

Teoremas para el final de matemática discreta II 2024

Tomás Maraschio

19 de junio de 2024

Índice

1. ¿Cuál es la complejidad de Edmonds-Karp?	1
2. Probar que $d_k(x) \leq d_{k+1}(x)$	4
3. ¿Cuál es la complejidad de Dinic en ambas versiones? No hace falta probar que la distancia en NAs sucesivos aumenta	6
4. ¿Cuál es la complejidad del algoritmo de Wave? No hace falta probar que la distancia en NAs sucesivos aumenta	9
5. Probar que el valor de todo flujo es menor o igual a la capacidad de todo corte. También que si f es flujo, es maximal si y solo si existe S corte con $V(f) = \text{Cap}(S)$ y S es minimal. No hace falta probar que $V(f) = f(S, \bar{S}) - f(\bar{S}, S)$	10
6. Probar que si G es un grafo conexo no regular entonces $\chi(G) \leq \Delta(G)$	11
7. Probar que 2-COLOR es polinomial	12

1. ¿Cuál es la complejidad de Edmonds-Karp?

Para esta demostración usaré las definiciones y resultados de este teorema. La complejidad de EK es $O(n \times m^2)$. EK encuentra un camino aumentante de s a t y aumenta el flujo a lo largo de este, esto lo hace hasta que

no encuentra más caminos aumentantes. Por lo tanto, su complejidad viene dada por:

$$(Compl(\text{aumentar flujo}) + Compl(\text{encontrar camino aumentante})) \times \#\text{caminos aumentantes}$$

La complejidad de aumentar el flujo en un camino es $O(n)$, pues el camino tiene a lo sumo n vértices, y tengo que recorrerlo dos veces. La complejidad de encontrar un camino aumentante es $O(m)$ porque uso BFS. Luego, como $n < m-2$, tengo que

$$Compl(EK) = O(m) \times \#\text{caminos aumentantes}$$

Entonces me basta probar que hay $O(m \times n)$ caminos aumentantes. Para ello veré cuántas veces puede un lado volverse crítico, teniendo en cuenta que un lado se vuelve crítico en el paso k cuando para pasar al paso $k+1$ este se satura o vacía completamente. Esto lo hago porque por cada camino aumentante que encuentre, cuando aumente el flujo, voy a saturar o llenar al menos un lado en ese camino. Entonces si puedo acotar la cantidad de veces que un lado se vuelve crítico, habré acotado la cantidad de caminos aumentantes. Entonces veré los diferentes casos en donde se satura un lado.

1.1. El lado \overrightarrow{xz} se satura en el paso k

Esto significa que para pasar de f_k a f_{k+1} usé un f_k -camino aumentante de la forma $s \cdots xz \cdots t$. Como estoy corriendo EK, este camino es el de menor longitud entre s y t , lo que implica que también es el de menor longitud entre s y x y z , entonces

$$d_k(z) = d_k(x) + 1$$

Ahora voy a ver qué pasa cuando \overrightarrow{xz} vuelve a hacerse crítico en un paso j . Esto puede ocurrir por dos razones:

- Si se usa backward en j y se vacía.
- Si en un paso i entre k y j se usa backward y se vacía un poco, para luego en j usarse forward y saturarse.

De todas formas, $\exists i : k < i \leq j$ tal que \overrightarrow{xz} se usa backward en el paso i . Esto significa que para pasar de f_i a f_{i+1} uso un f_i -camino aumentante de la forma $s \cdots \overleftarrow{xz} \cdots t$, y por la misma razón que antes tengo que

$$d_i(x) = d_i(z) + 1$$

Juntando todo llego a

$$\begin{aligned}
d_j(t) &\geq d_i(t) \\
&= d_i(x) + b_i(x) \\
&= d_i(z) + 1 + b_i(x) \\
&\geq d_k(z) + 1 + b_k(x) \\
&= d_k(x) + 1 + 1 + b_k(x) \\
&= d_k(t) + 2
\end{aligned}$$

1.2. El lado \overrightarrow{xz} se vacía en el paso k

Esto significa que para pasar de f_k a f_{k+1} usé un f_k -camino aumentante de la forma $s \cdots \overleftarrow{zx} \cdots t$. Como estoy corriendo EK, este camino es el de menor longitud entre s y t, lo que implica que

$$d_k(x) = d_k(z) + 1$$

Ahora voy a ver qué pasa cuando \overrightarrow{xz} vuelve a hacerse crítico en un paso j. Esto puede ocurrir por dos razones:

- Si se usa forward en j y se satura.
- Si en un paso i entre k y j se usa forward y se llena un poco, para luego en j usarse backward y vaciarse.

De todas formas, $\exists i : k < i \leq j$ tal que \overrightarrow{xz} se usa forward en el paso i. Esto significa que para pasar de f_i a f_{i+1} uso un f_i -camino aumentante de la forma $s \cdots xz \cdots t$, y por la misma razón que antes tengo que

$$d_i(z) = d_i(x) + 1$$

Juntando todo llego a

$$\begin{aligned}
d_j(t) &\geq d_i(t) \\
&= d_i(z) + b_i(z) \\
&= d_i(x) + 1 + b_i(z) \\
&\geq d_k(x) + 1 + b_k(z) \\
&= d_k(z) + 1 + 1 + b_k(z) \\
&= d_k(t) + 2
\end{aligned}$$

1.3. Conclusión

En ambos casos llego a que si un lado se satura, para que pueda volver a hacerlo la distancia entre s y t debe aumentar en a lo sumo 2. Y como esta distancia está siempre entre 1 y $n-1$, esto puede pasar a lo sumo $n/2 = O(n)$ veces. Como es para cada lado, tengo que en toda la corrida de EK, un lado cualquiera se vuelve crítico $O(n \times m)$ veces, lo que significa que tengo $O(n \times m)$ caminos aumentantes.

2. Probar que $d_k(x) \leq d_{k+1}(x)$

2.1. Definiciones

Primero, recuerdo las definiciones. Para un flujo f y vértices x, z :

$$d_f(x, z) = \begin{cases} 0 & \text{si } x = z \\ \infty & \text{si no existe } f\text{-camino aumentante entre } x \text{ y } z \\ \text{longitud del menor } f\text{-camino aumentante entre } x \text{ y } z & \end{cases}$$

A partir de esta puedo definir para f_0, f_1, f_2, \dots la sucesión de flujos producidos por Edmonds-Karp:

$$\begin{aligned} d_k(x) &= d_{f_k}(s, x) \\ b_k(x) &= d_{f_k}(x, t) \end{aligned}$$

Y además $d_k(t) = d_k(x) + b_k(x)$, si esos números son finitos.

2.2. Primera parte

Sea el conjunto

$$A = \{x \in V : d_{k+1}(x) < d_k(x)\},$$

si pruebo que este conjunto es vacío ya está. Sup. que A no es vacío, entonces tomo $x \in A$ tal que $d_{k+1}(x) = \min\{d_{k+1}(y) : y \in A\}$. Además tengo que

$$d_{k+1}(x) < d_k(x) \leq \infty \implies d_{k+1}(x) < \infty, \quad (0)$$

lo que significa que existe un f_{k+1} -camino aumentante entre s y x . Y además como

$$d_{k+1}(s) = d_k(s) = 0 \implies s \notin A \implies x \neq s,$$

sé que x tiene un elemento anterior en ese camino, el cual denotaré

$$p_{k+1} : s \cdots zx$$

Ahora, como estoy usando E-K, ese camino es el de menor longitud entre s y x , lo que significa que también es el de menor longitud entre s y cualquier vértice anterior a x , porque si no podría encontrar un camino aún más corto a x . Entonces

$$d_{k+1}(x) = d_{k+1}(z) + 1 \quad (1)$$

Luego, como $d_{k+1}(z) < d_{k+1}(x)$ y x es el elemento de A con menor d_{k+1} , sé que $z \notin A$, lo que implica que

$$d_k(z) \leq d_{k+1}(z) \quad (2)$$

Juntando 0, 1 y 2 llego a $d_k(z) < \infty$, lo que significa que existe un f_k -camino aumentante de longitud mínima entre s y z de la forma $p_k : s \cdots z$.

2.3. Si \overrightarrow{zx} es un lado

En principio podría agregar x al final de p_k para obtener un f_k -camino aumentante entre s y x . Pero si hago eso llego a

$$d_k(x) \leq d_k(z) + 1 \leq d_{k+1}(z) + 1 = d_{k+1}(x),$$

lo que es un absurdo porque x está en A . Este absurdo tiene que venir de que no puedo agregar x al camino, y esto tiene que ser porque $f_k(\overrightarrow{zx}) = c(\overrightarrow{zx})$. Pero en p_{k+1} está el lado \overrightarrow{zx} , lo que significa que para pasar de f_k a f_{k+1} tuve que usarlo en modo backward. Es decir, existe un camino de longitud mínima (por usar E-K)

$$p'_k : s \cdots \overleftarrow{xz} \cdots t,$$

entonces $d_k(z) = d_k(x) + 1$. Luego,

$$\begin{aligned} d_k(z) &= d_k(x) + 1 \\ &> d_{k+1}(x) + 1 \\ &= d_{k+1}(z) + 2 \\ &\geq d_k(z) + 2 \end{aligned}$$

Absurdo pues $0 < 2$.

2.4. Si \overrightarrow{xz} es un lado

En principio podría agregar x al final de p_k para obtener un f_k -camino aumentante entre s y x . Pero si hago eso llego a

$$d_k(x) \leq d_k(z) + 1 \leq d_{k+1}(z) + 1 = d_{k+1}(x),$$

lo que es un absurdo porque x está en A . Este absurdo tiene que venir de que no puedo agregar x al camino, y esto tiene que ser porque $f_k(\overrightarrow{zx}) = 0$. Pero en p_{k+1} está el lado \overleftarrow{zx} , lo que significa que para pasar de f_k a f_{k+1} tuve que usarlo en modo forward. Es decir, existe un camino de longitud mínima (por usar E-K)

$$p'_k : s \cdots xz \cdots t,$$

entonces $d_k(z) = d_k(x) + 1$. Luego,

$$\begin{aligned} d_k(z) &= d_k(x) + 1 \\ &> d_{k+1}(x) + 1 \\ &= d_{k+1}(z) + 2 \\ &\geq d_k(z) + 2 \end{aligned}$$

Absurdo pues $0 < 2$.

2.5. Conclusión

En ambos casos llego a un absurdo, y este absurdo viene de suponer que $A \neq \emptyset$, entonces A es vacío y finalmente

$$d_k(x) \leq d_{k+1}(x)$$

3. ¿Cuál es la complejidad de Dinic en ambas versiones? No hace falta probar que la distancia en NAs sucesivos aumenta

Probaré que $Compl(Dinic) = O(n^2 \times m)$.

3.1. Complejidad de NAs

Como en cada NA la distancia entre s y t aumenta, tendré a lo sumo $O(n)$ NAs. Además, como uso BFS, la complejidad de construir cada NA es

$O(m)$. Entonces tengo que

$$\begin{aligned} Compl(Dinic) &= (Compl(\text{hallar flujo bloqueante}) + Compl(\text{construirNA})) \times \# \text{cantidad de NAs} \\ &= (Compl(\text{hallar flujo bloqueante}) + O(m)) \times O(n) \end{aligned}$$

Me basta probar que $Compl(\text{hallar flujo bloqueante}) = O(n \times m)$.

3.2. Versión original

Los NAs en esta versión tienen la propiedad de que todo vértice tiene algún lado no saturado que va al siguiente nivel. Esto significa que DFS encuentra un camino de s a t sin tener que hacer backtracking. Entonces la complejidad de encontrar un camino en el NA es $O(n^\circ \text{ niveles}) = O(n)$. Además, aumentar el flujo en un camino es $O(n)$, pues hay que recorrer el camino dos veces. Ahora, como cada camino aumentante satura (al menos) un lado, tendré $O(m)$ caminos aumentantes. Entonces por ahora tengo que la complejidad de encontrar los caminos y aumentar el flujo en ellos es $O(n \times m)$. Sin embargo, tengo que ver cuánto cuesta mantener la propiedad que mencioné al principio.

Para mantener esa propiedad, luego de cada camino ejecuto el proceso 'podar', que va revisando los vertices desde los niveles superiores para abajo:

- Si el vertice tiene lados que salen no hace nada
- Si no tiene lados que salen, borra el vértice y sus lados al siguiente nivel

Revisar si un vértice tiene lados que salen es $O(1)$, y como luego de cada camino hago esto para cada vértice, esta parte me cuesta $O(n \times m)$.

Ahora, borrar un vértice y sus lados se hace a lo sumo una vez por vértice y su complejidad es $O(d(x))$. Entonces, la complejidad sobre todos los 'podar' de esta parte es $\sum_{x \in V} d(x) = O(m)$.

Finalmente, la complejidad de hallar flujo bloqueante es

$$O(n \times m) + O(n \times m) + O(m) = O(n \times m)$$

3.3. Versión occidental

Daré el algoritmo que se usa para encontrar un flujo bloqueante g :

```

g := 0
while (1) {
  p := [s]
  x := s
  while (x != t) {
    if (VecinosAdelanteDe(x) != []) {      // Avanzar (A)
      y := tomar de VecinosAdelanteDe(x)
      agregar y al final de p
      x := y
    } else {
      if (x != s) {                        // Retroceder (R)
        z := vértice anterior a x en p
        borrar zx
        x := z
      } else {
        return g
      }
    }
  }
  }
  aumentar g en p y borrar lados saturados // Incrementar (I)
}

```

Notar que una corrida de este algoritmo es de la forma $A \cdots AIA \cdots AIA \cdots AR \cdots$ es decir, una sucesión de palabras de la forma $A \cdots AX$ donde X es I o R (excepto la última palabra de todas, que terminará con A). Además, $O(A) = O(R) = O(1)$ y $O(I) = O(n)$, pues para aumentar el flujo y borrar los lados tengo que recorrer el camino p dos veces y este tiene a lo sumo longitud n.

Tengo que ver cuantas As puede haber en una palabra. Como cada A me lleva al siguiente nivel del NA, hay $O(n)$ As en cada palabra. De esta forma, el coste de las palabras me quedó:

- $Compl(A \cdots AR) = O(n) + O(1) = O(n)$
- $Compl(A \cdots AI) = O(n) + O(n) = O(n)$

Solo basta ver cuantas de estas palabras puede haber. Como cada R borra un lado y cada I borra al menos un lado, tengo que hay a lo sumo m palabras. Finalmente:

$$Compl(\text{hallar flujo bloqueante}) = O(n) \times O(m) = O(n \times m)$$

4. ¿Cuál es la complejidad del algoritmo de Wave? No hace falta probar que la distancia en NAs sucesivos aumenta

Probaré que $Compl(Wave) = O(n^3)$.

Al igual que en Dinic, como la distancia entre s y t aumenta en NAs sucesivos, tengo $O(n)$ NAs, pues t no puede estar a una distancia mayor a n de s . Ahora, como

$$Compl(Wave) = (Compl(\text{hallar flujo bloqueante}) + Compl(\text{construir NA})) \times O(n)$$

y $Compl(\text{construir NA}) = O(m)$ pues uso BFS, bastaría probar que

$$Compl(\text{hallar flujo bloqueante}) = O(n^2).$$

Notar que $O(n^2) + O(m) = O(n^2)$ pues $m \leq \binom{n}{2} = O(n^2)$.

Voy a dividir el proceso de hallar un flujo bloqueante en casos.

Cuando estoy balanceando vértices hacia adelante:

- V: los pasos donde saturó un lado
- P: los pasos donde no saturó un lado

Cuando estoy balanceando los vértices hacia atrás:

- S: los pasos donde vació un lado
- Q: los pasos donde no vació un lado

V: Sup. que x le manda flujo a z y \overrightarrow{xz} se satura. Para que \overrightarrow{xz} vuelva a saturarse, primero tiene que vaciarse un poco, pero si se vacía es porque z se bloqueó y entonces le devolvió flujo a x . Pero como z está bloqueado (y nunca se desbloqueará), x no le va a volver a mandar flujo a z . Entonces, cada lado puede saturarse a lo sumo una vez. $\therefore Compl(V) = O(m)$.

S: Sup. que x le devuelve flujo a z y \overrightarrow{zx} se vacía. Como x devolvió flujo significa que está bloqueado, entonces z no volverá a mandarle flujo, entonces \overrightarrow{zx} no se podrá llenar para volver a vaciarse. Esto implica que un lado se puede vaciar a lo sumo una vez. $\therefore Compl(S) = O(m)$.

P: Cuando un vértice manda flujo a sus vecinos para balancearse, satura todos los lados, excepto quizás uno. Esto significa que para cada vértice en cada ola hacia adelante se satura parcialmente a lo sumo un lado. Entonces $Compl(P) = O(n) \times \#olas \text{ hacia adelante}$.

Ahora, en cada ola hacia adelante (excepto la última) queda al menos un vértice desbalanceado, es decir que cada ola hacia adelante hace que se bloquee al menos un vértice. Y como no se desbloquean una vez bloqueados, tengo que $\#olas \text{ hacia adelante} = O(n)$. $\therefore Compl(P) = O(n^2)$.

Q: Cuando un vértice devuelve flujo a los vecinos, vacía todos los lados excepto quizás uno. Esto significa que para cada vértice en cada ola hacia atrás se vacía parcialmente a lo sumo un lado. Entonces $Compl(Q) = O(n) \times \#olas \text{ hacia atrás} = O(n) \times \#olas \text{ hacia adelante} = O(n^2)$.

Finalmente,

$$Compl(\text{hallar flujo bloqueante}) = O(m) + O(n^2) + O(m) + O(n^2) = O(n^2).$$

5. Probar que el valor de todo flujo es menor o igual a la capacidad de todo corte. También que si f es flujo, es maximal si y solo si existe S corte con $V(f) = Cap(S)$ y S es minimal. No hace falta probar que $V(f) = f(S, \bar{S}) - f(\bar{S}, S)$

5.1. Valor de todo flujo menor o igual a capacidad de todo corte

$$f(\bar{S}, S) = \sum_{\substack{x \notin S \\ y \in S \\ \vec{xy} \in E}} f(\vec{xy}) \geq 0 \text{ pues } f(\vec{xy}), \forall \vec{xy} \in E$$

$$\text{Entonces tengo } V(f) = f(S, \bar{S}) - f(\bar{S}, S) \leq f(S, \bar{S}) \leq c(S, \bar{S}) = Cap(S)$$

5.2. \Leftarrow vuelta

Sea f flujo y S corte con $V(f) = Cap(S)$. Para todo flujo g , por lo que probé arriba tengo $V(g) \leq Cap(S) = V(f) \implies f$ es maximal. Además, para todo corte T tengo $Cap(T) \geq V(f) = Cap(S) \implies S$ es minimal.

5.3. \implies ida

Sea f flujo maximal. Voy a construir un S y probaré que es un corte minimal con $V(f) = Cap(S)$.

$$S = \{s\} \cup \{x : \text{existe } f\text{-camino aumentante de } s \text{ a } x\}$$

S es corte

Sup. que no lo es. La única forma que pase esto es porque $t \notin S$, pues $s \in S$. Pero esto significa que existe un f-camino aumentante de s a t , por lo que puedo aumentar f en ese camino. Absurdo porque f es maximal, luego S es corte.

V(f) = Cap(S)

Sean $x \in S, y \notin S, \vec{xy} \in E$.

$x \in S \implies$ existe f-camino aumentante de s a x

$y \notin S \implies$ no existe f-camino aumentante de s a y

Entonces el camino $s \cdots xy$ podría ser aumentante, pero no lo es, y esto solo puede ser si $f(\vec{xy}) = c(\vec{xy})$. Entonces

$$f(S, \bar{S}) = \sum_{\substack{x \in S \\ y \notin S \\ \vec{xy} \in E}} f(\vec{xy}) = \sum_{\substack{x \in S \\ y \notin S \\ \vec{xy} \in E}} c(\vec{xy}) = c(S, \bar{S}) = \text{Cap}(S)$$

Ahora sean $x \notin S, y \in S, \vec{xy} \in E$.

$x \notin S \implies$ no existe f-camino aumentante de s a x

$y \in S \implies$ existe f-camino aumentante de s a y

Entonces el camino $s \cdots \overleftarrow{yx}$ podría ser aumentante, pero no lo es, y esto solo puede ser si $f(\vec{xy}) = 0$. Entonces

$$f(\bar{S}, S) = \sum_{\substack{x \notin S \\ y \in S \\ \vec{xy} \in E}} f(\vec{xy}) = \sum_{\substack{x \notin S \\ y \in S \\ \vec{xy} \in E}} 0 = 0$$

Finalmente: $V(f) = f(S, \bar{S}) - f(\bar{S}, S) = \text{Cap}(S) - 0 = \text{Cap}(S)$

6. Probar que si G es un grafo conexo no regular entonces $\chi(G) \leq \Delta(G)$

Sea x tal que $d(x) = \delta(G)$. Corro BFS empezando por x y guardo el orden inverso en que los vértices se visitaron. Ahora voy a correr greedy en

este orden que acabo de guardar. Notar que en BFS todo vértice es incluido por un vértice que ya ha sido visitado, entonces en el orden inverso todo vértice tiene al menos un vecino por delante (excepto el x). Esto significa que para cada vértice y , en el peor caso va a tener $d(y) - 1 < \Delta$ vecinos coloreados todos con un color distinto, entonces voy a poder elegir un color en $\{1, \dots, \Delta\}$. Finalmente, cuando llego a x , como $d(x) = \delta < \Delta$, podré elegir algún color de $\{1, \dots, \Delta\}$ que no está usado por ningún vecino de x para colorearlo. De esta forma tengo un coloreo propio de G que usa (a lo sumo) Δ colores, entonces $\chi(G) \leq \Delta(G)$.

7. Probar que 2-COLOR es polinomial

Para ello voy a dar un algoritmo polinomial que colorea un grafo con dos colores. Luego probaré que si el coloreo que da mi algoritmo no es propio es porque en el grafo hay algún ciclo impar, lo que implicaría $\chi(G) \geq 3$. Notar que voy a asumir que el grafo es conexo, sin embargo si no lo es, simplemente hay que correr el algoritmo en todas sus componentes conexas y ver que todas sean bipartitas.

7.1. Algoritmo

Agarro un vértice x de G y corro BFS empezando en él. Luego a cada vértice y le asigno el color $Nivel_{BFS}(y) \bmod 2$. Esto es lo mismo que pintar a x del color 1, y luego cada vez que un vértice z agrega a un vértice y en BFS, asigno $c(y) = 1 - c(z)$. Es claro que esta parte es $O(m)$ por usar BFS.

Ahora tengo que revisar que el coloreo sea en efecto propio, lo que cuesta $\sum_{x \in V} O(d(x)) = O(m)$. Entonces llego a que mi algoritmo es polinomial.

7.2. ¿Qué pasa cuando el coloreo que di no es propio?

Eso significa que $\exists u, v \in V : c(u) = c(v) \wedge uv \in E$. Entonces

$$\begin{aligned} Nivel_{BFS}(u) \bmod 2 &= Nivel_{BFS}(v) \bmod 2 \\ \implies Nivel_{BFS}(u) + Nivel_{BFS}(v) &\text{ es par} \end{aligned} \tag{1}$$

Como u y v fueron agregados por un BFS desde x , sé que existe un camino de x a u y un camino de x a v . Ahora sea w el vértice tal que estos dos caminos se separan (notar que w puede ser x), voy a calcular la cantidad de lados en el ciclo $w \cdots uv \cdots w$.

- En $w \cdots u$ hay $Nivel_{BFS}(u) - Nivel_{BFS}(w)$ lados.
- En uv hay 1 lado.
- En $v \cdots w$ hay $Nivel_{BFS}(v) - Nivel_{BFS}(w)$ lados.

Luego en el ciclo hay

$$\begin{aligned} & Nivel_{BFS}(u) - Nivel_{BFS}(w) + 1 + Nivel_{BFS}(v) - Nivel_{BFS}(w) \\ &= Nivel_{BFS}(u) + Nivel_{BFS}(v) + 2 \times Nivel_{BFS}(w) + 1 \end{aligned}$$

lados, que es un número impar por (1).