería recorrer de nuevo todos los caminos de AS e identificar cada enlace si es de entrada o salida, pero hay una segunda forma más eficiente. Se trata de aprovechar que se tienen catalogados todas las relaciones entre AS según si sean de P2C, C2P, SIB o PEER, para poner un enlace de salida o entrada dependiendo del tipo de relación entre los AS que lo forman. El algoritmo es el siguiente, utiliza el fichero de tipos de relaciones entre AS como entrada y genera dos ficheros de salida, uno con los enlaces de entrada y otro con los enlaces de salida.

```
para cada relación entre AS ( $AS_i$ ,  $AS_j$ ) hacer  
  si relación es SIB entonces  
    escribir enlace de salida  $AS_i \rightarrow AS_j$ ;  
    escribir enlace de entrada  $AS_i \rightarrow AS_j$ ;  
    escribir enlace de salida  $AS_j \rightarrow AS_i$ ;  
    escribir enlace de entrada  $AS_j \rightarrow AS_i$ ;  
  sino si relación es C2P entonces  
    escribir enlace de salida  $AS_j \rightarrow AS_i$ ;  
    escribir enlace de entrada  $AS_i \rightarrow AS_j$ ;  
  sino si relación es P2C entonces  
    escribir enlace de salida  $AS_i \rightarrow AS_j$ ;  
    escribir enlace de entrada  $AS_j \rightarrow AS_i$ ;  
  sino si relación es PEER entonces  
    escribir enlace de salida  $AS_i \rightarrow AS_j$ ;  
    escribir enlace de entrada  $AS_i \rightarrow AS_j$ ;  
    escribir enlace de salida  $AS_j \rightarrow AS_i$ ;  
    escribir enlace de entrada  $AS_j \rightarrow AS_i$ ;  
fpara
```

Coste: $O(m)$ donde m es el número de enlaces.

Algoritmo 8 Calcular los grados de salida del grafo

Paso 2. Separar los *Customers*.

Una vez se tienen los enlaces de salida de cada AS, se hace un recorrido calculando el grado de salida de cada AS. Con este dato ya se puede separar los AS que pertenecen a los *Customers* del resto del grafo. Se usa el siguiente algoritmo que tiene como entrada la matriz de adyacencias del grafo y el fichero con los grados de salida de cada AS, y como salida genera dos conjuntos, uno para los Clientes y otro para los *Regional ISP* y *Core*:

Estos conjuntos están representados en forma de matriz de adyacencias del grafo que forma cada grupo pero además de los enlaces entre AS del mismo grupo, existen los enlaces que interconectan un AS con los AS de otros grupos, ya que esa información no puede perderse. Sino se hiciera esto, el conjunto de *Customers* serían únicamente nodos sin enlaces, ya que los enlaces de todos los AS de este grupo son de entrada y provienen del grupo de *Regional ISP*, dado que ningún Customer puede ser proveedor y tener un enlace de salida por definición.

```

para cada AS  $AS_i$  hacer
    si grado de salida de  $AS_i = 0$  entonces
         $Customers = Customers \cup AS_i$ ;
    sino
         $RegionalISP \cup Core = RegionalISP \cup Core \cup AS_i$ ;
fpara

Coste:  $O(n)$  donde  $n$  es el número de nodos de toda Internet
    
```

Algoritmo 9 Separación de los Customers

Paso 3. Separar los *Regional ISP*.

Para separar este segundo grupo se tiene que realizar exactamente el mismo proceso que para los *Customers*. Primero se tiene que recalcular los grados de salida de los AS con la

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

nueva matriz de adyacencias de los *Regional ISP + Core*, dado que todos aquellos enlaces que servían a *Customers* ahora no existen. El algoritmo es exactamente igual al anterior, utilizando como entrada la matriz de adyacencias del *RegionalISP y Core* y los nuevos grados de salida y obteniendo las matrices de los grafos de los grupos *Regional ISP* y *Core* (por separado ahora), pero con los enlaces hacia los otros grupos también incluidos.

```
para cada  $AS_i$  hacer
    si grado de salida de  $AS_i = 0$  entonces
         $RegionalISP = RegionalISP \cup AS_i$ ;
    sino
         $Core = Core \cup AS_i$ ;
fpara

Coste:  $O(n)$  donde  $n$  es el número de nodos del
subgrafo sin los Customers
```

Algoritmo 10 Separación de los Regional ISP del Core

Al finalizar esta separación, las posibilidades de análisis de cada grupo por separado son las mismas que para una tabla completa de todo Internet. Por tanto se pueden hacer los estudios sobre el grado, número de AS, número de enlaces, diámetro, coeficiente de clustering, TOP20, etc. igual que se haría con los grafos completos de Internet.

5.4. Repartición geográfica de los AS

El cuarto paso de la metodología se basa en utilizar el listado de AS y la información sobre su grado que se han conseguido en pasos anteriores para analizar la repartición geográfica de Internet e identificar los AS más importantes.

5.4.1. Base de datos de AS

El primer objetivo consiste en construir una base de datos de los AS con la siguiente información:

- Número de AS
- IRR en el cual esta registrado
- Nombre administrativo del AS
- País de procedencia del AS
- Fecha de registro

Esta información se puede encontrar en las bases de datos públicas de los IRRs, que se pueden consultar vía la herramienta *Whois* o accediendo a unos ficheros con volcados de la base de datos vía FTP. Después de un procesado de estos ficheros (que no se explicará aquí porque escapa del tema del proyecto) se confecciona un fichero final que contiene la base de datos de los AS que se usará para los estudios.

para cada AS_i *de la lista de AS-grado hacer*

$CT_x = \text{consultar en la base de datos el país del } AS_i;$

$Grado[CT_x] = Grado[CT_x] + Grado[AS_i];$

$NumAS[CT_x] = NumAS[CT_x] + 1;$

fpara

Coste: $O(n*m)$ *donde n es el número de nodos de la lista y m es el número de AS en la base de datos.*

Algoritmo 11 Cálculo del número de AS y grado acumulado de un país

Este fichero tiene un formato CSV ⁶ con los campos que se han indicado anteriormente:

⁶ CSV significa *Comma Separated Value* y es una estructura de ficheros estandarizada para representar tablas, donde se escribe en cada línea una fila y sus celdas separadas por comas (o puntos y comas en este caso)

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

Número AS; Nombre del AS; País; Fecha de alta

586;ARIN;Hickam Air Force Base;US;07/02/1990
587;ARIN;Andrews Air Force Base;US;07/02/1990
588;ARIN;FRANKFRT-GW1-AS;DE;
589;ARIN;University of North Texas;US;12/02/1990
590;RIPE;EASInet Operations Center;DE;
591;ARIN;NST;CA;28/02/1990
592;ARIN;U.S. Naval Academy;US;01/03/1990
593;RIPE;Easinet Air Base;CH;

Como apoyo se han creado unos *scripts* que recorren este fichero y devuelven la información sobre un único AS que le se indica como parámetro. Esta base de datos y este *script* nos servirán para cruzar los datos de los estudios de la topología con la información de procedencia geográfica de cada AS.

5.4.2. Clasificación por IRR y países

El siguiente objetivo es obtener métricas acumuladas por cada IRR. Concretamente se quiere contar el número de AS de cada IRR y la suma de todos sus grados. Para ello se usa este algoritmo que tiene como entrada el listado de AS con su grado que se había obtenido en pasos anteriores y la base de datos de AS donde indica el IRR en el que esta registrado. El algoritmo nos devolverá un listado de todos los IRR con el número de AS y su grado acumulado.

Exactamente del mismo modo, se puede obtener esta clasificación pero por países. El algoritmo sería:

para cada AS_i **de la lista de AS hacer**
 $IRR_x = \text{consultar en la base de datos el IRR del } AS_i;$
 $\text{Grado}[IRR_x] = \text{Grado}[IRR_x] + \text{Grado}[AS_i];$
 $\text{NumAS}[IRR_x] = \text{NumAS}[IRR_x] + 1;$
fpara
Coste: $O(n*m)$ donde n es el número de AS de la lista y m el número de AS en la base de datos.

Algoritmo 12 Cálculo del número de AS y grado acumulado de los IRRs

5.4.3. TOP20 AS

Otra posibilidad que nos ofrece tener identificados los AS es poder hacer la clasificación de los AS más importantes de Internet. Se considera que la importancia de un AS se mide por su grado, y de esta manera se obtienen los 20 AS más importantes de Internet ordenando todos los AS por su grado y luego consultando en la base de datos su nombre, país e IRR. El algoritmo trivial sería este:

ordenar listado de AS-grado por su grado de mayor a menor;
para los 20 primeros AS_i **de la lista de AS-grado hacer**
 $\text{consultar nombre, país e IRR del } AS_i \text{ en la base de datos};$
fpara
Coste: $O(\text{ordenar}) + O(20*m)$ donde m es el número de AS en la base de datos. El coste de ordenar podemos suponer que es $O(n \log n)$ donde n es el número de AS.

Algoritmo 13 Cálculo del TOP 20 AS

Este algoritmo sirve para extraer los datos del grafo de AS de Internet pero también de los grafos de cada uno de los grupos *Customers*, *Regional ISP* y *Core*, dado que la fuente de datos es la misma.

5.5. La evolución temporal

El último paso de la metodología consiste en extender todos estos procesos a las 20 tablas BGP que se han tomado de los últimos 5 años. Dado que el proceso de una sola tabla por las dimensiones del grafo ya tarda varias horas en ejecutarse completamente, para procesar las 20 tablas secuencialmente se han de programar unos nuevos *scripts*. Estos *scripts* obtienen las tablas BGP automáticamente del servidor de *Route Views*, las preprocesan, ejecutan todos los *scripts* para los estudios para cada una de ellas y finalmente procesan los resultados de todas las tablas para analizarlos colectivamente.

5.5.1. Tiempo de cálculo

El tiempo estimado de cálculo de todos los *scripts* (los de generación del grafo y la matriz, el cálculo del coeficiente de clustering, la identificación del tipo de relaciones, la separación entre *Customers*, *Regional ISP* y *Core* y los que clasifican por países e IRRs) para las 20 tablas asciende a aproximadamente 6 días de cálculo continuo en la máquina en la que se han ejecutado que es un HP RX4610 con 4 procesadores Itanium a 800Mhz, 2MB de memoria cache y 16384MB de memoria RAM principal.

Aunque depende de la carga de la máquina, aproximadamente una tabla tarda en media unas 7 horas en ejecutar todos sus procesos, ya que depende del tamaño de la tabla en número de AS y de enlaces (el tamaño y densidad del grafo), las más antiguas del 1999 tardan 1 o 2 horas y las más nuevas del 2003, entre 12 y 16 horas. Los procesos que más tardan son el cálculo del coeficiente de clustering y la separación en grupo *Customers*, *Regional ISP* y *Core* del grafo, por su alto coste del algoritmo aplicado a un volumen de datos enorme.

Capítulo

6

ESTUDIO

Una vez se ha aplicado la metodología a los datos básicos y se ha ejecutado repetidamente todos los *scripts* sobre las tablas BGP, se han generado un gran volumen de resultados que hay que interpretar.

Los resultados se han dividido en los cuatro estudios básicos que se realizan en este proyecto, aunque algunos de ellos están relacionados y se han usado *scripts* comunes.

Para todos los resultados se usará el formato XXXX-YY para las fechas, donde XXXX indica el año y YY el mes.

6.1. Evolución de las métricas básicas

Las métricas básicas de la topología son los parámetros más básicos de un grafo como, por ejemplo, el número de nodos, número de enlaces, diámetro y grado de los nodos. Estos parámetros en el grafo de AS de Internet se corresponden al número de AS, las relaciones entre ellos y la forma como interactúan.

Los resultados de estas métricas nos darán un enfoque inicial de la evolución del tamaño y de la topología global de Internet.

6.1.1. Sistemas autónomos, enlaces y prefijos

En primer lugar, se calcula el número de AS, enlaces y prefijos de las tablas BGP. Aunque el número de prefijos no pertenezca al grafo, también es importante tenerlo en cuenta.

Se muestra a continuación una tabla con cada uno de los parámetros y los valores conseguidos en cada una de las tablas del estudio temporal.

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

Año	Número de AS	Número de Enlaces	Número de prefijos
1999-03	4764	8916	21454
1999-06	5193	9931	24882
1999-09	5672	10869	25607
1999-12	6315	12218	27825
2000-03	6969	14167	32015
2000-06	7726	15409	36410
2000-09	8561	17336	42586
2000-12	8298	17055	37855
2001-03	10392	20811	59618
2001-06	11258	23743	68465
2001-09	11873	24886	54895
2001-12	12449	25394	55827
2002-03	12953	27402	63028
2002-06	13405	27809	61584
2002-09	13903	28662	64250
2002-12	14431	29715	66456
2003-03	14993	30825	68302
2003-06	15478	34817	77807
2003-09	15946	33660	83811
2003-12	16456	35448	87220

Tabla 2 Evolución del número de AS, enlaces y prefijos

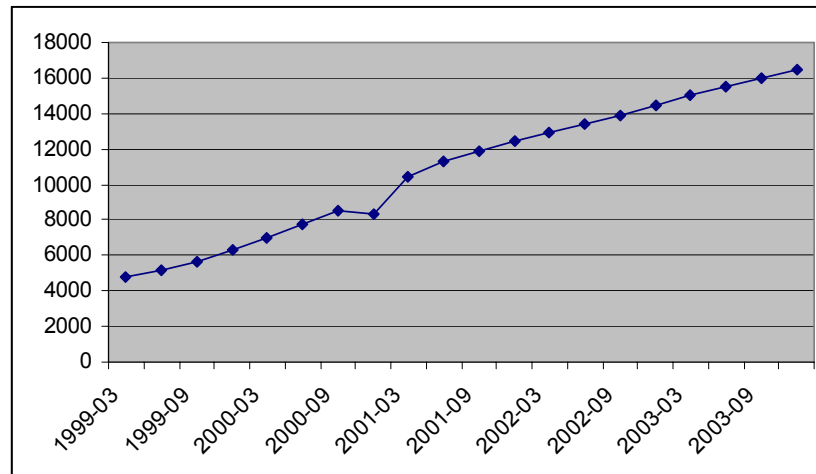
La primera impresión obvia es que tanto los AS, enlaces como prefijos han aumentado una tabla tras otra a lo largo del período estudiado. Prácticamente no ha habido ningún intervalo donde un parámetro haya decrecido.

6.1.1.1. Evolución del número de Sistemas Autónomos

El número de AS ha crecido siempre, porque es difícil que un AS desaparezca, dado que para registrarse como AS normalmente los proveedores o empresas ya están consolidadas y tienen una infraestructura que garantizará la comunicación y el funcionamiento de BGP con sus proveedores o *peerings*.

De los datos se obtiene además que en la última actualización hay 16456 AS. Si se tiene en cuenta que en el año 1999 había 4764 AS, el número de AS del grafo es ahora 3,5 veces los que había hace 5 años.

En la siguiente gráfica se puede observar la evolución del número de AS:



Gráfica 1 Evolución del número de AS

Como se puede observar gráficamente, el crecimiento del número de AS ha sido constante. Su evolución dibuja una recta casi perfecta, salvo en el último período del año 2000, que bajó y luego subió hasta el nivel esperado en el período siguiente.

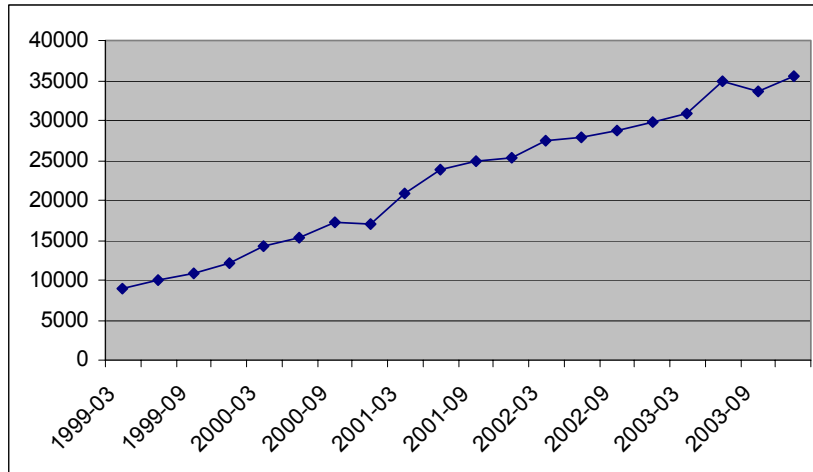
Este cambio se ha considerado como un *outlayer* ya que en otras métricas de los estudios se ha comprobado que también había cambios sospechosos que no atendían a cambios reales de la topología ni a ninguna causa razonable. Por tanto se ha concluido que la tabla correspondiente a Diciembre del año 2000 tiene datos parcialmente erróneos que provocan estos resultados inesperados.

6.1.1.2. Evolución del número de Enlaces

El número de enlaces, al igual que los AS crece durante los cinco años y a finales del año 2003 es casi 4 veces el número de enlaces de principios del 1999.

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

En la siguiente gráfica se puede observar la evolución del número de enlaces (*links*) en las tablas BGP:



Gráfica 2 Evolución del número de enlaces

Como se observa gráficamente, el crecimiento del número de enlaces es constante, con pequeñas fluctuaciones en algunos intervalos pero en general se obtiene una recta muy bien trazada.

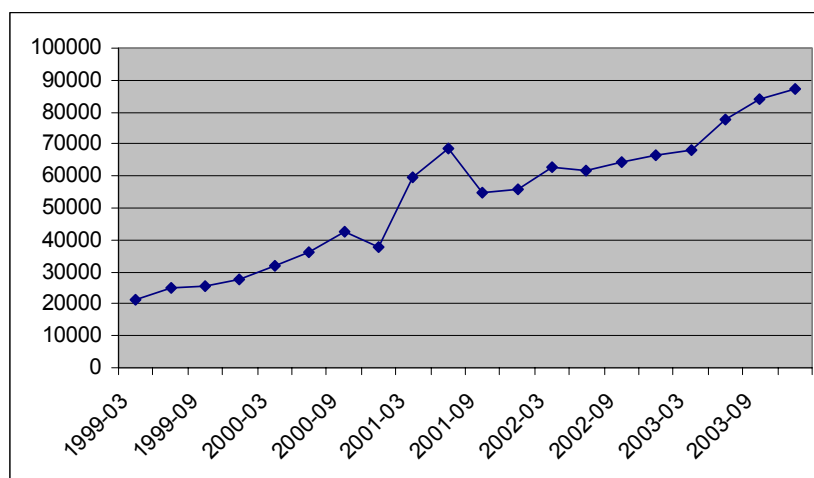
Sólo se produjeron algunos cambios importantes en la evolución a mediados del año 2000 y del 2003.

6.1.1.3. Evolución del número de prefijos

El número de prefijos ha tenido un crecimiento en parte parecido al de los enlaces, puesto que ha crecido el mismo porcentaje: ahora hay 4 veces el número de prefijos que había hace 5 años.

Sin embargo, su evolución ha fluctuado más que los enlaces, puesto que ha tenido subidas y bajadas bastante más consideradas.

En la siguiente gráfica se observa la evolución del número de prefijos de las tablas BGP:



Gráfica 3 Evolución del número de prefijos

Como se observa, de nuevo nos encontramos con una recta bastante bien trazada, en línea ascendente y con una fluctuación importante durante el año 2001.

6.1.2. Diámetro y grado

En segundo lugar, se han obtenido los resultados de las métricas diámetro, grado máximo y grado medio, que se obtienen a partir de los nodos y enlaces del grafo.

Se muestra a continuación una tabla con cada uno de las métricas y los valores conseguidos en cada una de las tablas del estudio temporal.

Año	Diámetro	Grado máximo	Grado medio
1999-03	11	1066	3,76022775
1999-06	9	1161	3,83861616
1999-09	9	1269	3,843855
1999-12	8	1412	3,88041925
2000-03	8	1520	4,07786413
2000-06	7	1712	4,0006491
2000-09	9	1869	4,05983607
2000-12	9	1985	4,12392697
2001-03	9	2258	4,01553304

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

2001-06	9	2400	4,23217469
2001-09	10	2470	4,20576306
2001-12	7	2535	4,09407497
2002-03	8	2567	4,24401766
2002-06	8	2605	4,15983545
2002-09	8	2621	4,13466532
2002-12	8	2586	4,12529502
2003-03	9	2512	4,1119189
2003-06	10	2777	4,49890167
2003-09	9	2428	4,22168569
2003-12	9	2381	4,30815508

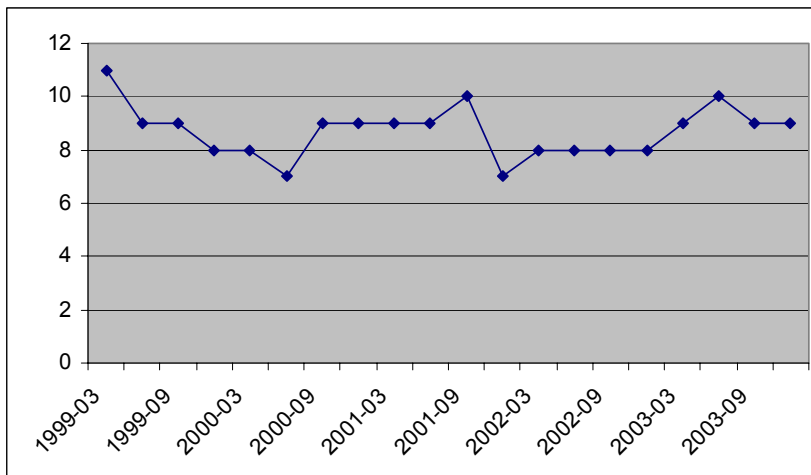
Tabla 3 Evolución del diámetro, grado máximo y grado medio

Lo primero que se observa es que el diámetro es bastante inferior a lo que se podría haber pensado. Desde cualquier AS hasta otro AS de toda Internet solamente hay que pasar como máximo por 7-10 AS intermedios.

Sobre los grados, ambas medidas han crecido desde hace cinco años, aunque de distinto modo.

6.1.2.1. Diámetro

El diámetro del grafo se ha mantenido prácticamente constante, en la siguiente gráfica se ve su evolución:

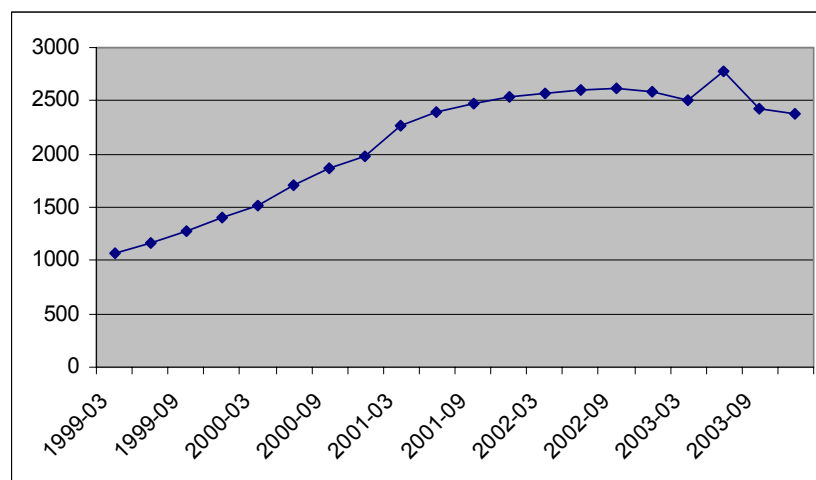


Gráfica 4 Evolución del diámetro del grafo de AS

Como se observa gráficamente, el diámetro se ha conservado siempre entre los valores 8 y 10, con algunos meses a 7 y 11.

6.1.2.2. Grado máximo

El grado máximo es el grado del mayor AS de Internet, que desde el 1999 siempre es el mismo (*UUNet Technologies*, número 701). Vemos su evolución en la siguiente gráfica:



Gráfica 5 Evolución del grado máximo

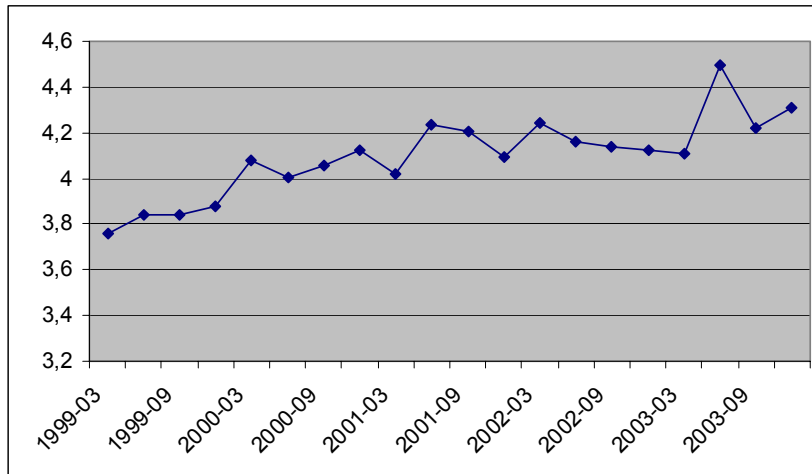
Como se puede observar, esta es la primera métrica que no siempre es creciente. En su primera parte si creció hasta duplicar su grado pero a partir de entonces, durante los dos últimos años ha empezado a decaer muy despacio.

Esto puede deberse a la escisión de este gigante sistema autónomo, puesto que el mismo proveedor tiene varios números AS y a partir del año 2002 habría empezado a desviar caminos hacia otros números secundarios.

De cualquier forma, el grado máximo no es un buen indicador de la topología porque sólo mide un grado de 1 AS de todos los que hay.

6.1.2.3. Grado medio

El grado medio es un buen indicador para medir la interconectividad del grafo de AS. Su cálculo es muy sencillo y los resultados que se han obtenido se han plasmado en esta gráfica:



Gráfica 6 Evolución del grado medio

Esta gráfica nos da mucha información. Se ha visto anteriormente que el número de AS y de enlaces crecía, pero esta métrica nos dice que además de aumentar el número de nodos, aumenta también la interconectividad entre ellos, puesto que cada vez los nodos tienen más grado.

Desde 3,8 en el 1999 hasta 4,4 a finales del 2003. Comparado con los 2500 de los proveedores parece un número muy pequeño pero hay que tener en cuenta que la gran mayoría de AS del grafo son clientes y tienen únicamente una o dos conexiones con otros AS y esto les hace tener grado 1 o 2, por tanto, este número para el grado medio es muy lógico.

6.1.3. Coeficiente de Clustering

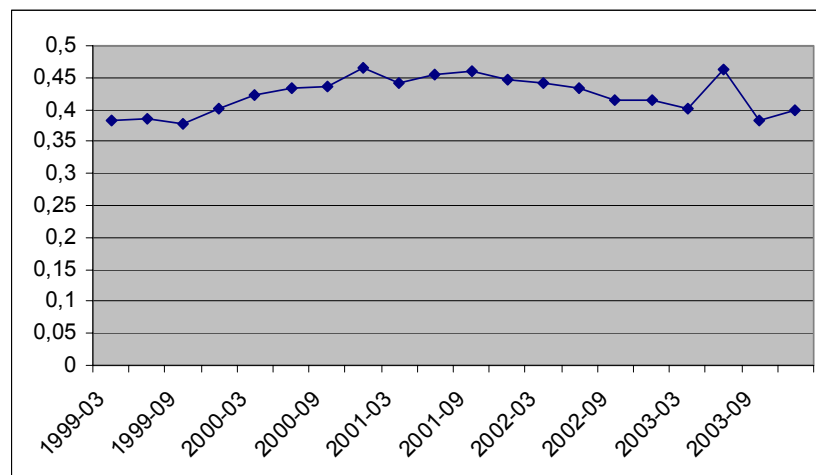
El coeficiente de clustering nos mide la interconectividad dentro de los subgrafos más interconectados. Con un grafo tan

grande y tan heterogéneo en los tipos de AS no es un indicador muy importante, pero de todos modos estos son los resultados:

Año	Coefficiente Clustering
1999-03	0,3823
1999-06	0,3855
1999-09	0,3780
1999-12	0,4021
2000-03	0,4218
2000-06	0,4348
2000-09	0,4356
2000-12	0,4659
2001-03	0,4405
2001-06	0,4557
2001-09	0,4606
2001-12	0,4476
2002-03	0,4407
2002-06	0,433
2002-09	0,4148
2002-12	0,4142
2003-03	0,4025
2003-06	0,4621
2003-09	0,3840
2003-12	0,4001

Gráfica 7 Evolución del coeficiente de clustering del grafo de AS

Y la gráfica correspondiente:



Gráfica 8 Evolución del coeficiente de clustering del grafo de AS

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

Ya se puede ver que se mantiene bastante constante a lo largo de los cinco años, aunque con un ligero incremento en el valor final respecto al inicial.

Como se ha dicho, es una métrica bastante compleja que con datos tan mezclados no da un resultado útil porque a través del grado medio se ha visto que la interconectividad si ha aumentado, aunque el coeficiente de clustering no lo ratifique.

6.2. Evolución del TOP20 AS

El TOP20 de AS de Internet es la clasificación de los 20 AS más importantes de Internet. Su orden viene determinado por su grado. A continuación están las tablas de la clasificación para el momento inicial (hace 5 años) y para el momento actual.

Pos.	1999-03	Núm AS	Grado	País	IRR
1	UUNET Technologie	701	1066	US	ARIN
2	Cable & Wireless USA	3561	705	US	ARIN
3	Sprint	1239	506	US	ARIN
4	Allegiance Telecom Companies Worldwid	2548	244	US	ARIN
5	BBNPLANET	1	242	US	ARIN
6	AT&T WorldNet Services	7018	222	US	ARIN
7	Veri	2914	187	US	ARIN
8	CERFnet	1740	138	US	ARIN
9	Energy Sciences Network (ESnet)	293	132	US	ARIN
10	Teleglobe Inc	6453	119	CA	ARIN
11	SAVVIS Communications Corporation	6347	116	US	ARIN
12	UUNET Europe	702	110	US	ARIN
13	Japan Network Information Center	2497	190	JP	APNIC
14	Ebone Consortium	1755	94	SE	RIPE
15	DoD Network Information Center	721	91	US	ARIN
16	WINSTAR	5696	83	US	ARIN
17	European Unix Network	286	72	NL	RIPE
18	Apex Global Information Service	4200	70	US	ARIN
19	NAP.NE	5646	68	US	ARIN
20	MCI Communications Corporation	145	67	US	ARIN

Tabla 4 TOP20 AS en Marzo de 1999

Pos.	2003-12	Núm AS	Grado	Pais	IRR
1	UUNET Technologie	701	2381	US	ARIN
2	Sprint	1239	1769	US	ARIN
3	AT&T WorldNet Services	7018	1661	US	ARIN
4	Qwest	209	1006	US	ARIN
5	Level 3 Communication	3356	974	US	ARIN
6	Cable & Wireless USA	3561	673	US	ARIN
7	Global Crossing	3549	632	US	ARIN
8	Veri	2914	601	US	ARIN
9	Abovenet Communication	6461	542	US	ARIN
10	UUNET Europe	702	534	US	ARIN
11	Globix Corporation	4513	494	US	ARIN
12	COLT Telecommunications	8220	455	UK	RIPE
13	SBC Internet Services	7132	421	US	ARIN
14	Time Warner Communication	4323	387	US	ARIN
15	Swisscom Enterprise Solutions Ltd	3303	371	CH	RIPE
16	Cogent Communications	1631	358	US	ARIN
17	Song Networks	3246	301	FI	RIPE
18	DACOM Corporation	3786	286	KR	APNIC
19	Tiscali Intl Network	3257	283	DE	RIPE
20	Japan Network Info Center	2516	279	JP	APNIC

Tabla 5 TOP20 AS en Diciembre de 2003

Todos los resultados completos para las 20 tablas de este estudio se pueden encontrar en el Anexo *9.5 Evolución detallada del TOP20* de esta memoria.

Los países están codificados con sus acrónimos y su correspondencia es la siguiente: US=Estados Unidos, UK=Reino Unido, CH=Suiza, JP=Japón, DE=Alemania, KR=Corea del Sur, FI=Finlandia, SE=Suecia, NL=Holanda y CA=Canadá.

De estas tablas se pueden sacar unas conclusiones directas y es que los AS más importantes son todos de Estados Unidos y que dominan el TOP20 respecto a los países europeos y asiáticos. Análogamente ARIN domina a RIPE y APNIC, aunque con la evolución parece que RIPE va ganando terreno a ARIN, pero todavía continúa muy lejos.

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

Por otra parte, en la parte alta de esta clasificación apenas hay variabilidad, los AS que hay están muy consolidados y siempre incrementan el número de relaciones por encima de sus perseguidores.

Otra perspectiva para analizar esta tabla es desde el punto de vista de los AS como empresas competidoras por ganar puestos en esta clasificación. Para ello en el Anexo se han puesto las clasificaciones relativas y en que momento se ganan o pierden posiciones.

Además, se ha construido una gráfica con la evolución de esta clasificación para los 10-15 primeros AS del TOP20. (La gráfica esta en la página siguiente.)

Sobre esta gráfica se puede comprobar que el AS más importante, UUNet Technologies, no abandona nunca la primera posición y que los 3 siguientes van intercambiándose los siguientes puestos pero aún así hay poco movimiento. En cambio, en la parte baja de esta clasificación si hay mucha variedad y movimientos desde un instante al siguiente.

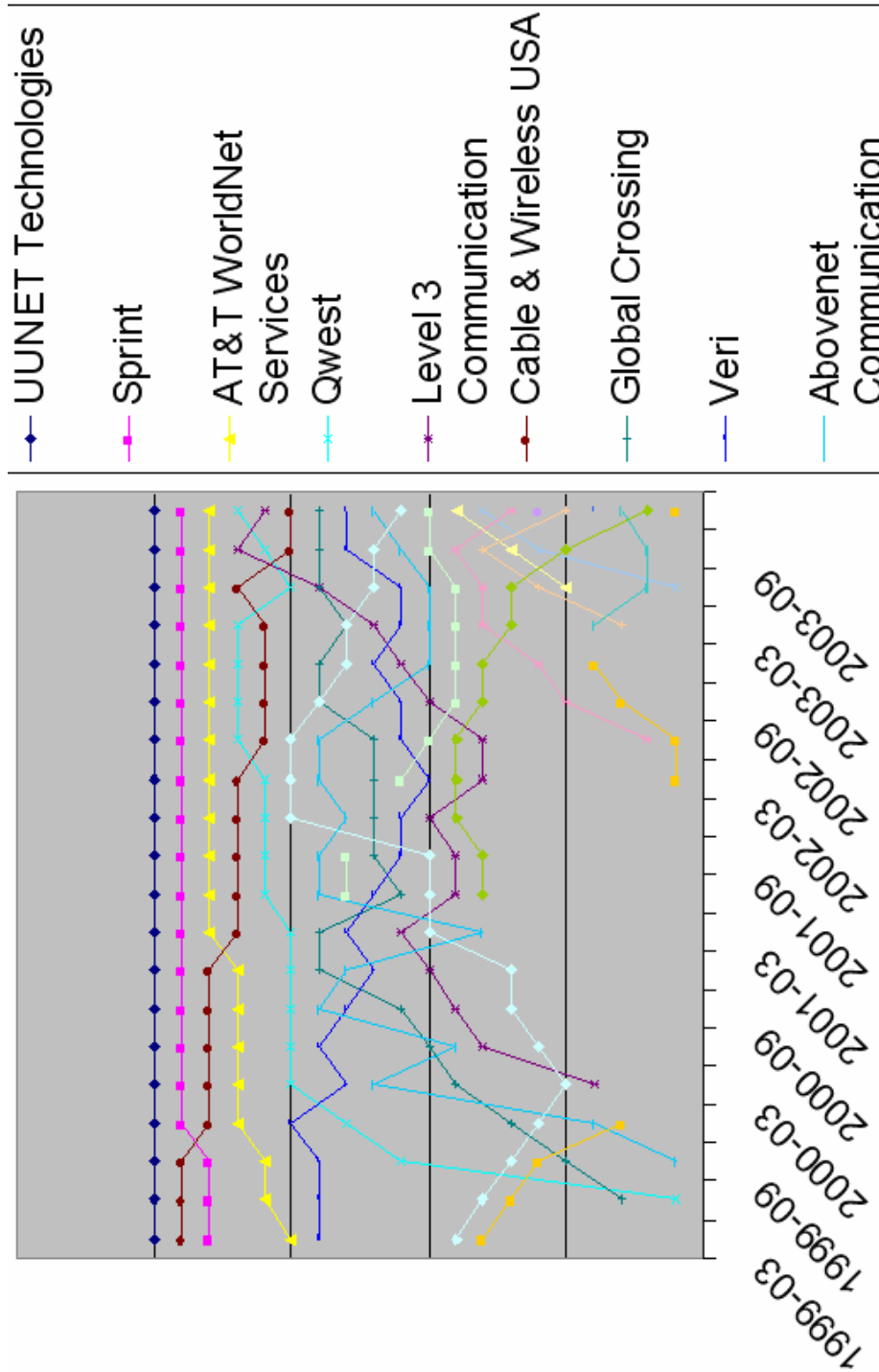


Tabla 6 Evolución del TOP20 AS

6.3. Evolución de la repartición geográfica

En esta sección se van a mostrar los resultados de la evolución de las métricas básicas número de AS y grado acumulado por zonas geográficas. La clasificación de zonas geográficas puede ser por IRRs o bien por países, por este motivo se han separado este estudio en dos partes.

6.3.1. IRRs

En primer lugar se analizan las métricas por los 5 IRRs existentes en Internet. Para cada métrica, además de su valor absoluto se calcula el porcentaje del IRR sobre el total, porque será más útil para la comparación.

En la primera muestra de datos sólo se ponen la tabla inicial y final:

1999-03	Número de AS	Grado acumulado	Porcentaje por núm. de AS	Porcentaje por Grado
ARIN	2657	11244	56,07%	63,24%
RIPE	1266	4068	26,72%	22,88%
APNIC	531	1736	11,20%	9,76%
LACNIC	189	504	3,98%	2,83%
Desconocido	95	226	2,00%	1,27%
TOTAL	4738	17778	100	100

Tabla 7 Clasificación por IRRs en Marzo de 1999

2003-12	Número de AS	Grado acumulado	Porcentaje por núm. de AS	Porcentaje por Grado
ARIN	8624	39181	52,44%	55,32%
RIPE	4989	21219	30,34%	29,96%
APNIC	1969	8268	11,97%	11,67%
LACNIC	555	1698	3,37%	2,39%
Desconocido	306	454	1,86%	0,64%
TOTAL	16443	70820	100	100

Tabla 8 Clasificación por IRR en Diciembre de 2003

De estos datos ya se pueden sacar las primeras conclusiones, y es que ARIN se lleva más de la mitad de todos los AS de Internet y le sigue RIPE con un 30% aproximadamente. El resto se lo reparten APNIC con un 10% y después LACNIC un 3%.

Hay una porción de AS que no se ha podido conocer a que IRR pertenecen y han quedado como desconocidos, pero al ser un porcentaje muy bajo del total (0,5%-1,5%), se ha considerado despreciable.

Por otra parte, se puede observar que los valores son significativamente diferentes dependiendo de si nos fijamos en el porcentaje por número de AS o en el porcentaje por grado acumulado. Este hecho ha provocado que se divida el estudio nuevamente en dos partes, según la métrica que se usa para calcular la clasificación.

6.3.1.1. Evolución del porcentaje por número de AS

Si se cogen los valores del porcentaje por número de AS, la tabla siguiente recoge su evolución:

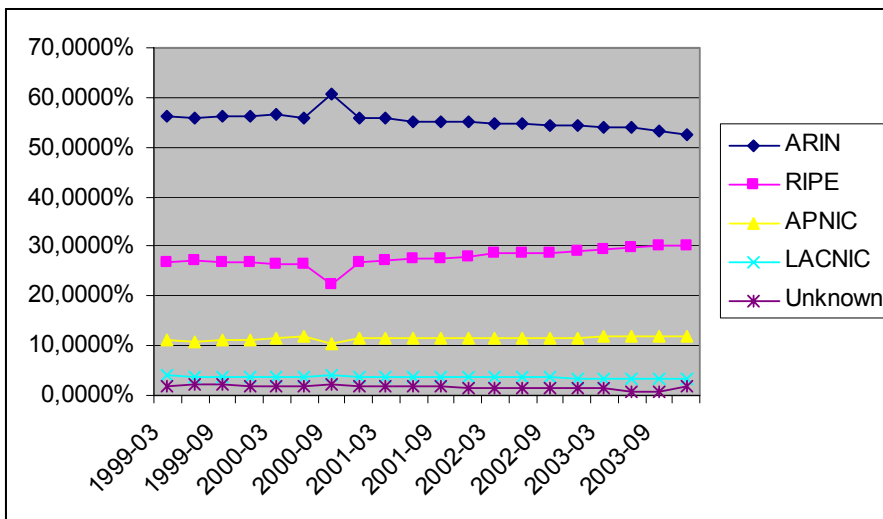
Año	ARIN	RIPE	APNIC	LACNIC	Desconocido	Total
1999-03	56,07%	26,72%	11,20%	3,98%	2,00%	100,00%
1999-06	56,01%	27,14%	10,85%	3,87%	2,10%	100,00%
1999-09	56,16%	26,93%	11,08%	3,74%	2,06%	100,00%
1999-12	56,25%	26,88%	11,18%	3,68%	1,98%	100,00%
2000-03	56,41%	26,40%	11,52%	3,67%	1,97%	100,00%
2000-06	55,99%	26,44%	11,87%	3,77%	1,90%	100,00%
2000-09	60,68%	22,27%	10,57%	4,22%	2,25%	100,00%
2000-12	55,80%	26,91%	11,55%	3,68%	2,04%	100,00%
2001-03	55,73%	27,19%	11,45%	3,65%	1,96%	100,00%
2001-06	55,21%	27,59%	11,63%	3,60%	1,94%	100,00%
2001-09	55,21%	27,59%	11,63%	3,60%	1,94%	100,00%
2001-12	55,01%	28,06%	11,65%	3,66%	1,61%	100,00%

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

2002-03	54,74%	28,53%	11,52%	3,67%	1,52%	100,00%
2002-06	54,72%	28,59%	11,58%	3,66%	1,42%	100,00%
2002-09	54,53%	28,70%	11,69%	3,61%	1,44%	100,00%
2002-12	54,36%	29,00%	11,64%	3,53%	1,44%	100,00%
2003-03	53,93%	29,37%	11,88%	3,49%	1,31%	100,00%
2003-06	53,87%	29,87%	11,93%	3,39%	0,91%	100,00%
2003-09	53,39%	30,33%	12,06%	3,36%	0,84%	100,00%
2003-12	52,44%	30,34%	11,97%	3,37%	1,86%	100,00%

Tabla 9 Evolución del porcentaje por número de AS de los IRRs

Y visto gráficamente sería lo siguiente:



Gráfica 9 Evolución del porcentaje de AS de los IRRs

Aquí se observa que ARIN tiene una trayectoria descendente aunque con pendiente muy baja y RIPE al revés, ascendente pero también con pendiente baja.

Por su parte, APNIC y LACNIC apenas varían, se van manteniendo siempre en el mismo porcentaje de número de AS.

A finales del año 2000 se observa una fluctuación muy rara dada la trayectoria de las evoluciones y esto es debido, como se ha dicho en estudios anteriores, a que la tabla BGP de este instante tenía algún problema, ya que se habían dado valores extraños también en otras métricas.

6.3.1.2. Evolución del porcentaje por grado acumulado

De nuevo se presentan los datos de la evolución del porcentaje por grado acumulado en la siguiente tabla:

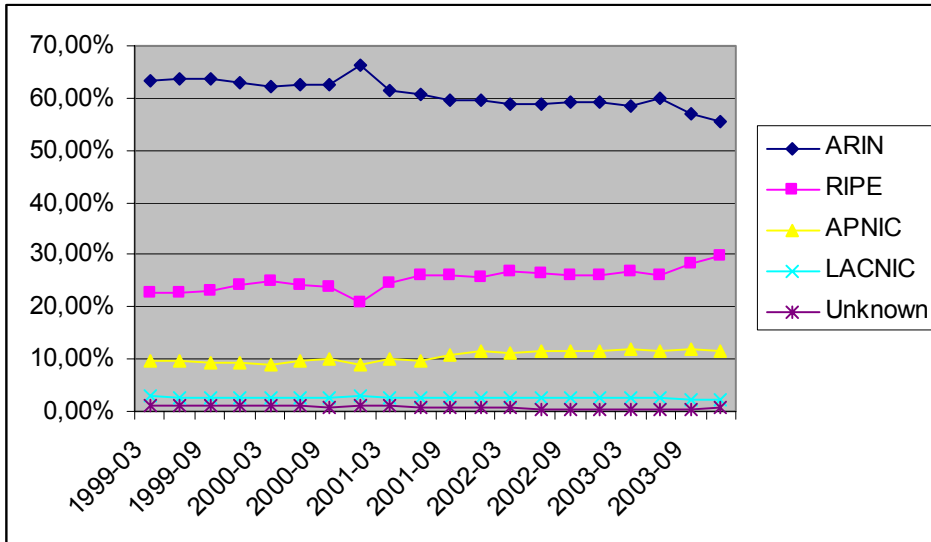
Año	ARIN	RIPE	APNIC	LACNIC	Desconocido	Total
1999-03	63,24%	22,88%	9,76%	2,83%	1,27%	100,00%
1999-06	63,62%	22,77%	9,57%	2,76%	1,26%	100,00%
1999-09	63,58%	23,25%	9,33%	2,67%	1,14%	100,00%
1999-12	62,98%	24,15%	9,21%	2,54%	1,10%	100,00%
2000-03	62,30%	25,08%	9,12%	2,44%	1,04%	100,00%
2000-06	62,72%	24,27%	9,53%	2,53%	0,93%	100,00%
2000-09	62,66%	23,89%	9,88%	2,64%	0,90%	100,00%
2000-12	66,32%	20,66%	8,88%	3,06%	1,05%	100,00%
2001-03	61,46%	24,73%	10,03%	2,77%	0,99%	100,00%
2001-06	60,53%	26,20%	9,74%	2,59%	0,91%	100,00%
2001-09	59,55%	25,96%	10,90%	2,72%	0,85%	100,00%
2001-12	59,41%	25,66%	11,51%	2,76%	0,63%	100,00%
2002-03	58,67%	26,91%	11,19%	2,64%	0,56%	100,00%
2002-06	58,65%	26,59%	11,51%	2,71%	0,52%	100,00%
2002-09	59,27%	25,96%	11,56%	2,67%	0,52%	100,00%
2002-12	59,08%	26,21%	11,59%	2,60%	0,50%	100,00%
2003-03	58,39%	26,64%	11,98%	2,54%	0,43%	100,00%
2003-06	59,84%	25,97%	11,43%	2,42%	0,32%	100,00%
2003-09	57,14%	28,22%	11,92%	2,38%	0,31%	100,00%
2003-12	55,32%	29,96%	11,67%	2,39%	0,64%	100,00%

Tabla 10 Evolución del porcentaje por grado acumulado de los IRRs

A partir de esta tabla ya se puede comprobar que aquí el porcentaje de grados no conocidos es bastante inferior y eso quiere decir que los AS que no se conocían tienen un grado bajo y no son de los importantes.

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

La gráfica correspondiente a la tabla es la siguiente:



Gráfica 10 Evolución del porcentaje por grado acumulado de los IRRs

A partir de esta gráfica se observa lo mismo que con el número de AS, que ARIN va bajando y RIPE subiendo, mientras que APNIC y LACNIC mantienen sus porcentajes.

La diferencia está en que aquí las pendientes de ARIN y RIPE son superiores, por tanto RIPE crece y ARIN decrece más rápido en el grado acumulado que el número de AS.

Esto quiere decir que RIPE se interconecta más rápidamente que ARIN, puesto que el grado mide la interconexión y el número de AS mide la anchura del grafo. Más adelante se corroborarán estos datos.

6.3.2. Países

Esta parte del estudio es prácticamente idéntica a los IRRs pero sustituyéndolos por países.

La diferencia fundamental está en que ARIN está concentrado en Estados Unidos y la mayoría de sus AS y enlaces le

pertenecen, mientras que en RIPE hay muchos más países e Internet esta más repartida.

También se ha dividido el estudio en dos secciones según el porcentaje escogido, puesto que aquí los cambios son más claros. Hay países que tienen muchos AS pero pocos enlaces (grado bajo) y al revés, hay otros que tienen menos AS pero están más interconectados.

Para clarificar esto, se toma como ejemplo los datos de la tabla de Diciembre de 2003. Esta es la tabla de los 10 primeros países ordenados por el porcentaje de número de AS:

Posición	Número de AS	Porcentaje	País
1	8157	49,60%	Estados Unidos
2	612	3,72%	Alemania
3	549	3,33%	Rusia
4	514	3,12%	Reino Unido
5	413	2,51%	Corea del Sur
6	392	2,38%	Japón
7	380	2,31%	Canadá
8	329	2,00%	Australia
9	320	1,94%	Ucrania
10	313	1,90%	Desconocido

Tabla 11 Clasificación por porcentaje por número de AS de los países

Y estos son los datos de los 10 primeros países ordenados por el porcentaje por grado acumulado:

Posición	Grado acumulado	Porcentaje	País
1	36974	52,20%	Estados Unidos
2	3009	4,24%	Alemania
3	2883	4,07%	Reino Unido
4	2146	3,03%	Japón
5	1910	2,69%	Canadá
6	1671	2,35%	Rusia
7	1625	2,29%	Corea del Sur
8	1595	2,25%	Holanda
9	1163	1,64%	Australia
10	1026	1,44%	Francia

Tabla 12 Clasificación por porcentaje por grado acumulado de los países

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

Como se observa, hay ligeros cambios entre las 10 primeras posiciones. Rusia o Ucrania son países con muchos AS pero menos interconectados que Japón o Canadá por ejemplo, que a su vez tienen menos AS que Rusia y Ucrania.

Por este motivo, para estudiar su evolución se separa en las dos secciones según que porcentaje se usa.

6.3.2.1. Evolución del número de AS por países

Para estudiar la evolución se toman únicamente los 5 primeros países en cada sección. En este caso los países más importantes por número de AS son Estados Unidos, Alemania, Rusia, Reino Unido y Corea del Sur.

La tabla de datos siguiente muestra los datos de la evolución:

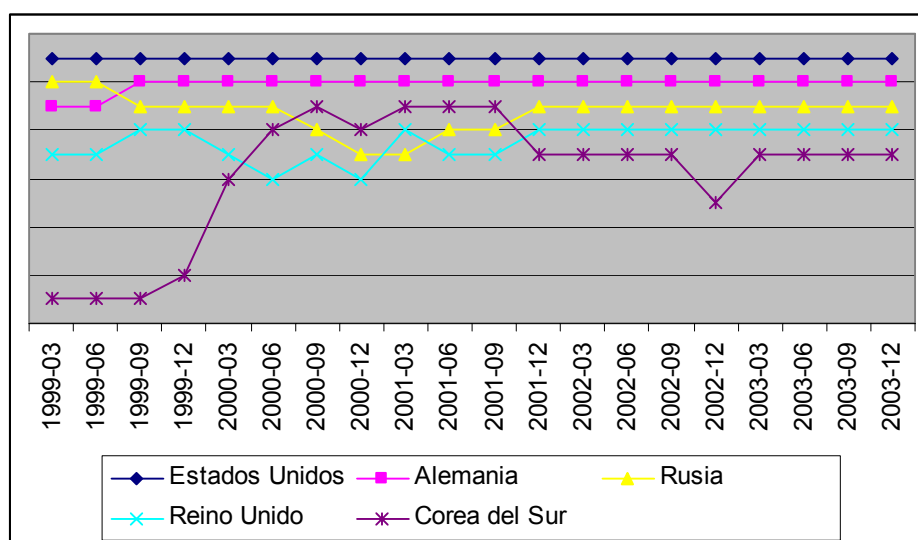
Año	Estados Unidos	Alemania	Rusia	Reino Unido	Corea del Sur
1999-03	52,7438	2,9337	3,2503	2,4694	1,3930
1999-06	53,0549	3,0356	3,2096	2,5522	1,0545
1999-09	52,8829	3,3605	3,0952	2,7237	1,6449
1999-12	53,1766	3,4466	2,9860	2,6842	1,9854
2000-03	53,3468	3,6275	2,8789	2,5047	2,3032
2000-06	53,5705	3,6744	2,8434	2,4150	2,6227
2000-09	53,1623	3,7011	2,7407	2,4713	2,9164
2000-12	57,5974	3,0849	1,9598	2,0445	1,8147
2001-03	52,9673	3,8599	2,6054	2,6440	2,7309
2001-06	52,8300	3,7882	2,6740	2,6562	2,7097
2001-09	52,3769	3,9249	2,7491	2,6899	2,8168
2001-12	52,2458	3,8948	2,8062	2,7175	2,7095
2002-03	52,0028	3,8894	3,0913	2,7040	2,5568
2002-06	52,0207	3,8168	2,7765	2,4248	2,1703
2002-09	51,7465	3,8467	2,9590	2,7353	2,3889
2002-12	51,5175	3,8058	2,9863	2,8752	2,3057
2003-03	51,0745	3,7573	3,0499	3,0166	2,6295
2003-06	51,0450	3,7011	3,2093	3,0799	2,5882
2003-09	50,5147	3,7158	3,3329	3,1321	2,5923
2003-12	49,6077	3,7219	3,3388	3,1260	2,5117

Tabla 13 Evolución del porcentaje por número de AS por países

Como se sabía, Estados Unidos se lleva un porcentaje muy abultado respecto al resto de países, aunque va decreciendo con el paso del tiempo a la vez que suben todo el resto de países.

De este modo no es muy útil hacer una gráfica de la evolución del porcentaje, porque el valor tan alto de Estados Unidos tapanía a todo el resto. En su lugar se hará el gráfico de la evolución de la clasificación de los países.

Es la siguiente:



Gráfica 11 Evolución de la clasificación por porcentaje de número de AS de los países

En la gráfica no se observa que haya mucha variación desde hace cinco años hasta ahora. Las cuatro primeras posiciones se las han estado repartiendo siempre los mismos países y lo más significativo es el crecimiento de Corea del Sur, llegando desde un 11º puesto hasta un 3º, aunque luego haya bajado hasta el 5º.

6.3.2.2. Evolución del grado acumulado por países

Del mismo modo, mostramos los datos de la evolución del porcentaje por grado acumulado de los países para los 5 más importantes en este aspecto que son Estados Unidos, Japón, Reino Unido, Alemania y Canadá.

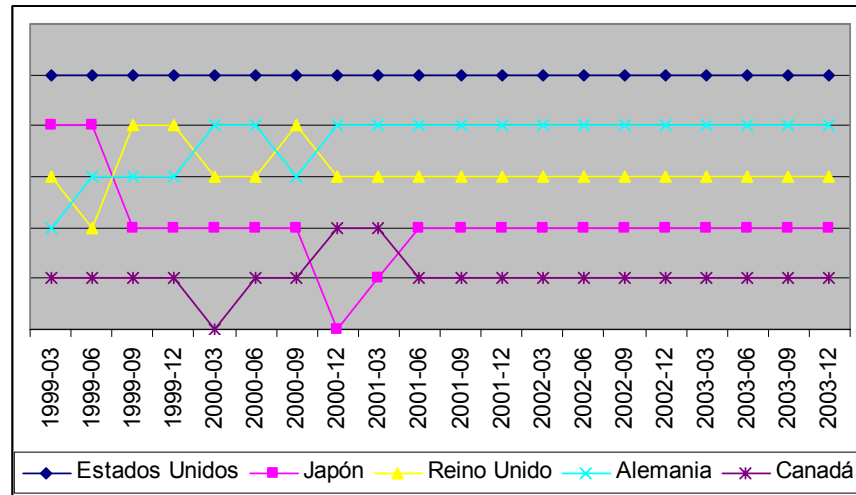
Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

Año	Estados Unidos	Japón	Reino Unido	Alemania	Canadá
1999-03	59,8718	3,2681	2,9306	2,7787	2,6831
1999-06	60,3229	3,0727	2,8809	2,8961	2,7094
1999-09	60,3299	2,9165	2,9994	2,9534	2,6585
1999-12	59,8426	2,7659	3,5486	3,3109	2,5693
2000-03	59,4112	2,5163	3,5023	3,8380	2,4774
2000-06	59,8427	2,4469	3,3730	3,4315	2,4404
2000-09	59,8851	2,3738	3,5058	3,4423	2,3363
2000-12	63,3069	1,8708	3,1630	3,0866	2,4170
2001-03	58,6942	2,2589	3,3608	3,3872	2,3143
2001-06	57,8221	2,2509	3,4765	4,2275	2,2192
2001-09	56,8607	2,7124	3,4676	4,1583	2,2976
2001-12	56,5612	3,0261	3,4818	3,9671	2,4461
2002-03	55,8344	2,8551	3,4838	3,9335	2,4292
2002-06	55,8143	3,0567	3,4782	4,1950	2,4587
2002-09	56,3892	3,1133	3,4996	4,0048	2,5032
2002-12	56,1895	3,0602	3,3855	4,0764	2,5075
2003-03	55,4845	3,0222	3,5481	3,9231	2,5061
2003-06	56,8129	2,8606	3,5625	3,7020	2,5888
2003-09	54,0043	3,1493	3,8556	4,0341	2,7077
2003-12	52,2084	3,0302	4,0709	4,2488	2,6970

Tabla 14 Evolución del porcentaje por grado acumulado por países

Como antes, Estados Unidos es el gran dominador en el grado acumulado, seguido por los otros 4 países a mucha distancia. También aquí va perdiendo terreno respecto al resto de países que crecen, pero la gráfica de la evolución volvería a ser poco útil. Por eso volveremos a hacerla de la evolución de la clasificación en lugar de los porcentajes.

Es la siguiente:



Gráfica 12 Evolución de la clasificación por porcentaje de grado acumulado de los países

Si antes se ha visto que había poca variación, aquí todavía hay menos, puesto que los 5 países se mueven todos los años entre las 6 primeras posiciones, y a partir de mediados del año 2001 la clasificación no se ha vuelto a mover.

6.3.3. Comparación de países

Otro estudio interesante respecto a la repartición geográfica de los AS es la de comparar países parecidos en las mismas condiciones y métricas. Poder estudiar cual de ellos crece más rápido, cual tiene más AS o cual esta mejor interconectado.

Para este estudio se ha escogido a España (ES) y los 3 países europeos más cercanos, que son Portugal (PT), Francia (FR) e Italia (IT). Antes de hacer el estudio es de suponer que Francia e Italia tendrán números superiores a los de España, y Portugal tendrá números inferiores, pero quizá al analizar la evolución podamos llegar a conclusiones menos obvias.

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

La tabla de los datos es la siguiente:

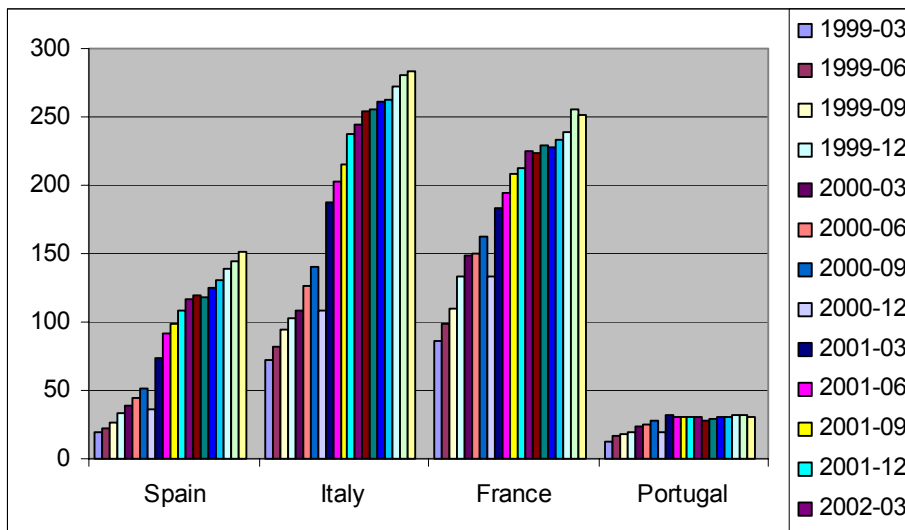
Año	Número de AS				Grado acumulado			
	ES	IT	FR	PT	ES	IT	FR	PT
1999-03	19	72	86	13	58	191	278	33
1999-06	22	82	98	17	68	224	318	43
1999-09	27	94	110	18	81	253	381	49
1999-12	33	103	134	20	112	319	464	56
2000-03	39	108	148	24	131	315	704	68
2000-06	45	126	150	25	143	375	676	67
2000-09	51	140	163	28	149	412	579	78
2000-12	36	109	133	20	105	333	530	63
2001-03	73	187	183	32	214	615	732	97
2001-06	91	203	194	31	312	737	807	96
2001-09	99	215	209	30	361	759	872	90
2001-12	108	237	213	30	385	790	859	94
2002-03	116	245	225	30	429	879	944	91
2002-06	120	254	224	28	513	869	941	88
2002-09	118	255	229	29	520	860	878	94
2002-12	125	261	228	31	561	911	909	106
2003-03	130	262	233	31	632	909	940	114
2003-06	139	272	239	32	699	950	983	119
2003-09	144	280	255	32	675	964	1001	115
2003-12	151	283	251	31	717	1016	1026	122

Tabla 15 Evolución de número de AS y grado acumulado de España, Francia, Italia y Portugal.

Lo primero que se observa es que Portugal esta muy distanciada de los otros tres países, y que Francia e Italia estan muy igualadas en todo. España les sigue a cierta distancia, pero aún así esta mucho más lejos de Portugal que de Francia e Italia.

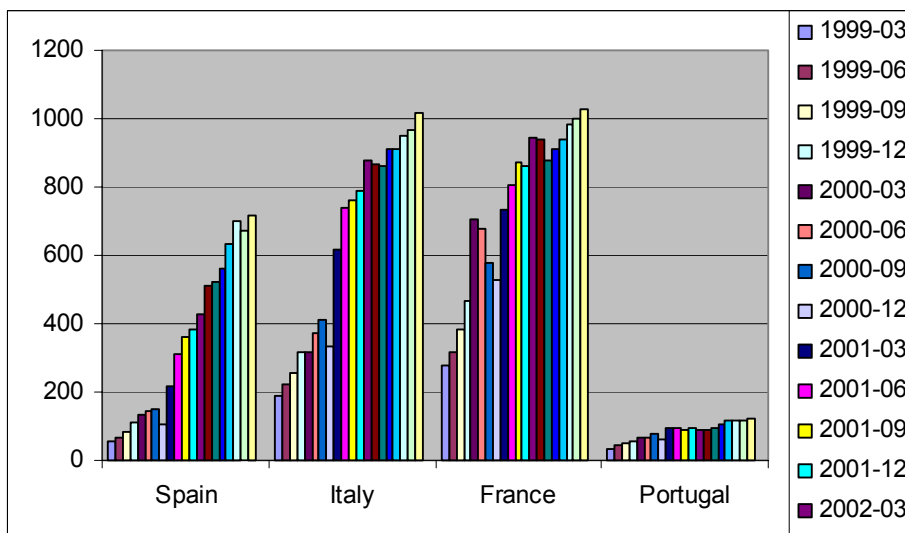
Como hemos hecho con los IRRs y los países, vamos a hacer dos gráficas, separando si ordenamos por el número de AS o por el grado acumulado.

Por el número de AS obtenemos:



Gráfica 13 Evolución del número de AS de España, Francia, Italia y Portugal

Y por el grado acumulado:



Gráfica 14 Evolución del grado acumulado de España, Francia, Italia y Portugal

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

Con las gráficas se comprueba que Francia e Italia si van muy a la par y que España en el número de AS no crece tan deprisa como Francia e Italia, en cambio en grado acumulado lo hace más deprisa.

Esto indica que España aunque no aumente tanto el número de AS, se interconecta más rápido que Francia e Italia.

6.4. Evolución de las zonas de Internet

El siguiente estudio trata sobre la evolución de las 3 zonas de Internet que se han definido en secciones anteriores. Este es un campo todavía por explorar y en este mismo estudio nos traerá conclusiones interesantes.

6.4.1. Número de AS

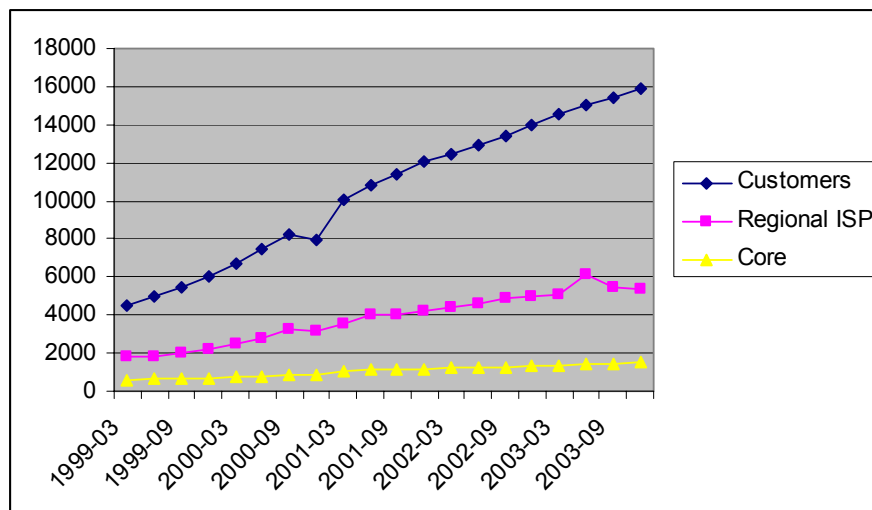
Primero se analizan el número de AS de cada zona, tanto en valor como en porcentaje. Los datos son los siguientes:

Año	Customers	Customers	Regional ISP	Regional ISP	Core	Core
1999-03	4525	65,19%	1814	26,13%	602	8,67%
1999-06	4940	66,81%	1812	24,51%	642	4,16%
1999-09	5412	66,95%	2002	24,76%	670	3,98%
1999-12	6057	67,69%	2188	24,45%	703	3,78%
2000-03	6682	67,18%	2516	25,30%	748	3,62%
2000-06	7438	67,80%	2758	25,14%	775	3,41%
2000-09	8257	67,02%	3218	26,12%	846	3,32%
2000-12	7930	66,33%	3142	26,28%	883	3,56%
2001-03	10024	68,67%	3558	24,37%	1015	3,36%
2001-06	10832	67,82%	4032	25,25%	1107	3,35%
2001-09	11417	68,89%	3974	23,98%	1182	3,44%
2001-12	12033	69,34%	4176	24,06%	1145	3,19%

2002-03	12486	68,70%	4428	24,36%	1261	3,35%
2002-06	12931	68,81%	4582	24,38%	1278	3,29%
2002-09	13446	68,74%	4838	24,73%	1276	3,16%
2002-12	13993	68,88%	5016	24,69%	1307	3,12%
2003-03	14561	69,48%	5032	24,01%	1364	3,15%
2003-06	14988	66,48%	6108	27,09%	1449	3,11%
2003-09	15452	69,14%	5414	24,23%	1482	3,21%
2003-12	15937	69,60%	5388	23,53%	1572	3,32%

Tabla 16 Evolución del número de AS en las zonas de Internet

Y la gráfica tomando los números de AS sería:

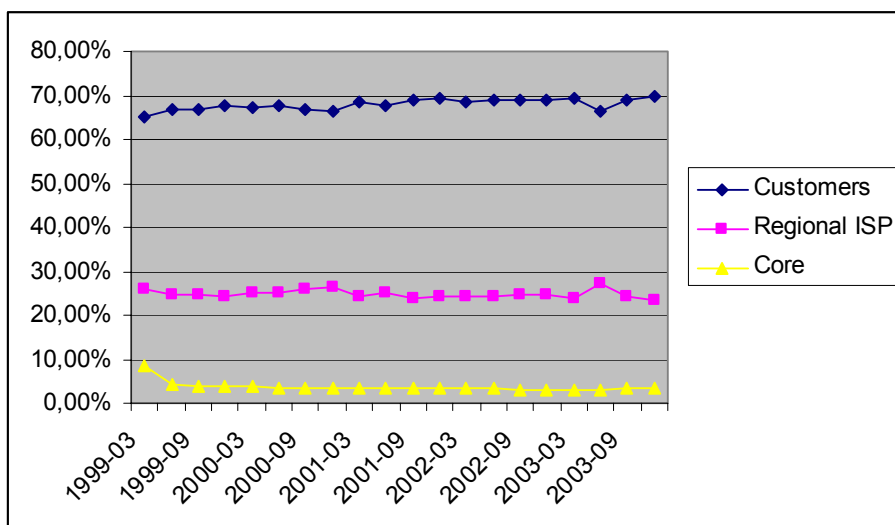


Gráfica 15 Evolución del número de AS de las zonas de Internet

Aquí nos encontramos con una gran diferencia entre el crecimiento de los *Customers* y los *Regional ISP* y el *Core*. Pero esta diferencia es engañosa, puesto que por su propia naturaleza, los *Customers* han de crecer mucho más que los *Regional ISP* y a su vez que el *Core*.

Para tener una visión más correcta de la evolución del tamaño de las tres zonas, hay que hacer la gráfica por porcentajes:

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP



Gráfica 16 Evolución del porcentaje de número de AS por zonas de Internet

Ahora los resultados son más claros, el porcentaje no ha variado apenas en los últimos cinco años, por tanto las zonas han crecido todas a la vez, pero sin variar su tamaño relativo entre ellas.

6.4.2. Número de enlaces

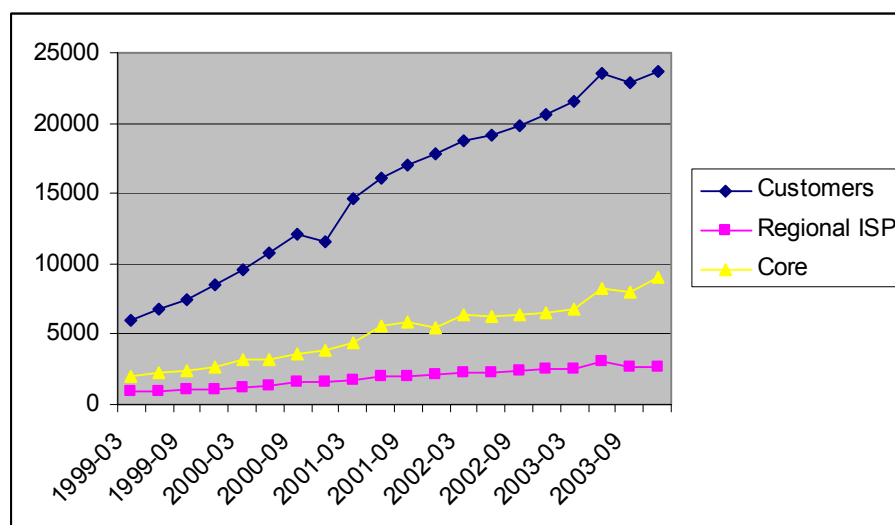
En segundo lugar se analizan el número de enlaces para cada uno de los grupos. La tabla de datos correspondiente sería:

Año	Customers	Regional ISP	Core	Customers	Regional ISP	Core
1999-03	5978	907	2004	67,25%	10,20%	22,54%
1999-06	6730	906	2274	67,91%	9,14%	22,95%
1999-09	7479	1001	2372	68,92%	9,22%	21,86%
1999-12	8507	1094	2601	69,72%	8,97%	21,32%
2000-03	9638	1258	3252	68,12%	8,89%	22,99%
2000-06	10812	1379	3196	70,27%	8,96%	20,77%
2000-09	12049	1609	3656	69,59%	9,29%	21,12%
2000-12	11553	1571	3901	67,86%	9,23%	22,91%

2001-03	14640	1779	4365	70,44%	8,56%	21,00%
2001-06	16122	2016	5564	68,02%	8,51%	23,47%
2001-09	17012	1987	5831	68,51%	8,00%	23,48%
2001-12	17823	2088	5435	70,32%	8,24%	21,44%
2002-03	18715	2214	6426	68,42%	8,09%	23,49%
2002-06	19215	2291	6253	69,22%	8,25%	22,53%
2002-09	19760	2419	6424	69,08%	8,46%	22,46%
2002-12	20656	2508	6507	69,62%	8,45%	21,93%
2003-03	21517	2516	6772	69,85%	8,17%	21,98%
2003-06	23529	3054	8182	67,68%	8,78%	23,54%
2003-09	22899	2707	8020	68,10%	8,05%	23,85%
2003-12	23666	2694	9050	66,83%	7,61%	25,56%

Tabla 17 Evolución del número de enlaces de las zonas de Internet

Y la gráfica tomando el número de enlaces sería:

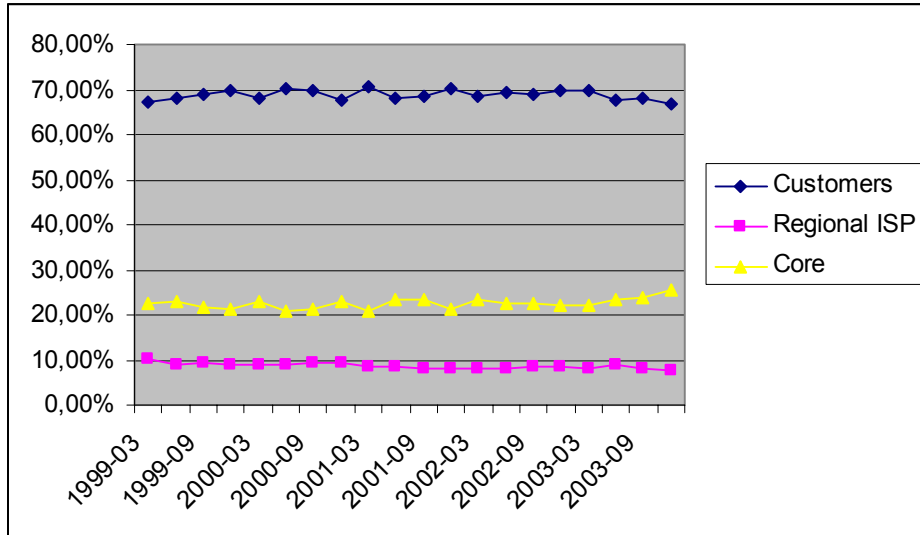


Gráfica 17 Evolución del número de enlaces de las zonas de Internet

Exactamente igual que antes, esta gráfica es un poco engañosa, porque al crecer el número de *Customers* crece también los enlaces y hay muchos más *Customers* que *Regional ISP* y *Core*, por tanto se necesita la gráfica de los porcentajes.

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

La gráfica por porcentajes es la siguiente:



Gráfica 18 Evolución del porcentaje de número de enlaces de las zonas de Internet

Y con esta gráfica se vuelve a observar que en porcentaje, el número de enlaces tampoco ha variado en los últimos años, se mantiene bastante constante por cada una de las zonas.

Este estudio sobre el número de AS y el número de enlaces no ha arrojado ninguna conclusión interesante sobre el crecimiento de las zonas, puesto que todas crecen en su medida y los porcentajes se mantienen, pero realmente sí que hay un hecho diferente en su crecimiento que ha quedado escondido y que con el siguiente estudio desvelaremos.

6.4.3. Grado medio

El estudio del grado medio nos permitirá saber cuanto de interconectado está cada grupo entre los mismos AS del grupo y con los de otros grupos.

La tabla de datos para el análisis es la siguiente:

Año	Customers	Regional ISP	Core
1999-03	2,64	2,40	6,66
1999-06	2,72	2,33	7,08
1999-09	2,76	2,41	7,08
1999-12	2,81	2,48	7,40
2000-03	2,88	2,59	8,70
2000-06	2,91	2,64	8,25
2000-09	2,92	2,75	8,64
2000-12	2,91	2,76	8,84
2001-03	2,92	2,74	8,60
2001-06	2,98	2,85	10,05
2001-09	2,98	2,76	9,87
2001-12	2,96	2,67	9,49
2002-03	3,00	2,70	10,19
2002-06	2,97	2,69	9,79
2002-09	2,94	2,68	10,07
2002-12	2,95	2,72	9,96
2003-03	2,96	2,64	9,93
2003-06	3,14	3,08	11,29
2003-09	2,96	2,65	10,82
2003-12	2,97	2,64	11,51

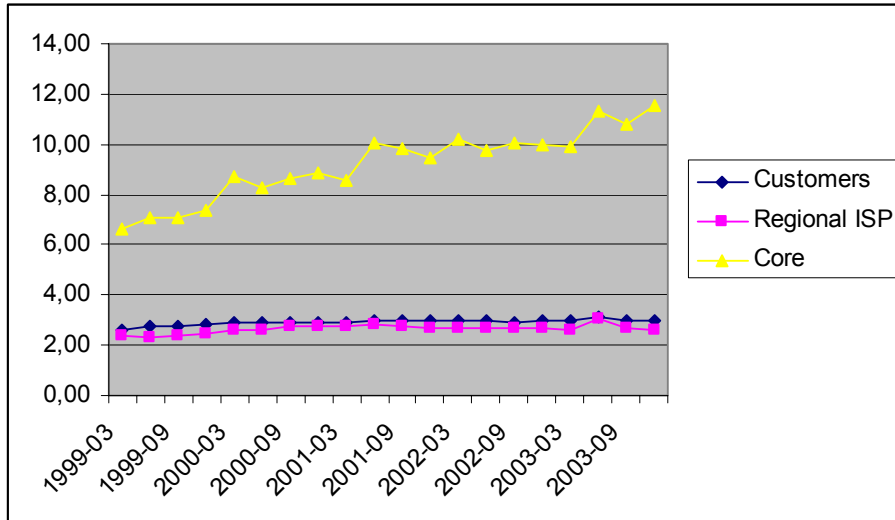
Tabla 18 Evolución del grado medio de las zonas de Internet

De esta tabla se observa que el grado medio del *Core* es bastante superior al de *Customers* y *Regional ISP*, 3 veces más aproximadamente. Esto tiene mucha lógica, porque en el *Core* es donde se encuentran los máximos proveedores y donde esta todo más interconectado y su grado ha de ser superior que los *Customers*, que son clientes que se conectan a proveedores para provisionarse de tráfico.

Por su parte, el grado medio de *Customers* y *Regional ISP* son bastante parecidos entre ellos.

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

El gráfico de la evolución del grado medio es el siguiente:



Gráfica 19 Evolución del grado medio de las zonas de Internet

En este gráfico ya se ve algo diferente a los anteriores. Mientras que el grado medio de *Customers* y *Regional ISP* se mantiene constante, el del *Core* crece y bastante deprisa.

Esto significa que las zonas de *Customers* y *Regional ISP* crecen en número de AS y enlaces pero a lo ancho, sin interconectarse más de lo que estaban, mientras que el *Core* no para de aumentar su interconectividad.

Esta es la principal conclusión de este estudio de las zonas de Internet.

6.4.4. Relaciones entre AS

Los tipos de relaciones entre los AS y las zonas de Internet son conceptos que van asociados. Con las zonas separadas se puede hacer un estudio de que tipo de relaciones tienen cada uno de los grupos. Para ello no se estudiará su evolución porque no aporta mucha información, simplemente se cogerán los datos de la tabla de Diciembre de 2003 y se observarán los resultados.

La tabla de datos es la siguiente:

Relación	Customers	Regional ISP	Core
PEER	0	0	3260
P2C	23180	2577	4873
C2P	486	117	470
SIB	0	0	447
C2C	0	0	0

Tabla 19 Número de relaciones entre AS de las zonas de Internet

Como se puede observar, en los *Customers* casi todas las relaciones son P2C, puesto que todos son clientes que contratan a los proveedores para que les intercambie tráfico. Las relaciones C2P pueden ser algunos casos extraños en que un cliente también provee de tráfico a su proveedor.

En los *Regional ISP*, la mayoría también son P2C, porque son las que establecen con los grandes proveedores del Core y que las C2P que aparecen son de los proveedores que sirven tráfico a clientes.

En el *Core*, las relaciones están más divididas. Hay un gran número que todavía sigue siendo P2C (un 50%) pero también hay otro gran número (un 40%) que tienen relaciones de PEER o SIB, que son mucho más útiles para los AS del *Core* y que se suelen establecer en puntos neutros o cuando hay un interés mutuo por ambos sistemas autónomos.

6.5. Evolución del *Core* de Internet

En este estudio nos centramos únicamente en la zona *Core* de Internet, que es la más interesante por su alto nivel de interconectividad.

Sobre esta zona ya se ha visto que su número de AS y enlaces crecía y lo más importante, que su interconectividad aumentaba

más deprisa que para las otras dos zonas, que prácticamente era constante. Sobre este hecho se vuelve a insistir en la primera sección de este estudio, para comprobar si el resultado es cierto.

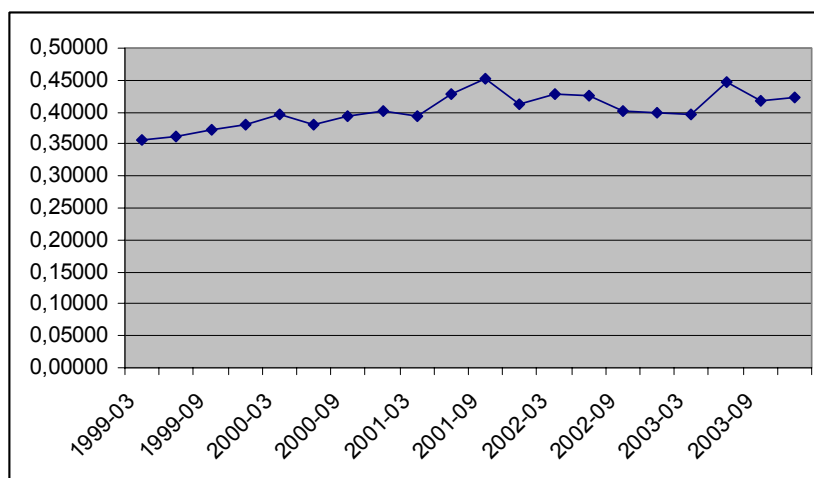
6.5.1. Evolución del Coeficiente de Clustering

El coeficiente de clustering es una métrica que indica cuanto de conectado está un conjunto de nodos entre ellos, es decir, su interconectividad con el resto de AS de su zona. Una vez aplicado el algoritmo costoso sobre el grafo del *Core* se han obtenido los siguientes datos:

Año	Coeficiente Clustering
1999-03	0,35626
1999-06	0,36044
1999-09	0,37248
1999-12	0,38019
2000-03	0,39629
2000-06	0,38157
2000-09	0,39248
2000-12	0,40085
2001-03	0,39408
2001-06	0,42824
2001-09	0,45091
2001-12	0,41187
2002-03	0,42701
2002-06	0,42545
2002-09	0,40203
2002-12	0,39949
2003-03	0,39678
2003-06	0,44660
2003-09	0,41743
2003-12	0,42245

Tabla 20 Evolución del coeficiente de clustering del Core

Se observa que ha aumentado desde hace cinco años, pero miremos la gráfica para estudiarlo más a fondo.



Gráfica 20 Evolución del coeficiente de clustering del Core

Efectivamente, el coeficiente de clustering ha aumentado desde los 0,35 de 1999 hasta los 0,42 de 2003, aunque por el camino ha tenido diversas fluctuaciones.

Aunque parezca un incremento muy pequeño, la magnitud del coeficiente de clustering engaña y un incremento tan pequeño puede haber significado muchísimas conexiones nuevas e interconexión.

Con este análisis del coeficiente de clustering se ha comprobado la corrección del estudio anterior del grado medio.

6.5.2. Evolución de las relaciones entre AS

Antes se ha visto que en el Core era donde había más variedad de tipos de conexiones y donde había más interés por saber su distribución. En esta sección se estudiará la evolución de los tipos de relaciones del *Core*. La tabla de datos con el número de relaciones de cada tipo es la siguiente:

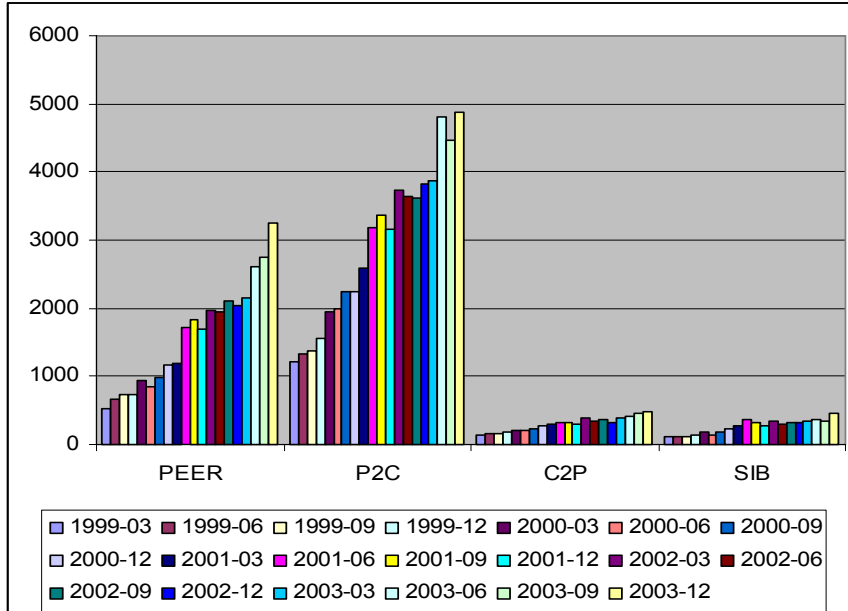
Año	PEER	P2C	C2P	SIB
1999-03	534	1223	132	115
1999-06	675	1326	160	113

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

1999-09	723	1368	157	124
1999-12	733	1565	176	127
2000-03	939	1944	196	173
2000-06	850	1994	212	140
2000-09	994	2254	223	185
2000-12	1178	2233	271	219
2001-03	1185	2592	306	282
2001-06	1720	3176	312	356
2001-09	1824	3370	318	319
2001-12	1702	3169	288	276
2002-03	1964	3741	380	341
2002-06	1953	3650	351	299
2002-09	2113	3628	357	326
2002-12	2041	3828	324	314
2003-03	2155	3874	391	352
2003-06	2616	4801	409	356
2003-09	2759	4464	449	348
2003-12	3260	4873	470	447

Tabla 21 Evolución de los tipos de relaciones de AS en el Core

Y la gráfica correspondiente:



Gráfica 21 Evolución de los tipos de relaciones de AS en el Core

Como vemos, el tipo de relación que mayor incremento ha tenido ha sido el PEER, seguido del P2C y del SIB. Esto nos indica que cada vez más los AS están apostando por hacer *peerings* con otros AS para intercambiarse tráfico. Un hecho importante también es la proliferación de los puntos neutros donde sus miembros hacen *peerings* entre ellos.

Las relaciones P2C siguen creciendo igualmente porque son las que se realizan con los clientes y los proveedores nunca dejaron de tenerlas. Las relaciones SIB son más complicadas de establecerse puesto que al compartir todo las empresas de los AS son más reacias.

6.5.3. TOP20 del Core

Del mismo modo que se ha obtenido el TOP20 para toda Internet, en esta sección se va a obtener para la zona del Core únicamente.

Como antes, no se va a poner toda la evolución, únicamente la clasificación de los momentos inicial y final, para hacerse una idea de su evolución y del estado actual. En esta ocasión, los datos completos de toda la evolución se pueden encontrar en el CD.

Los datos para la tabla inicial de Marzo de 1999 son los siguientes:

Pos	Número AS	Grado	Nombre	País	IRR
1	701	162	UUNET Technologie	US	ARIN
2	3561	141	Cable & Wireless USA	US	ARIN
3	1239	121	Sprint	US	ARIN
4	293	111	Energy Sciences Network (ESnet)	US	ARIN
5	2914	104	Veri	US	ARIN
6	2497	78	Japan Network Information Center	JP	APNIC
7	1	78	BBNPLANET	US	ARIN
8	7018	72	AT&T WorldNet Services	US	ARIN
9	1740	62	CERFnet	US	ARIN
10	5459	61	London Internet Exchange Ltd.	UK	RIPE

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

11	286	55	European Unix Network	NL	RIPE
12	6453	51	Teleglobe Inc	CA	ARIN
13	1755	45	Ebone Consortium	SE	RIPE
14	1673	45	ANS Communications	US	ARIN
15	3333	44	RIPE NCC	NL	RIPE
16	702	41	Unknown	-	-
17	145	40	MCI Communications Corporation	US	ARIN
18	1849	32	Public IP Exchange	UK	RIPE
19	4000	30	Sprint International	US	ARIN
20	3300	29	Infonet-Europe	NL	RIPE

Tabla 22 Clasificación del TOP20 AS del Core de Marzo de 1999

Y los datos para la tabla final de Diciembre de 2003:

Pos	Número AS	Grado	Nombre	País	IRR
1	4513	420	Globix Corporation	US	ARIN
2	6461	354	Abovenet Communication	US	ARIN
3	3356	325	Level 3 Communication	US	ARIN
4	3303	281	Swisscom Enterprise Solutions Ltd	CH	RIPE
5	1239	244	Sprint	US	ARIN
6	3246	228	Song Networks	FI	RIPE
7	3257	219	Tiscali Intl Network	DE	RIPE
8	3549	213	Global Crossing	US	ARIN
9	2914	213	Veri	US	ARIN
10	8210	208	Nextbone - Nextra's international bac	NO	RIPE
11	12956	207	Telefonica Backbone AS	ES	RIPE
12	701	205	UUNET Technologie	US	ARIN
13	6939	201	Hurricane Electric	US	ARIN
14	2516	198	Japan Network Information Center	JP	APNIC
15	3561	187	Cable & Wireless USA	US	ARIN
16	8001	186	Net Access Corporation	US	ARIN
17	8075	170	Unknown	-	-
18	1299	165	Telia Corporate Network	SE	RIPE
19	4637	162	Reach Network Border AS	HK	APNIC
20	7911	157	Williams Communications Group	US	ARIN

Tabla 23 Clasificación del TOP20 AS del Core de Diciembre de 2003

Si estas tablas se comparan con las obtenidas de toda Internet, nos damos cuenta que en el Core no hay tanto dominio de Estados Unidos y ARIN. Aunque siga ocupando los primeros

puestos y sea mayoría, hay bastantes más AS de RIPE y APNIC que en el TOP20 de toda Internet.

Ahora parece estar más equilibrado entre ARIN y RIPE+APNIC, y la evolución ha sido la de entrar cada vez más AS de RIPE o APNIC quitando el sitio a los de ARIN.

Si se tiene en cuenta que ahora sólo hay AS del *Core* y antes eran todos los de Internet se puede llegar a la conclusión que en la zona de ARIN hay más *Customers* y *Regional ISP* (en porcentaje) que en las zonas de RIPE y APNIC.

El *Core* está más repartido que la Internet en general, y eso es bueno para la propia topología y para el funcionamiento global de Internet.

Capítulo

7

CONCLUSIONES

7.1. Conclusiones de los estudios

Finalmente, después de haber hecho cinco tipos de estudio sobre la topología de Internet, podemos extraer una serie de conclusiones sobre la evolución y el estado actual de la red.

Las tablas BGP nos han permitido conocer un gran número de datos sobre los AS e Internet, que necesitan ser interpretados y darles su justo valor teniendo en cuenta siempre que la fuente de datos no es completa y la metodología utilizada se basa en heurísticas, que aunque hayan obtenido un 95% de fiabilidad, no son leyes exactas.

De todo lo que se ha analizado, en primer lugar se han estudiado las métricas básicas del grafo de sistemas autónomos, de ellas se ha concluido que:

- El número de AS, enlaces y prefijos crecen de forma lineal. A finales del año 2003 el número de AS era 16456.
- El diámetro del grafo se mantiene constante entre 7 y 10 AS. Esto significa que para ir de una parte a otra de Internet tenemos que hacer los mismos saltos ahora que hace cinco años.
- El grado medio también crece y se sitúa en 4,3 enlaces.
- El coeficiente de clustering ha aumentado pero muy poco y se puede considerar que ha tenido una evolución constante.

Estas medidas son lógicas, que Internet crezca en número de AS y enlaces es lo más normal. El dato más importante es que el grado medio va creciendo y esto implica que los AS están cada vez más interconectados entre ellos.

En segundo lugar se ha analizado el TOP20 de los AS de toda Internet. De este estudio se han extraído los siguientes resultados:

- La mayoría de AS del TOP20 son de ARIN, entre ellos, los 10 primeros tanto en el 1999 como en el 2003.

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

- Los AS de ARIN son todos de Estados Unidos, mientras que los que hay de RIPE y APNIC están más repartidos entre varios países (Reino Unido, Alemania, Holanda, Japón, Corea del Sur, etc.)
- Los 5 primeros AS apenas han variado en los cinco años, son siempre los mismos que a lo sumo se intercambian las posiciones.
- En la evolución, RIPE va ganando cada vez más posiciones del TOP20, pero todavía está muy lejos de equilibrarse con ARIN
- La evolución de algunos AS es un poco engañosa porque pueden haberse fusionado con otros AS y sumar sus grados bajo el mismo número de AS, de ahí que algunos aparezcan y desaparezcan tan rápido.

Sobre estas conclusiones, quizá sorprende tanto dominio de Estados Unidos, se hubiera creído que habría más equilibrio entre Europa y América, pero se ha de pensar que la mayoría de las iniciativas y protocolos empiezan en Estados Unidos y allí es donde se desarrollan primero.

En tercer lugar se ha estudiado la repartición geográfica de los AS y los enlaces y se ha concluido que:

- La comparación por número de AS o por grado acumulado hace cambiar los resultados. Hay países que tienen más AS que otros, pero a su vez están menos interconectados.
- ARIN y Estados Unidos poseen un amplio porcentaje de los AS y sus relaciones, concretamente entorno al 50-60% de toda Internet les pertenece. El resto se lo reparte Europa (RIPE) con un 25-30% y Asia-Pacífico (APNIC) con un 10%.
- La evolución de estos porcentajes es constante para APNIC y LACNIC, sin embargo, ARIN va decreciendo y RIPE creciendo, aunque muy lentamente y la distancia todavía se conserva amplia.

CONCLUSIONES

- De entre los países, después de Estados Unidos los que más AS y grado tienen son Alemania, Rusia, Reino Unido, Corea del Sur, Japón, Canadá y Holanda.

Y de la comparativa entre España, Francia, Italia y Portugal se ha extraído los siguientes resultados:

- Portugal tiene un número de AS y grado muy inferior al de España, Francia e Italia.
- Francia e Italia tienen números parecidos, tanto en valores absolutos como en evolución.
- España está por detrás de Italia y Francia, sin embargo su evolución en el grado acumulado es mayor que la de estos dos países.
- España posee un porcentaje inferior de número de AS pero está más interconectada que Francia e Italia.

En cuarto lugar se ha estudiado la distribución por zonas de Internet, obteniendo las siguientes conclusiones:

- El reparto actual de los AS entre las zonas es: *Customers* 70%, *Regional ISP* 25% y *Core* 3%. Sin embargo estos datos han evolucionado desde hace cinco años, ya que en el 1999 había un 65% de *Customers* y un 10% de *Core*.
- El número de AS y enlaces dentro de cada grupo ha aumentado proporcionalmente en cada uno de ellos, no obstante, el grado medio se ha mantenido constante en *Customers* y *Regional ISP*, pero en el *Core* ha aumentado considerablemente. Esto significa que el *Core* se está interconectando más que los *Customers* y *Regional ISP*, que a su vez es lógico por la propia definición de las zonas, ya que los *Customers* y *Regional ISP* se dedican a proveerse de tráfico y servir a los clientes y el *Core* se dedica a interconectarse con todas las redes y hacer de unión entre AS.
- Las relaciones entre AS de *Customers* y *Regional ISP* son básicamente P2C, mientras que en el *Core* hay un 50% de P2C y otro 50% de PEER y SIB.

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

Por último, en quinto lugar se ha profundizado un poco en el estudio del *Core* para encontrar las siguientes conclusiones:

- El coeficiente de clustering del *Core* ha crecido durante los últimos 5 años, esto corrobora la tendencia a su interconexión progresiva.
- Los tipos de relaciones entre AS del *Core* tienen una evolución parecida, aunque el tipo que mayor crece es el PEER, seguido del P2C y del SIB. Esto se debe a la proliferación de los puntos neutros y de los AS que comparten tráfico en forma de *peering* con otros AS, que antes no se realizaba tanto.
- En el TOP20 AS del Core hay un mayor equilibrio entre AS de ARIN y RIPE, aunque sigue dominando ARIN, pero por menor diferencia que en el TOP20 AS de toda Internet.
- Los AS del TOP20 del Core se encuentran casi siempre entre el TOP100 AS de toda Internet, aunque en diferente orden de importancia.

7.2. Conclusión global

Una vez repasados todos los estudios, podríamos extraer la siguiente conclusión final:

Internet no para de crecer tanto a lo ancho (número de AS) como en densidad (número de enlaces), sin embargo, el crecimiento de la interconexión es diferente según la zona. Existe un núcleo de AS dentro de Internet (el *Core*) que se interconecta más deprisa que el resto de AS, que son clientes de este núcleo.

Estados Unidos posee el 50% de toda Internet y le siguen Europa con un 30% y Asia-Pacífico con un 10%, aunque estas diferencias se van estrechando lentamente porque Europa recorta porcentaje a Estados Unidos cada año. No obstante, en el *Core* de Internet la repartición esta más equilibrada entre Europa y Estados Unidos.

CONCLUSIONES

Por otra parte, como conclusiones paralelas se ha observado la importancia que tienen proyectos como el de RouteViews, que almacenando los datos históricos de las tablas BGP permite que en el futuro (en este caso, en el presente) se pueda estudiar la evolución de muchas métricas y parámetros de Internet. También es muy importante la labor de los IRRs, que construyen las bases de datos de AS y las ofrecen públicamente.

Una vez llegados a este punto, se ha de evaluar si se han cumplido los objetivos de este proyecto.

Teniendo en cuenta que los datos en los que se basa el estudio no son completos y que todo es una inferencia en base a estos datos, se puede decir que se ha cumplido el objetivo de hacer una visión general a la evolución de la topología de Internet en los últimos cinco años.

El estudio realizado es horizontal en el sentido en que no se ha profundizado mucho en ninguno de los cinco estudios que se han realizado, sino que se ha hecho un análisis de los puntos más importantes para ver la evolución en líneas generales.

Tampoco se ha hecho un análisis muy matemático ni estadístico de los datos porque en los objetivos no estaba el conseguir unas leyes o fórmulas que nos permitiesen calcular la evolución futura de las métricas sino que únicamente nos fijamos en la evolución pasada.

Finalmente, en este proyecto hemos estudiado la evolución de la topología de Internet usando las tablas BGP, pero solo ha sido el paso inicial en el desarrollo e investigación de la evolución de Internet. Todos los estudios que se han realizado han sido la entrada hacia investigaciones más profundas sobre cada aspecto y métrica de Internet. Este campo es una puerta siempre abierta y con mucho que conocer y explorar en el futuro.

7.3. Alternativas

En este estudio, las alternativas de diseño que se podrían haber realizado en lugar de la opción escogida se pueden dividir en 3 tipos:

- Alternativas en las fuentes de datos. En el estudio se ha usado únicamente una tabla BGP de *RouteViews* pero como ya se ha dicho no se tiene una visión completa de Internet. Para enriquecer estos datos, se puede utilizar medidas activas o bien usar un método combinado de medidas activas y pasivas para conseguir un mayor número de caminos y AS. Utilizando medidas pasivas, se podría haber cogido más tablas BGP de otros AS o proyectos parecidos al de *RouteViews* y fusionarlas todas.
- Alternativas en las heurísticas utilizadas para inferir las relaciones entre AS (PEER, P2C, C2P, SIB) o bien para las zonas de Internet (Customers, Regional ISP, Core). En el estudio se han usado las de *Lixin Gao* y *Sharad Agarwal* (y otros) por su alta fiabilidad, pero se podrían haber utilizado otras o intentar inventar de nuevas.
- Alternativas en las métricas escogidas. En el estudio se han analizado los parámetros clásicos de grafos (número de nodos, enlaces, coeficiente de clustering, etc.) y otros más propios de redes (relaciones entre AS, clasificación por IRR, etc.), pero se podrían haber buscado otro tipo de métricas que pudieran extraer más información de las tablas BGP. Quizá métricas más específicas de redes que no son tan fáciles de descubrir pensando en un grafo.

En cualquier caso, estas alternativas no harían cambiar mucho el estudio, dado que la metodología se conserva y el enfoque temporal sería el mismo, pero aplicado a otras métricas, usando otras heurísticas o teniendo unos datos más completos.

7.4. Trabajos futuros

Como se ha dicho, este proyecto es el principio de una investigación más completa sobre la evolución de Internet, pero algunos de los trabajos que se podrían realizar a continuación de este estudio podrían ser:

- Calcular matemáticamente la pendiente de la evolución de las métricas y encontrar fórmulas que permitan predecir el comportamiento futuro de cada aspecto del grafo de AS.
- Automatizar el sistema de scripts para que se ejecuten cada X tiempo en el futuro y extraigan los datos para su análisis. A continuación construir una herramienta de visionado e interpretación de resultados que permita consultar la evolución y el estado actual en tiempo real del grafo de AS de Internet.
- Estudiar las causas económicas, sociales y políticas del comportamiento de la red. Como afectan estos factores al crecimiento del número de AS o a la creación de relaciones entre ellos.
- Estudiar como ha influido (si es que ha influido) la aparición de los puntos neutros en el grafo de AS.
- Detallar más el estudio del *Core*. Existen heurísticas que dividen el *Core* en varios niveles más internos. Se pueden aplicar los mismos estudios aquí realizados para cada uno de estos niveles.
- Investigar si una métrica básica puede ser parámetro de separación entre *Customers*, *Regional ISP* y *Core* mediante una heurística matemática. Partiendo de la herramienta matemática METIS que hace particiones de grafos, intentar comprobar si existe algún parámetro que sirva para particionar un grafo de AS en las tres zonas de Internet.

Capítulo

8

COSTE Y

PLANIFICACIÓN

8.1. Planificación y Recursos Humanos

El desarrollo de este proyecto se ha dividido en 5 grandes fases con varias etapas cada una. Son las siguientes:

1. Definición del proyecto
 - a. Organización Inicial
 - b. Definición del trabajo a realizar y los objetivos
 - c. Identificación de necesidades de infraestructura
 - d. Planificación
 - e. Trámites administrativos

2. Documentación y recopilación de información
 - a. Estudio de los conceptos básicos (BGP, AS, etc.)
 - b. Lectura de estudios previos sobre el tema
 - c. Creación del entorno de desarrollo
 - d. Aprendizaje y pruebas del lenguaje *Perl*
 - e. Definición de la metodología

3. Desarrollo y ejecución de *scripts*
 - a. Diseño de *scripts* para cada estudio
 - b. Desarrollo de *scripts*
 - c. Pruebas
 - d. Depuración
 - e. Desarrollo del entorno automático de ejecución
 - f. Ejecución masiva de *scripts*
 - g. Obtención de resultados

4. Recopilación y análisis de los resultados
 - a. Primer análisis de los resultados
 - b. Desarrollo y ejecución de *scripts* complementarios
 - c. Comparación de resultados
 - d. Creación de gráficas
 - e. Interpretación de los resultados
 - f. Primeras conclusiones

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

5. Conclusiones y documentación
 - a. Estudio final de los resultados obtenidos
 - b. Redacción de la memoria
 - c. Revisión y aprobación del proyecto
 - d. Últimos detalles

Para completarlas se necesita un equipo de personas con los diferentes perfiles:

Acrónimo	Perfil	Precio por hora
DP	Director de proyecto	30 € / hora
JP	Jefe de proyecto	25 € / hora
AN	Analista	20 € / hora
PR	Programador	15 € / hora

Tabla 24 Perfiles y precios por hora

Los precios no son necesariamente ajustados, se ha pensado en los salarios del mercado actual y el tipo de estudio y entorno para calcular un valor aproximado.

La dedicación de cada perfil en cada una de las fases se ha contabilizado por horas, y en la siguiente tabla se recoge la asignación de recursos y coste para cada una de las etapas:

Fase/Tarea	Horas	Perfil	Coste
1. Definición del proyecto	48		1263 €
Organización inicial	8	DP 50% JP 50%	220
Definición del trabajo a realizar y los objetivos	16	DP 70% JP 30%	456
Identificación de necesidades de infraestructura	10	JP 60% AN 40%	230
Planificación	10	DP 20% JP 70% AN 10%	255
Trámites administrativos	4	DP 10% JP 90%	102
2. Documentación y recopilación de información	178		3814 €
Estudio de los conceptos básicos (BGP, AS, etc.)	48	DP 20% JP 70% AN 10%	1224
Lectura de estudios previos sobre el tema	30	DP 20% JP 20% AN 60%	690
Creación del entorno de desarrollo	20	DP 20% AN 30% PR 50%	470
Aprendizaje y pruebas del lenguaje <i>Perl</i>	60	AN 20% PR 80%	960
Definición de la metodología	20	DP 20% JP 30% AN 50%	470

COSTE Y PLANIFICACIÓN

Fase/Tarea	Horas	Perfil	Coste
3. Desarrollo y ejecución de los scripts	157		2492 €
Diseño de <i>scripts</i> para cada estudio	25	JP 10% AN 60% PR 30%	475
Desarrollo de <i>scripts</i>	40	PR 100%	600
Pruebas	12	AN 20% PR 80%	192
Depuración	20	PR 100%	300
Desarrollo del entorno automático de ejecución	20	PR 100%	300
Ejecución masiva de <i>scripts</i>	30	PR 100%	450
Obtención de resultados	10	AN 50% PR 50%	175
4. Recopilación y análisis de los resultados	67		1377 €
Primer análisis de los resultados	20	JP 40% AN 60%	440
Desarrollo y ejecución de <i>scripts</i> complementarios	10	AN 20% PR 80%	160
Comparación de resultados	5	JP 40% AN 60%	110
Creación de gráficas	15	JP 10% AN 90%	307,5
Interpretación de resultados	12	JP 20% AN 80%	252
Primeras conclusiones	5	JP 30% AN 70%	107,5
5. Conclusiones y documentación	240		5185 €
Estudio final de los resultados obtenidos	20	JP 60% AN 40%	460
Redacción de la memoria	200	JP 20% AN 80%	4200
Revisión y aprobación del proyecto	10	DP 20% JP 80%	260
Últimos detalles	10	DP 30% JP 70%	265
Total	690		14131 €

Tabla 25 Planificación de horas y costes por perfil

Este coste es orientativo, dado que este tipo de estudios no son viables en entornos empresariales y lo más probable es que de realizarse este proyecto sería en entornos universitarios o de investigación. En este caso no se deberían contabilizar las horas de esta manera.

8.2. Coste de Hardware y Software

El proyecto se ha basado en la ejecución de *scripts* y en su análisis posterior. Estos *scripts* se ejecutan sobre máquinas de prestaciones superiores a las de los ordenadores personales.

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

Necesitan un (o varios) procesadores potentes y una gran cantidad de memoria RAM, además de una resistencia al cálculo intenso durante días.

Sin embargo, se supone que toda empresa mediana o grande y cualquier centro de investigación posee al menos una de estas máquinas y por esta razón su coste es 0 €.

Los *scripts* están programados en *Perl* y se ejecutan sobre cualquier Sistema Operativo que lo soporte. En nuestro caso se ha usado LINUX, que al ser un Sistema Operativo gratuito de libre distribución, no implica ningún coste.

El resto de herramientas utilizadas para analizar datos y edita resultados también son de libre distribución, por tanto el coste hardware y software es 0.

8.3. Coste General del proyecto

El coste final del proyecto es el siguiente:

Concepto	Coste
Recursos Humanos	14131 €
Hardware y Software	0 €
Gastos funcionales	30 €
Total	14161 €

Tabla 26 Coste general del proyecto

Los gastos funcionales son las impresiones, encuadernaciones y otros gastos derivados de la realización del proyecto.

8.4. Ejecución de la planificación

La planificación se ha cumplido en aproximadamente 10 meses, los 5 primeros con muy pocas horas a la semana, apenas

COSTE Y PLANIFICACIÓN

lo suficiente para completar la primera fase, y los 5 siguientes a tiempo prácticamente completo. La distribución del tiempo por cada etapa ha sido la siguiente:

F	E	Abr-Ago	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero
1	a						
	b						
	c						
	d						
	e						
2	a						
	b						
	c						
	d						
	e						
3	a						
	b						
	c						
	d						
	e						
	f						
	g						
4	a						
	b						
	c						
	d						
	e						
	f						
5	a						
	b						
	c						
	d						

Tabla 27 Ejecución de la planificación

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

La primera fila de la tabla indica las horas dedicadas cada semana de cada mes, con la siguiente correspondencia de colores:

Horas a la semana	Color
10 horas	Verde
20 horas	Amarillo
30 horas	Naranja
40 horas	Azul
50 horas	Negro

Tabla 28 Leyenda dedicación semanal

Capítulo

9

GLOSARIO

A continuación se indica el significado de muchas siglas que han aparecido en esta memoria. Además también hay algunas definiciones breves de conceptos básicos.

ACK	ACKnowledge, mensaje de confirmación.
APNIC	Asia Pacific Network Information Center
ARIN	American Registry for Internet Number
AS	Autonomous System
AT&T	Corporación de servicios de comunicación
BGP	Border Gateway Protocol
Backbone	Línea principal de alta calidad de una red por donde se transmiten datos.
Bridge	Conmutador de paquetes a nivel enlace de 2 puertos.
Broadcast	Envío de datos a todos los <i>hosts</i> de una red.
CAIDA	Cooperative Association for Internet Data Analysis
CatNIX	Catalunya Neutral Internet eXchange
CESCA	Centre de Supercomputació de Catalunya
CIDR	Classless Inter-Domain Routing
Cisco	Empresa fabricante de dispositivos de routing.
Core	Grupo de sistemas autónomos que forman la zona más interna de Internet.
Customers	Grupo de sistemas autónomos que forma la zona más externa de Internet.
Default Gateway	Puerto por defecto
DV	Distance Vector
Enlace entre AS	Relación de interconexión entre dos AS
EGP	External Gateway Protocol
ESPANIX	España Neutral Internet eXchange
FTP	File Transfer Protocol
Host	Máquina de un usuario final de la red (que no sea un dispositivo intermedio).
Hop	Salto, paso por un nodo en un camino.
IANA	Internet Assigned Numbers Authority
ICMP	Internet Control Message Protocol

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

IGP	Internet Gateway Protocol
InterNIC	Internet Network Information Center
IP	Internet Protocol
IPv6	Internet Protocol version 6
IRR	Internet Routing Registry
ISP	Internet Service Provider
LACNIC	Latin American and Caribbean Region Internet Addresses Registry
LAN	Local Area Network
Linx	London INternet eXchange
LIR	Local Internet Registry
LS	Link State
LSP	Link State Protocol
MAC	Media Access Control
MTU	Maximum Transmission Unit
OSI	Open System Interconnection
OSPF	Open Shortest Path First
P2P	Peer to Peer
Perl	Lenguaje de programación interpretado muy útil para tratamiento de <i>strings</i> y ficheros.
Prefijo (de red)	Representación numérica de una red.
<i>Regional ISP</i>	Grupo de sistemas autónomos que forma la zona intermedia de Internet.
RFC	Request For Comments
RIB	Routing Information Base
RIP	Routing Information Protocol
RIPE	Réseaux IP Européens
Router	Dispositivo conmutador de paquetes que opera a nivel red. Interconecta varias redes.
RR	Routing Registry
Subnetting	División de una red en varias ampliando el identificador de red de la dirección.
Switch	Conmutador de paquetes a nivel enlace de N puertos.
Timeout	Temporizador en espera de respuesta.
TCP	Transmission Control Protocol
WAN	Wide Area Network

Capítulo

10

REFERENCIAS

- [1] Laskshminarayanan Subramanian, Sharad Agarwal, Jennifer Rexford, Randy H. Katz. *Characterizing the Internet Hierarchy from multiple Vantage Points*.
- [2] Damien Magoni, Jeaj Jacques Pansiot. *Analysis of the Autonomous System Network Topology*.
- [3] H. Chang, R.Govindam, S.Jamin, S.Shenker and W. Willinger, *On inferring AS-level connectivity from BGP routing tables*
- [4] Danica Vukadinovic, Polly Huang, Thomas Erlebach *A Spectral Analysis of the Internet Topology*
- [5] Andre Broido, Evi Nemeth, Kc Claffy *Internet Expansion, Refinement and Churn*
- [6] José M^a Barceló. *BGP-4: Border Gateway Protocol*, apuntes del protocolo BGP4
- [7] Alexei Vazquez, Romualdo Pastor-Satorras, Alessandro Vespignani. *Internet topology at the router and autonomous system level*
- [8] John W. Stewart. *BP4: Inter-Domain Routing in the Internet*. (1998) Addison-Wesley
- [9] Lixin Gao *On inferring Autonomous System relationships in the Internet*.
- [10] Baker, F (1995) *Requirements for IP Version 4 Routers*, RFC 1812
- [11] Traina, P (1995) *Experience with the BGP-4 protocol*, RFC 1773
- [12] Rekhter, Y; Gross, P; (1995) *Application of the BGP in the Internet*, RFC 1772
- [13] Hubbard, K; Koster, M; Conrad, D; Karrenberg, D; Postel, J; (1996) *Internet Registry IP Allocation Guide*, RFC 2050
- [14] Hawkinson, J; Bates, T (1996) *Guidelines for creation, selection, and registration of an Autonomous System (AS)*, RFC 1930
- [15] Bates, T; Gerigh, E; Joncheray, L and others. *Representation of IP routing policies*
- [16] R. Govidan and A. Reddy. *An analysis of internet inter-domain topology and route stability*

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

- [17] University of Oregon RouteViews project, <http://www.routeviews.org>
- [18] CAIDA Website, <http://www.caida.org>
- [19] IETF Website, <http://www.ietf.org>
- [20] CISCO Internet Protocol Journal, <http://www.cisco.com/ipj>
- [21] ARIN, <http://www.arin.net>
- [22] RIPE, <http://www.ripe.net>
- [23] APNIC, <http://www.apnic.net>
- [24] LACNIC, <http://www.lacnic.net>

Capítulo

11

ANEXOS

11.1. Participantes en el proyecto *RouteViews*

Estos son los sistemas autónomos participantes en el proyecto *RouteViews* de la Universidad de Oregon.

Nombre AS	Localización	Número AS
Abilene	Indiana	11537
Accretive	PAO	11608
Accretive	SEA	11608
AOL	NoVa	1668
APAN/tppr-tokyo	ORD	7660
Army Research Laboratory		13
ATT/Canada	CA	7018
ATT/Canada	east	15290
ATT/Canada	west	15290
Blackrose.org	Ann Arbor	234
Broadwing	ADDS	6395
Broadwing	MaeEast	6395
Broadwing	MaeWest	6395
C&W	San Jose	3561
CA*net3		6509
Carrier1	AMS	8918
COMindico	AU	9942
Digex	VA	2548
ELI	MAE-EAST	5650
ELI	MAE-WEST	5650
Epoch	PAO	4565
Esnet	GA	293
France Telecom Backbone	NYC	5511
Global Crossing	SEA	3549
GLOBIX	LINX	4513
GLOBIX	New York	4513
GLOBIX	ORD	4513
GLOBIX	PAO	4513
GT Group Telecom Service	ORD	6539
Hurricane Electric	DCA	6539
Hurricane Electric	PAO	6539
IJJ	Japan	2497
IP-PLUS	ZRH	3303
Jippii	ESPANIX	8782
KPNE	AMSIX	286

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

Level3	DEN	3356
LINX	London	5459
LINX	London	5459
M-Root	Japan	7500
MFN	PAO	6461
MFS/MAE-Lab	SJC	6066
MSN	PAO	8075
NCSA	MDW	1224
Net Access	NYC	8001
Nether.net	Ann Arbor	267
netINS	DSM	5056
Netrail	ORD	4006
Port80	STO	16150
RCN	DCA	6079
RCN	PAO	6079
RIPE NCC	Amsterdam	3333
RUSnet	MOW	3277
Sprint	Stockton	1239
Sprint/Canada	YYZ	2493
STARTAP		10764
TDC	NYC	3292
TDS Telecom	MSN	4181
TDS Telecom	MSN	4181
Telefonica	NewYork/GRTNYCCC2	12956
Teleglobe	PAIX	6453
Telia	NYC	1299
Telstra	Sydney	1221
Telus	Calgary	852
Telus	Toronto	852
The University of Waikato	AKL	681
Tiscali	PAR	3257
TouchAmerica	PDX	19092
UONet	Oregon	3582
UUNet	Africa	2905
Verio	CA	2914
Verio	VA	2914
WCICable	Hillsboro OR	14608
Williams	PAO	7911
Williams	SFO	7911
XO	SJC	2828

Tabla 29 Participantes en el proyecto RouteViews

11.2. Números de AS sin datos

Durante la construcción de la base de datos de AS, ha habido un grupo de AS de los cuales no se ha podido encontrar información alguna y sólo sabemos de ellos su número.

1451	1531	12854	26233	29615	30447	30527
1452	1533	12879	27720	29616	30455	30528
1453	1547	12988	27727	29618	30456	30530
1454	1551	13083	28111	29620	30457	30533
1455	1552	13107	28471	29621	30458	30534
1456	1556	13134	28472	29622	30459	30535
1458	1559	13228	29558	29623	30461	30540
1459	1562	15422	29560	29625	30462	30541
1460	1563	15464	29562	29626	30464	30544
1462	1564	15580	29563	29632	30465	30545
1463	1565	15590	29564	29636	30467	30546
1464	1569	15592	29565	29637	30471	30547
1466	1580	15674	29566	29638	30473	30548
1467	1583	15755	29567	29639	30475	30549
1468	1589	15832	29570	29640	30477	30551
1471	1590	16107	29572	29642	30479	30555
1472	1591	16234	29574	29643	30480	30563
1474	1597	16252	29580	29649	30482	30566
1475	1598	16327	29582	29650	30483	30571
1476	1600	20551	29583	29656	30486	30589
1477	1602	20813	29586	29660	30487	30596
1480	1637	21203	29587	29661	30489	30600
1482	1649	21304	29590	29663	30491	30601
1483	1708	21307	29591	29665	30492	30607
1484	1712	23743	29592	29668	30493	30615
1488	1715	23908	29593	29669	30495	30623
1489	1716	23909	29597	29670	30496	30630
1491	1720	23910	29598	29671	30497	30632
1494	1721	23911	29602	29675	30498	30724
1495	2047	23912	29603	29676	30500	30726
1498	12426	23916	29604	29680	30501	30732
1499	12544	23917	29605	29681	30511	30733
1503	12584	23918	29606	29683	30518	30745
1505	12601	23919	29607	29686	30519	64444
1507	12696	23920	29608	29691	30520	64512
1519	12733	23957	29609	30444	30521	64513
1521	12749	24650	29611	30445	30522	
1527	12751	25329	29612	30446	30525	

11.3. Evolución detallada del TOP20

A continuación se muestran los datos completos de la sección 6.2. Los TOP18 AS más importantes (con grado más alto) de toda Internet para las 20 tablas.

Las columnas de las tablas corresponden a la posición, la variación respecto a la tabla anterior (si está en la misma posición, ha bajado, ha subido o ha aparecido nuevo), la posición en la tabla anterior, el nombre del AS y su país.

Los países están con acrónimos y su correspondencia es la siguiente: US=Estados Unidos, CA=Canadá, JP=Japón, SE=Suecia, FI=Finlandia, DE=Alemania, UK=Reino Unido, KR=Corea del Sur, NL=Holanda, FR=Francia y CH=Suiza.

Nota: Se han puesto sólo 18 AS por tabla por cuestiones de formato. En el CD adjunto a esta memoria hay los TOP100 de cada tabla y muchos más detalles.

Marzo 1999		
1	UUNET Technologies	US
2	Cable & Wireless USA	US
3	Sprint	US
4	Allegiance Telecom Companies Worldwide	US
5	BBNPLANET	US
6	AT&T WorldNet Services	US
7	Veri	US
8	CERFnet	US
9	Energy Sciences Network (ESnet)	US
10	Teleglobe Inc	CA
11	SAVVIS Communications Corporation	US
12	UUNET EUROPE	US
13	Japan Network Information Center	JP
14	Ebone Consortium	SE
15	DoD Network Information Center	US
16	WINSTAR	US
17	European Unix Network	NL
18	Apex Global Information Service	US

Junio 1999				
1	=	(1)	UUNET Technologies	US
2	=	(2)	Cable & Wireless USA	US
3	=	(3)	Sprint	US
4	↑	(5)	BBNPLANET	US
5	↑	(6)	AT&T WorldNet Services	US
6	↓	(4)	Allegiance Telecom Companies Worldwide	US
7	=	(7)	Veri	US
8	↑	(10)	Teleglobe Inc	CA
9	=	(9)	Energy Sciences Network (ESnet)	US
10	↑		XO Communications	US
11	=	(11)	SAVVIS Communications Corporation	US
12	↓	(8)	CERFnet	US
13	↓	(12)	UUNET EUROPE	US
14	↓	(13)	Japan Network Information Center	JP
15	↓	(14)	Ebone Consortium	SE
16	↓	(15)	DoD Network Information Center	US
17	↓	(16)	WINSTAR	US
18	↑		Global Crossing	US

Septiembre 1999				
1	=	(1)	UUNET Technologies	US
2	=	(2)	Cable & Wireless USA	US
3	=	(3)	Sprint	US
4	=	(4)	BBNPLANET	US
5	=	(5)	AT&T WorldNet Services	US
6	=	(6)	Allegiance Telecom Companies Worldwide	US
7	=	(7)	Veri	US
8	=	(8)	Teleglobe Inc	CA
9	↓	(11)	SAVVIS Communications Corporation	US
10	↑	(20)	Qwest	US
11	↓	(9)	Energy Sciences Network (ESnet)	US
12	↓	(10)	XO Communications	US
13	↓	(12)	CERFnet	US
14	↓	(13)	UUNET EUROPE	JP
15	↓	(14)	Japan Network Information Center	US
16	↓	(18)	Global Crossing	US
17	=	(17)	WINSTAR	US
18	↓	(16)	DoD Network Information Center	US

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

Diciembre 1999				
1	=	(1)	UUNET Technologies	US
2	↑	(3)	Sprint	US
3	↓	(2)	Cable & Wireless USA	US
4	↑	(5)	AT&T WorldNet Services	US
5	↓	(4)	BBNPLANET	US
6	↑	(7)	Veri	US
7	↓	(6)	Allegiance Telecom Companies Worldwide	US
8	↑	(10)	Qwest	US
9	↓	(8)	Teleglobe Inc	CA
10	↓	(9)	SAVVIS Communications Corporation	US
11	=	(11)	Energy Sciences Network (ESnet)	US
12	↑	(13)	CERFnet	US
13	↓	(12)	XO Communications	US
14	↑	(16)	Global Crossing	US
15	↓	(14)	UUNET EUROPE	US
16	↑		Cable and Wireless UK	UK
17	↑	(20)	Abovenet Communication	US
18	↓	(15)	Japan Network Information Center	JP

Marzo 2000				
1	=	(1)	UUNET Technologies	US
2	=	(2)	Sprint	US
3	=	(3)	Cable & Wireless USA	US
4	=	(4)	AT&T WorldNet Services	US
5	=	(5)	BBNPLANET	US
6	↑	(8)	Qwest	US
7	=	(7)	Allegiance Telecom Companies Worldwide	US
8	↓	(6)	Veri	US
9	↑	(17)	Abovenet Communication	US
10	↓	(9)	Teleglobe Inc	CA
11	↓	(10)	SAVVIS Communications Corporation	US
12	↑	(14)	Global Crossing	US
13	↓	(12)	CERFnet	US
14	↑		Tiscali Entreprises Autonomous System	FR
15	↑	(16)	Cable and Wireless UK	UK
16	↓	(15)	UUNET EUROPE	US
17	↑		Level 3 Communication	US
18	↓	(13)	XO Communications	US

Junio 2000				
1	=	(1)	UUNET Technologies	US
2	=	(2)	Sprint	US
3	=	(3)	Cable & Wireless USA	US
4	=	(4)	AT&T WorldNet Services	US
5	=	(5)	BBNPLANET	US
6	=	(6)	Qwest	US
7	↑	(8)	Veri	US
8	↓	(7)	Allegiance Telecom Companies Worldwide	US
9	↑	(10)	Teleglobe Inc	CA
10	↑	(11)	SAVVIS Communications Corporation	US
11	↑	(12)	Global Crossing	US
12	↓	(9)	Abovenet Communication	US
13	↑	(17)	Level 3 Communication	US
14	=	(14)	Tiscali Entreprises Autonomous System	FR
15	↑	(16)	UUNET EUROPE	US
16	↓	(13)	CERFnet	US
17	↓	(15)	Cable and Wireless UK	UK
18	↑	(19)	Energy Sciences Network (ESnet)	US

Septiembre 2000				
1	=	(1)	UUNET Technologies	US
2	=	(2)	Sprint	US
3	=	(3)	Cable & Wireless USA	US
4	=	(4)	AT&T WorldNet Services	US
5	=	(5)	BBNPLANET	US
6	=	(6)	Qwest	US
7	↑	(12)	Abovenet Communication	US
8	↓	(7)	Veri	US
9	↓	(8)	Allegiance Telecom Companies Worldwide	US
10	↑	(11)	Global Crossing	US
11	↓	(10)	SAVVIS Communications Corporation	US
12	↑	(13)	Level 3 Communication	US
13	↓	(9)	Teleglobe Inc	CA
14	↑	(15)	UUNET EUROPE	US
15	↑		Level 3 Communications	UK
16	=	(16)	CERFnet	US
17	↑	(19)	XO Communications	UK
18	=	(18)	Energy Sciences Network (ESnet)	US

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

Diciembre 2000				
1	=	(1)	UUNET Technologies	US
2	=	(2)	Sprint	US
3	=	(3)	Cable & Wireless USA	US
4	=	(4)	AT&T WorldNet Services	US
5	=	(5)	BBNPLANET	US
6	=	(6)	Qwest	US
7	↑	(10)	Global Crossing	US
8	↓	(7)	Abovenet Communication	US
9	↓	(8)	Veri	US
10	↓	(9)	Allegiance Telecom Companies Worldwide	US
11	↑	(12)	Level 3 Communication	US
12	↑	(13)	Teleglobe Inc	CA
13	↓	(11)	SAVVIS Communications Corporation	US
14	=	(14)	UUNET EUROPE	US
15	=	(15)	Level 3 Communications	UK
16	↑	(17)	XO Communications	US
17	↑		PSINet Inc.	US
18	=	(18)	Energy Sciences Network (ESnet)	US

Marzo 2001				
1	=	(1)	UUNET Technologies	US
2	=	(2)	Sprint	US
3	↑	(4)	AT&T WorldNet Services	US
4	↓	(3)	Cable & Wireless USA	US
5	=	(5)	BBNPLANET	US
6	=	(6)	Qwest	US
7	=	(7)	Global Crossing	US
8	↑	(9)	Veri	US
9	↑	(10)	Allegiance Telecom Companies Worldwide	US
10	↑	(11)	Level 3 Communication	US
11	↑	(14)	UUNET EUROPE	US
12	↑	(13)	SAVVIS Communications Corporation	US
13	↓	(8)	Abovenet Communication	US
14	↓	(12)	Teleglobe Inc	CA
15	↑		Carrier1 Autonomous System	EU
16	↑	(15)	Level 3 Communications	UK
17	=	(17)	PSINet Inc.	US
18	↑		Cable & Wireless US	US

Junio 2001				
1	=	(1)	UUNET Technologies	US
2	=	(2)	Sprint	US
3	↑	(4)	AT&T WorldNet Services	US
4	↓	(3)	Cable & Wireless USA	US
5	↑	(6)	Qwest	US
6	↓	(5)	BBNPLANET	US
7	↑	(13)	Abovenet Communication	US
8	↑		Globix Corporation	US
9	↓	(8)	Veri	US
10	↓	(7)	Global Crossing	US
11	=	(11)	UUNET EUROPE	US
12	↓	(10)	Level 3 Communication	US
13	↑		Tiscali Intl Network	DE
14	↓	(12)	SAVVIS Communications Corporation	US
15	=	(15)	Carrier1 Autonomous System	EU
16	↓	(14)	Teleglobe Inc	CA
17	↓	(9)	Allegiance Telecom Companies Worldwide	US
18	↓	(16)	Level 3 Communications	UK
19	↓	(17)	PSINet Inc.	US
20	↑		Korea Internet Exchange for '96 World	KR

Septiembre 2001				
1	=	(1)	UUNET Technologies	US
2	=	(2)	Sprint	US
3	=	(3)	AT&T WorldNet Services	US
4	=	(4)	Cable & Wireless USA	US
5	=	(5)	Qwest	US
6	=	(6)	BBNPLANET	US
7	=	(7)	Abovenet Communication	US
8	=	(8)	Globix Corporation	US
9	↑	(10)	Global Crossing	US
10	↓	(9)	Veri	US
11	=	(11)	UUNET EUROPE	US
12	=	(12)	Level 3 Communication	US
13	=	(13)	Tiscali Intl Network	DE
14	=	(14)	SAVVIS Communications Corporation	US
15	=	(15)	Carrier1 Autonomous System	EU
16	↑	(18)	Level 3 Communications	UK
17	↓	(16)	Teleglobe Inc	CA
18	↓	(17)	Allegiance Telecom Companies Worldwide	US

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

Diciembre 2001				
1	=	(1)	UUNET Technologies	US
2	=	(2)	Sprint	US
3	=	(3)	AT&T WorldNet Services	US
4	=	(4)	Cable & Wireless USA	US
5	=	(5)	Qwest	US
6	↑	(11)	UUNET EUROPE	US
7	↓	(6)	BBNPLANET	US
8	↓	(7)	Abovenet Communication	US
9	=	(9)	Global Crossing	US
10	=	(10)	Veri	US
11	↑	(12)	Level 3 Communication	US
12	↑	(13)	Tiscali Intl Network	DE
13	↑	(14)	SAVVIS Communications Corporation	US
14	↑	(15)	Carrier1 Autonomous System	EU
15	↑	(16)	Level 3 Communications	UK
16	↑	(17)	Teleglobe Inc	CA
17	↑	(19)	BCE Teleglobe Canada Inc.	EU
18	↑		Korea Internet Exchange for "96 World	KR

Marzo 2002				
1	=	(1)	UUNET Technologies	US
2	=	(2)	Sprint	US
3	=	(3)	AT&T WorldNet Services	US
4	=	(4)	Cable & Wireless USA	US
5	=	(5)	Qwest	US
6	=	(6)	UUNET EUROPE	US
7	↑	(8)	Abovenet Communication	US
8	↓	(7)	BBNPLANET	US
9	=	(9)	Global Crossing	US
10	↑		Globix Corporation	US
11	↓	(10)	Veri	US
12	=	(12)	Tiscali Intl Network	DE
13	↓	(11)	Level 3 Communication	US
14	↓	(13)	SAVVIS Communications Corporation	US
15	=	(15)	Level 3 Communications	UK
16	↓	(14)	Carrier1 Autonomous System	EU
17	↓	(16)	Teleglobe Inc	CA
18	↓	(17)	BCE Teleglobe Canada Inc.	EU

Junio 2002				
1	=	(1)	UUNET Technologies	US
2	=	(2)	Sprint	US
3	=	(3)	AT&T WorldNet Services	US
4	↑	(5)	Qwest	US
5	↓	(4)	Cable & Wireless USA	US
6	=	(6)	UUNET EUROPE	US
7	=	(7)	Abovenet Communication	US
8	=	(8)	BBNPLANET	US
9	=	(9)	Global Crossing	US
10	↑	(11)	Veri	US
11	↓	(10)	Globix Corporation	US
12	=	(12)	Tiscali Intl Network	DE
13	=	(13)	Level 3 Communication	US
14	↑		European Unix Network	NL
15	↓	(14)	SAVVIS Communications Corporation	US
16	↓	(15)	Level 3 Communications	UK
17	↑	(18)	BCE Teleglobe Canada Inc.	EU
18	↓	(17)	Teleglobe Inc	CA

Septiembre 2002				
1	=	(1)	UUNET Technologies	US
2	=	(2)	Sprint	US
3	=	(3)	AT&T WorldNet Services	US
4	=	(4)	Qwest	US
5	=	(5)	Cable & Wireless USA	US
6	↓	(8)	BBNPLANET	US
7	↓	(6)	UUNET EUROPE	US
8	↑	(9)	Global Crossing	US
9	↓	(7)	Abovenet Communication	US
10	=	(10)	Veri	US
11	↑	(13)	Level 3 Communication	US
12	↓	(11)	Globix Corporation	US
13	↓	(12)	Tiscali Intl Network	DE
14	↑	(15)	SAVVIS Communications Corporation	US
15	↑		Allegiance Telecom Companies Worldwide	US
16	↑	(19)	Time Warner Communication	US
17	↑		Telia Corporate Network	SE
18	↑	(20)	Japan Network Information Center	JP

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

Diciembre 2002				
1	=	(1)	UUNET Technologies	US
2	=	(2)	Sprint	US
3	=	(3)	AT&T WorldNet Services	US
4	=	(4)	Qwest	US
5	=	(5)	Cable & Wireless USA	US
6	=	(6)	BBNPLANET	US
7	=	(7)	Global Crossing	US
8	=	(8)	UUNET EUROPE	US
9	↑	(10)	Veri	US
10	↑	(11)	Level 3 Communication	US
11	↓	(9)	Abovenet Communication	US
12	=	(12)	Globix Corporation	US
13	=	(13)	Tiscali Intl Network	DE
14	=	(14)	SAVVIS Communications Corporation	US
15	↑	(16)	Time Warner Communication	US
16	↑	(17)	Telia Corporate Network	SE
17	↑	(18)	Japan Network Information Center	JP
18	↑	(19)	Broadwing Communications Service	US

Marzo 2003				
1	=	(1)	UUNET Technologies	US
2	=	(2)	Sprint	US
3	=	(3)	AT&T WorldNet Services	US
4	=	(4)	Qwest	US
5	=	(5)	Cable & Wireless USA	US
6	=	(6)	BBNPLANET	US
7	=	(7)	Global Crossing	US
8	=	(8)	UUNET EUROPE	US
9	↑	(10)	Level 3 Communication	US
10	↓	(9)	Veri	US
11	=	(11)	Abovenet Communication	US
12	=	(12)	Globix Corporation	US
13	↑	(15)	Time Warner Communication	US
14	↓	(13)	Tiscali Intl Network	DE
15	↓	(14)	SAVVIS Communications orporation	US
16	↑		Korea Internet Echange for "96 World	KR
17	↑		DACOM Corporation	KR
18	↑		Cogent Communications	US

ANEXOS

Junio 2003				
1	=	(1)	UUNET Technologies	US
2	=	(2)	Sprint	US
3	=	(3)	AT&T WorldNet Services	US
4	↑	(5)	Cable & Wireless USA	US
5	↑	(6)	BBNPLANET	US
6	↓	(4)	Qwest	US
7	↑	(9)	Level 3 Communication	US
8	↓	(7)	Global Crossing	US
9	↓	(8)	UUNET EUROPE	US
10	=	(10)	Veri	US
11	=	(11)	Abovenet Communication	US
12	=	(12)	Globix Corporation	US
13	=	(13)	Time Warner Communication	US
14	=	(14)	Tiscali Intl Network	DE
15	↑	(18)	Cogent Communications	US
16	↑		COLT Telecommunications	UK
17	↓	(15)	SAVVIS Communications Corporation	US
18	↓	(16)	Korea Internet Exchange for '96 World	KR

Septiembre 2003				
1	=	(1)	UUNET Technologies	US
2	=	(2)	Sprint	US
3	=	(3)	AT&T WorldNet Services	US
4	↑	(7)	Level 3 Communication	US
5	↑	(6)	Qwest	US
6	↓	(4)	Cable & Wireless USA	US
7	↑	(8)	Global Crossing	US
8	↓	(10)	Veri	US
9	=	(9)	UUNET EUROPE	US
10	↑	(11)	Abovenet Communication	US
11	↑	(12)	Globix Corporation	US
12	↑	(13)	Time Warner Communication	US
13	↑	(15)	Cogent Communications	US
14	↑	(16)	COLT Telecommunications	UK
15	↑	(20)	SBC Internet Services	US
16	↓	(14)	Tiscali Intl Network	DE
17	↓	(5)	BBNPLANET	US
18	↓	(17)	SAVVIS Communications Corporation	US

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

Diciembre 2003				
1	=	(1)	UUNET Technologies	US
2	=	(2)	Sprint	US
3	=	(3)	AT&T WorldNet Services	US
4	↑	(5)	Qwest	US
5	↓	(4)	Level 3 Communication	US
6	=	(6)	Cable & Wireless USA	US
7	↑	(9)	Global Crossing	US
8	=	(8)	Veri	US
9	↑	(10)	Abovenet Communication	US
10	↓	(9)	UUNET EUROPE	US
11	=	(11)	Globix Corporation	US
12	↓	(14)	COLT Telecommunications	UK
13	↑	(15)	SBC Internet Services - Southwest	US
14	↓	(12)	Time Warner Communication	US
15	↑		Swisscom Enterprise Solutions Ltd	CH
16	↓	(13)	Cogent Communications	US
17	↑		Song Networks	FI
18	↑	(19)	DACOM Corporation	KR

11.4. Contenido del CD

En el CD adjunto a esta memoria se han incluido tres tipos de materiales:

- Los *scripts* utilizados en todo el estudio. Están ordenados por el tipo de tarea que desarrollan listos para ser usados.
- Las 20 tablas BGP utilizadas como fuente de datos para el estudio. Están comprimidas ya que su tamaño es muy grande y no cabrían todas en 1 solo CD (de hecho, sólo cabría una).
- Los archivos de resultados completos. De todos los estudios en esta memoria sólo aparecen una parte de ellos en las tablas y en las gráficas. En el CD se encuentra todo lo que se ha obtenido.

Para cada uno de estos apartados hay ficheros de ayuda en el propio CD especificando que es o para que sirve cada archivo o directorio.

Capítulo

12

ÍNDICE DE

FIGURAS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Representación de un AS	20
Figura 2 Interconexión entre 2 AS	21
Figura 3 Formato de las tablas BGP	23
Figura 4 Esquema del proceso de análisis de una tabla.....	24
Figura 5 Esquema de proceso de N tablas.....	25
Figura 6 Arquitectura de interconexión de redes.....	29
Figura 7 Estructura de capas del Modelo OSI.....	32
Figura 8 Correspondencia entre el Modelo OSI y TCP/IP.....	33
Figura 9 Estructura de una dirección IP.....	34
Figura 11 Tabla de encaminamiento IP	39
Figura 12 Protocolos de encaminamiento exteriores e interiores	42
Figura 13 Redes y AS interconectados por BGP	50
Figura 14 Tipos de relaciones entre AS.....	52
Figura 15 Backbone de la red académica catalana	54
Figura 16 Representación de las zonas de Internet.....	56
Figura 17 Representación de las zonas de Internet.....	71

Capítulo

13

ÍNDICE DE

TABLAS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 IRRs de Internet	51
Tabla 2 Evolución del número de AS, enlaces y prefijos	82
Tabla 3 Evolución del diámetro, grado máximo y grado medio ..	86
Tabla 4 TOP20 AS en Marzo de 1999	90
Tabla 5 TOP20 AS en Diciembre de 2003.....	91
Tabla 6 Evolución del TOP20 AS	93
Tabla 7 Clasificación por IRRs en Marzo de 1999	94
Tabla 8 Clasificación por IRR en Diciembre de 2003.....	94
Tabla 9 Evolución del porcentaje por número de AS de los IRRs	96
Tabla 10 Evolución del porcentaje por grado acumulado de los IRRs	97
Tabla 11 Clasificación por porcentaje por número de AS de los países	99
Tabla 12 Clasificación por porcentaje por grado acumulado de los países	99
Tabla 13 Evolución del porcentaje por número de AS por países	100
Tabla 14 Evolución del porcentaje por grado acumulado por países	102
Tabla 15 Evolución de número de AS y grado acumulado de España, Francia, Italia y Portugal.....	104
Tabla 16 Evolución del número de AS en las zonas de Internet	107
Tabla 17 Evolución del número de enlaces de las zonas de Internet	109
Tabla 18 Evolución del grado medio de las zonas de Internet..	111
Tabla 19 Número de relaciones entre AS de las zonas de Internet	113
Tabla 20 Evolución del coeficiente de clustering del Core.....	114
Tabla 21 Evolución de los tipos de relaciones de AS en el Core	116
Tabla 22 Clasificación del TOP20 AS del Core de Marzo de 1999	118
Tabla 23 Clasificación del TOP20 AS del Core de Diciembre de 2003	118
Tabla 24 Perfiles y precios por hora	134
Tabla 25 Planificación de horas y costes por perfil	135

Estudio de la evolución de Internet a partir de tablas BGP

Tabla 26 Coste general del proyecto.....	136
Tabla 27 Ejecución de la planificación	137
Tabla 28 Leyenda dedicación semanal	138
Tabla 29 Participantes en el proyecto RouteViews.....	150

Capítulo

14

ÍNDICE DE

GRÁFICAS

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Evolución del número de AS	83
Gráfica 2 Evolución del número de enlaces	84
Gráfica 3 Evolución del número de prefijos	85
Gráfica 4 Evolución del diámetro del grafo de AS	86
Gráfica 5 Evolución del grado máximo	87
Gráfica 6 Evolución del grado medio	88
Gráfica 7 Evolución del coeficiente de clustering del grafo de AS	89
Gráfica 8 Evolución del coeficiente de clustering del grafo de AS	89
Gráfica 9 Evolución del porcentaje de AS de los IRRs	96
Gráfica 10 Evolución del porcentaje por grado acumulado de los IRRs	98
Gráfica 11 Evolución de la clasificación por porcentaje de número de AS de los países	101
Gráfica 12 Evolución de la clasificación por porcentaje de grado acumulado de los países	103
Gráfica 13 Evolución del número de AS de España, Francia, Italia y Portugal	105
Gráfica 14 Evolución del grado acumulado de España, Francia, Italia y Portugal	105
Gráfica 15 Evolución del número de AS de las zonas de Internet	107
Gráfica 16 Evolución del porcentaje de número de AS por zonas de Internet	108
Gráfica 17 Evolución del número de enlaces de las zonas de Internet	109
Gráfica 18 Evolución del porcentaje de número de enlaces de las zonas de Internet	110
Gráfica 19 Evolución del grado medio de las zonas de Internet	112
Gráfica 20 Evolución del coeficiente de clustering del Core	115
Gráfica 21 Evolución de los tipos de relaciones de AS en el Core	116

Capítulo

15

ÍNDICE DE

ALGORITMOS

ÍNDICE DE ALGORITMOS

Algoritmo 1 Construcción de la matriz de adyacencias del grafo de AS.....	64
Algoritmo 2 Eliminar los caminos hinchados de la tabla BGP.....	65
Algoritmo 3 Cálculo del grado de una tabla BGP	65
Algoritmo 4 Paso 1 de inferencia de las relaciones entre AS	67
Algoritmo 5 Paso 2 de inferencia de las relaciones entre AS	68
Algoritmo 6 Cálculo de las relaciones PEER.....	69
Algoritmo 7 Cálculo del coeficiente de clustering	70
Algoritmo 8 Calcular los grados de salida del grafo	72
Algoritmo 9 Separación de los Customers	73
Algoritmo 10 Separación de los Regional ISP del Core.....	74
Algoritmo 11 Cálculo del número de AS y grado acumulado de un país.....	101
Algoritmo 12 Cálculo del número de AS y grado acumulado de los IRRs	103
Algoritmo 13 Cálculo del TOP 20 AS.....	105

