

Un Estudio sobre las Preferencias de los Alumnos en el Diseño Gráfico de Visualizaciones de Algoritmos

J. Ángel Velázquez-Iturbide

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática
Universidad Rey Juan Carlos
28933 Móstoles, Madrid, España
angel.velazquez@urjc.es

Celeste Pizarro-Romero

Escuela Superior de CC Experimentales y Tecnología
Universidad Rey Juan Carlos
28933 Móstoles, Madrid, España
celestepizarro@urjc.es

Resumen— Aunque el foco principal de la investigación en visualización de algoritmos han sido los aspectos pedagógicos, también conviene estudiar las características gráficas deseables. En esta comunicación se presenta una evaluación realizada con alumnos sobre la conveniencia de incluir algunos elementos gráficos (etiquetas, flechas y sombreado) en la visualización de un algoritmo iterativo. Los alumnos debían realizar dos tareas: contestar a un cuestionario de opinión y explicar gráficamente la ejecución del algoritmo. Los resultados muestran una preferencia por las flechas frente a etiquetas o sombreado. Sin embargo, el análisis de los dibujos muestra un mayor uso de las etiquetas y una mayor intención de mostrar cambios en los valores de las variables que de resaltar. Algunos resultados podrían ser generalizables, como el uso de etiquetas de identificadores.

Palabras clave—algorithm visualization; graphic design; students' preferences

I. INTRODUCCIÓN

El campo de la visualización para la enseñanza de la programación y los algoritmos ya cuenta con unos 30 años de intensa actividad, sin incluir algunas iniciativas anteriores [1]. En los años 80 y la primera mitad de los 90, la investigación se centró en el desarrollo de sistemas de visualización, el aumento de su expresividad y en facilitar su generación. A mediados de los años 90, el foco de la investigación se desplazó a la eficacia educativa de las visualizaciones. Se concluyó que la eficacia está relacionada principalmente con el uso educativo que se haga de las visualizaciones [2]. Basado en esta conclusión, un grupo de trabajo del congreso ITiCSE 2002 propuso una taxonomía de niveles de implicación de los alumnos con las visualizaciones que suele tomarse como referencia [3].

Una consecuencia del desplazamiento de los aspectos técnicos a los pedagógicos es que se ha dedicado menos atención a estudiar las características deseables de las visualizaciones en sí (por supuesto, con salvedades [4]). Contrasta con la década anterior, en que se experimentó con su estructura (animación, múltiples vistas, mantenimiento de eventos pasados, etc.) y formato (color, 3D, sonido, etc.) [5].

En esta comunicación se presenta un estudio doble realizado con alumnos sobre la conveniencia de incluir algunos elementos gráficos en las visualizaciones. Por un lado, se pidió su opinión (de forma indirecta) sobre la conveniencia de incluir varios

Este trabajo se ha financiado con el proyecto de investigación TIN2015-66731-C2-1-R del Ministerio de Economía y Competitividad, S2013/ICE-2715 de la Comunidad Autónoma de Madrid, y 30VCP/IGI15 de la Universidad Rey Juan Carlos.

elementos gráficos y textuales: identificadores, flechas, y sombreado y delimitadores. Por otro lado, se pidió que desarrollaran dibujos a mano y se analizó el uso de estos elementos.

La estructura de la comunicación es la siguiente. En la sección siguiente se hace un repaso de trabajos realizados en el ámbito de la visualización de algoritmos sobre la importancia de las características gráficas. En la sección 3 se presenta el contexto educativo y la planificación de la sesión de evaluación. En la sección 4 se presentan los resultados del estudio. Terminamos con secciones de debate y conclusiones.

II. ELEMENTOS GRÁFICOS DE LAS VISUALIZACIONES DE ALGORITMOS

La taxonomía de Price, Baecker y Small [6] incluye 6 categorías principales que caracterizan a los sistemas de visualización de software. La categoría C (“forma”) identifica las características de las visualizaciones presentadas. A su vez, esta categoría incluye varias subcategorías, entre las que C.2.1 (“vocabulario gráfico”) agrupa los elementos gráficos.

Según Bertin [7], un vocabulario gráfico está formado principalmente por “marcas” (puntos, líneas o formas) con una posición en el espacio. Cada marca tiene seis propiedades retinales independientes: color, tamaño, forma, nivel de gris, orientación y textura.

El elemento gráfico que más se ha estudiado es el color. Mark Brown recomienda, en su experiencia, usar el color [8] con cinco fines: codificar el estado de las estructuras de datos, resaltar la actividad, coordinar vistas múltiples, resaltar patrones y hacer visible la historia. (Este último fin ha sido interpretado por algunos autores mediante la representación del orden temporal de ejecución [9].) También comenta algunas “técnicas básicas”, entre las cuales se incluye resaltar mediante un cambio de forma o de color.

Diversos investigadores han estudiado las figuras construidas por los propios alumnos. Sin embargo, sus objetivos han sido muy variados. Así, Douglas *et al.* [10] descubrieron que las visualizaciones desarrolladas por los alumnos con materiales de oficina eran muy diferentes entre sí y de las visualizaciones generadas por los sistemas de visualización. Este estudio fue la base para desarrollar sistemas de visualización de “baja fidelidad” pero que soportan de forma más adecuada el proceso de diseño y aprendizaje. Otros autores, como Ford [11] o Sajaniemi *et al.* [12] han analizado las figuras dibujadas por

alumnos como forma de identificar malas concepciones en su aprendizaje de la programación. Hübscher-Younger y Narayanan realizaron varios estudios [13] donde las visualizaciones creadas por los alumnos eran puntuadas por sus compañeros y se relacionaban sus puntuaciones con el uso de distintos medios, su contenido metafórico y su similitud con otras explicaciones.

Sin embargo, estos estudios de las visualizaciones desarrolladas por los alumnos no se centran en sus características gráficas. Los únicos estudios que conocemos, centrados en dichas características, son los de Andrea Lawrence [14]. Entre otros hallazgos, destacan la conveniencia de etiquetar los elementos gráficos con sus valores y, para cada paso de una animación, no resaltar el cambio de estado mediante un cambio de color sino mediante otros efectos (como pestañeo, sombreado o cambio del estilo de una línea). No obstante, no siempre estas preferencias se tradujeron en una mejora estadísticamente significativa del aprendizaje.

Nuestro objetivo no es diseñar las visualizaciones de forma que sean más eficaces educativamente porque, como han determinado numerosos estudios, esto depende principalmente de su uso educativo [2] y de la implicación de los alumnos [3]. Pretendemos indagar en las características gráficas preferidas por los alumnos (opinión subjetiva) y las usadas realmente por ellos (uso objetivo). Los resultados del estudio podrán, en el futuro, integrarse en un sistema de visualización y podremos comprobar su efecto en la satisfacción de los alumnos.

En un estudio anterior analizamos las características de las figuras contenidas en una selección de prestigiosos libros de texto de algoritmos [15]. Sin embargo, el análisis se centró en aspectos más generales, como el tipo de representación gráfica.

III. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO

Presentamos sucesivamente el contexto educativo del estudio, el protocolo seguido y los métodos de análisis.

A. Contexto Educativo

El estudio se realizó en la asignatura obligatoria "Diseño y Análisis de Algoritmos", de segundo curso del Grado en Ingeniería Informática. Participaron alumnos de los dos grupos presenciales de los campus de Móstoles y Vicalvaro.

B. Protocolo

Los alumnos recibieron 10 hojas en papel escritas a una cara. Las dos hojas primeras contenían una descripción escrita del algoritmo de ordenación rápida (*quicksort*), una implementación en Java y dos preguntas:

1. Dado el vector {4,2,8,7,3,1,5,6} de tamaño 8, se suministraba una secuencia de estados que ilustraba el comportamiento de la operación de partición. Se daban 7 versiones de la misma secuencia de estados con diferencias en sus características gráficas. Se pedía evaluar en una escala de Likert de 1 a 5 la utilidad de cada versión para la comprensión del algoritmo.
2. Dado otro vector de tamaño 8, {6,2,1,3,5,7,8,4}, se pedía que dibujaran una secuencia de figuras que explicara el comportamiento del algoritmo.

Las versiones variaban en varios elementos gráficos:

- Etiquetas. Son los identificadores de las variables usadas en el algoritmo.
- Sombreado. El uso de sombreado y delimitadores (barras verticales gruesas) permite diferenciar las dos partes en las que el algoritmo parte el vector.
- Flechas. Algunas flechas permiten conocer la posición del vector señalada por un índice; otras indican un intercambio del contenido de dos celdas del vector.

Las 7 versiones de la secuencia de estados diferían en el uso de estas características gráficas:

- Versión E: Sólo contiene etiquetas.
- Versión F: Sólo contiene flechas.
- Versión S: Sólo contiene sombreado.
- Versión EF: Contiene etiquetas y flechas.
- Versión ES: Contiene etiquetas y sombreado.
- Versión FS: Contiene flechas y sombreado.
- Versión EFS: Contiene las tres características gráficas.

La Figura 1 muestra las versiones EFS, E, F y S. Es fácil imaginar el contenido de las otras tres versiones.

C. Métodos de Análisis

Las dos preguntas se analizaron de forma distinta. Las respuestas a la pregunta primera eran valores de una escala de Likert, por lo que se analizaron estadísticamente. Sin embargo, las respuestas de la segunda pregunta tenían formato libre, al ser dibujos. Por tanto, se analizaron con métodos cualitativos. Se analizó el contenido gráfico de los dibujos, no si los alumnos comprendían el algoritmo. Cuando un alumno presentaba un dibujo tachado, sólo se analizó si no había ningún dibujo sin tachar.

Se realizaron cuatro iteraciones:

1. Iteración exploratoria. Se comenzó identificando en los dibujos de los alumnos los mismos tres elementos que diferenciaban las visualizaciones de la primera pregunta (E, F y S). Sin embargo, pronto se hizo evidente que esta forma de catalogar no era adecuada: cada característica comprendía varios elementos que no siempre usaban los alumnos. Se decidió cambiar el criterio de catalogación antes de acabar la iteración.
2. Segunda iteración. Se tomó como criterio de catalogación la *intención* del alumno y se analizaron de nuevo los dibujos.
3. Tercera y cuarta iteraciones. Se completaron y refinaron las categorías de intención y se revisó la completitud y corrección del análisis.

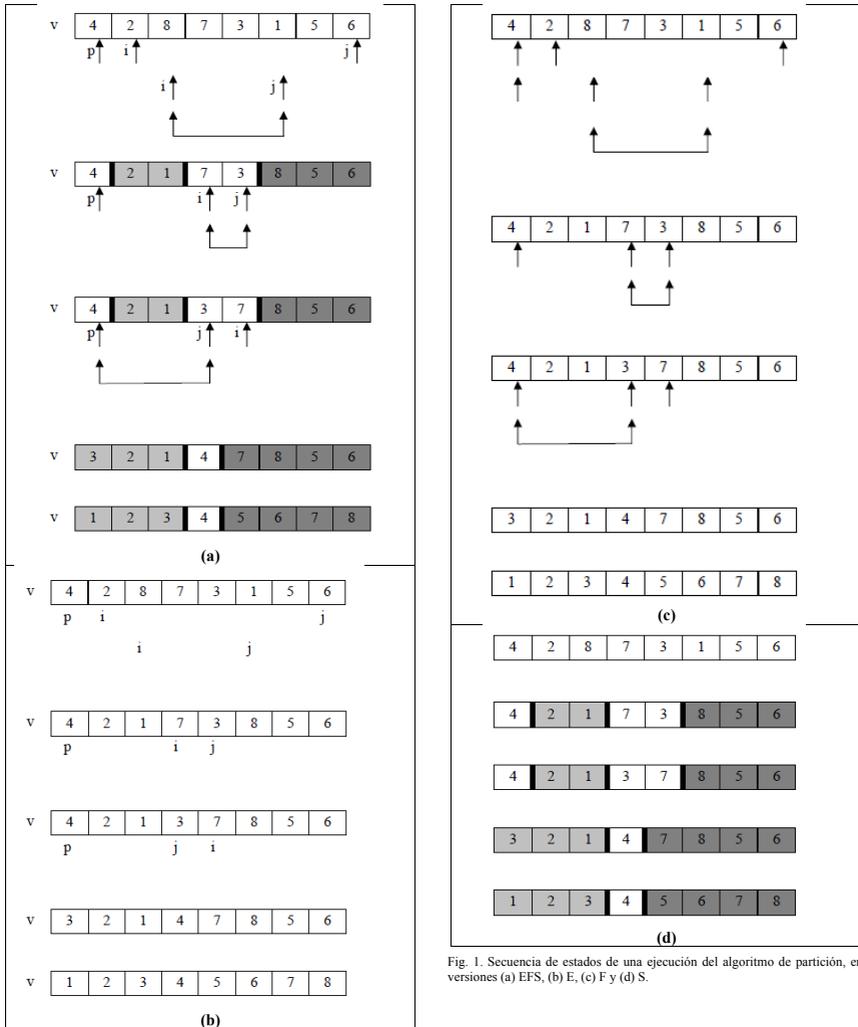


Fig. 1. Secuencia de estados de una ejecución del algoritmo de partición, en versiones (a) EFS, (b) E, (c) F y (d) S.

Supusimos que los alumnos dibujarían, al menos, una secuencia de estados de vectores, normalmente dispuestos cada uno debajo del anterior. El estado del vector se representa como una secuencia horizontal de valores, quizá enmarcados en cuadrados. El resto de elementos gráficos pueden incluirse en alguna de las siguientes categorías de intención:

- Etiquetar. Se marca algún elemento gráfico con un identificador de variable, con la intención de que se comprenda mejor la visualización del algoritmo.
- Señalar una celda. El valor de un índice no se representa numéricamente (como los contenidos del vector) sino gráficamente, colocando debajo de la celda una flecha (que la señala) o su etiqueta.
- Resaltar elemento. Se llama la atención sobre una celda. Puede hacerse con una flecha, un recuadro, "sacando" la celda fuera del array u otras formas.
- Resaltar grupo (agrupar). La intención es análoga a la de la categoría anterior, pero agrupando una o varias celdas del array en un subarray, normalmente porque cumplen alguna propiedad (p.ej. ser menores que el pivote). Pueden agruparse mediante sombreado, enmarcado, coloreado o llaves, o separarse mediante delimitadores.
- Mover. Se muestra el cambio de valor de diversas variables mediante varias clases de flechas.

IV. RESULTADOS

Se recogieron un total de 82 cuestionarios, 67 del grupo de Móstoles y 15 del grupo de Vicálvaro. Veamos primero los resultados de la primera pregunta y después los de la segunda.

A. Resultados de la Primera Pregunta

Se realizó un contraste de hipótesis, mediante el estadístico Chi-cuadrado, para determinar si las dos variables categóricas (la versión, variable nominal, y su valoración, variable ordinal) son independientes. El estadístico compara las frecuencias de valores obtenidas y esperadas. Si los datos son independientes, la probabilidad asociada a este estadístico serán altos, superiores a 0'05. Los resultados se muestran en la Tabla I.

Tabla I. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DEL GRUPO CONTROL

| | Valor | gl | Sig. asintótica (bilateral) |
|------------------------------|----------------------|----|-----------------------------|
| Chi-cuadrado de Pearson | 270,707 ^a | 24 | ,000 |
| Razón de verosimilitudes | 282,043 | 24 | ,000 |
| Asociación lineal por lineal | 184,579 | 1 | ,000 |
| N de casos válidos | 468 | | |

^a 0 casillas (0,0%) tienen una frecuencia esperada inferior a 5. La frecuencia mínima esperada es 6,21

Puede observarse que la probabilidad asociada al estadístico Chi-cuadrado es 0'00, lo que denota dependencia entre las variables. Por tanto, basándonos en la muestra objeto de estudio, las características gráficas presentadas tienen relación con las preferencias de los alumnos.

Las medias de las puntuaciones obtenidas por las distintas versiones varían mucho (véase Tabla II).

Tabla II. MEDIAS DE ACEPTACIÓN DE CADA VERSIÓN

| E | S | F | ES | EF | FS | EFS |
|------|------|------|------|------|------|------|
| 2,14 | 2,14 | 2,99 | 3,30 | 3,33 | 3,88 | 4,12 |

Veamos con detalle la dependencia entre características gráficas y preferencias. Los resultados se muestran en formato de tabla de contingencia (Tabla III) y de diagrama (Fig. 2).

Tabla III. TABLA DE CONTINGENCIA VERSIÓN GRÁFICA - UTILIDAD

| Versión | Utilidad | | | | |
|---------|-------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|
| | Nada útil | Poco útil | Neutra | Algo útil | Totalmente útil |
| E | 17 25,8% | 29 43,9% | 18 27,3% | 2 3,0% | 0 0,0% |
| S | 22 32,8% | 27 40,3% | 12 17,9% | 6 9,0% | 0 0,0% |
| F | 3 4,5% | 15 22,4% | 31 46,3% | 15 22,4% | 3 4,5% |
| ES | 0 0,0% | 16 24,2% | 19 28,8% | 28 42,4% | 3 4,5% |
| EF | 0 0,0% | 14 20,9% | 22 32,8% | 22 32,8% | 9 13,4% |
| FS | 0 0,0% | 3 4,5% | 16 23,9% | 35 52,2% | 13 19,4% |
| EFS | 2 2,9% | 4 5,9% | 5 7,4% | 27 39,7% | 30 44,1% |
| Total | 44 9,4% | 108 23,1% | 123 26,3% | 135 28,8% | 58 12,4% |

Como era de prever, el método preferido por la mayoría de los alumnos es la versión EFS. Casi la mitad de los alumnos (44.1%) la han calificado de "totalmente útil", siendo casi un 84% los que la han calificado de "algo útil" al menos.

La versión FS es la siguiente favorita del alumnado, aunque ahora el porcentaje que la considera "totalmente útil" es mucho menor (19'4%), concentrándose la mayoría de las respuestas en "algo útil" (52'2%) y "neutra" (23'9%).

Estas respuestas se repiten en forma mayoritaria con la versión EF, aunque el porcentaje de "neutra" y "algo útil" es equitativo, con un 32'8%. En el caso de la versión ES, es mayor el porcentaje de alumnado que la considera "algo útil" (42'4%), aunque el porcentaje que la considera "totalmente útil" disminuye al 4'5%.

La versión F es la que recibe una opinión de los alumnos más neutra: el mayor porcentaje se concentra en la respuesta "neutra", mientras que hay el mismo número de personas que la consideran "poco útil" o "algo útil" (22'4%), así como "nada útil" o "totalmente útil" (4'5%).

Por último, las versiones E y S son las que obtienen peores puntuaciones. En el caso de la versión E, casi un 70% la considera "nada o poco útil". En el caso de la versión S, este porcentaje aumenta hasta el 73'1%, presentándose como la técnica menos aceptada de las estudiadas. Aun así, cabe destacar que, siendo la versión peor aceptada por los alumnos, su aceptación aumenta considerablemente en combinación con la característica F (dando lugar a la versión FS, que es más aceptada que la versión EF).

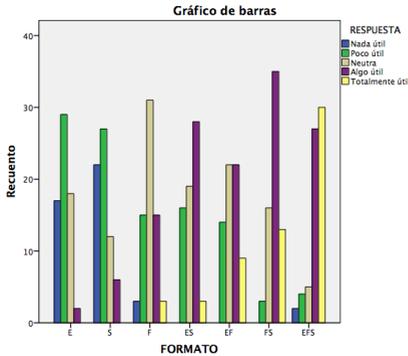


Fig. 2. Diagrama de contingencia versión gráfica - utilidad

B. Resultados de la Segunda Pregunta

Veamos el uso de los distintos elementos identificados, en orden decreciente de frecuencia.

El elemento de programación más representado visualmente fue el valor de los índices. Ningún alumno escribió su valor con números y casi todos lo representaron visualmente (96'3%, todos menos 3, véase la Tabla IV). Dos son los recursos gráficos más usados para representar el valor de un índice: bien escribir su identificador bien dibujar una flecha, en ambos casos inmediatamente debajo de la celda correspondiente. Una gran mayoría (68'3%) prefieren usar ambos recursos, aunque es ligeramente mayor el porcentaje de quienes usan etiquetas (86'6%) que flechas (78'1%).

TABLA IV. REPRESENTACIÓN DE VALORES DE ÍNDICES (N=82)

| Representación | # | % |
|---------------------|----|-------|
| Ninguna | 3 | 3,7% |
| Flechas | 8 | 9,8% |
| Flechas y etiquetas | 56 | 68,3% |
| Etiquetas | 15 | 18,3% |

Otro elemento gráfico usado abundantemente son las etiquetas, es decir, los identificadores de variables (véase Tabla V). Como hemos visto, la mayoría de los alumnos (86'6%) usaron etiquetas para representar el valor de las variables de índice. Sin embargo, varió bastante el conjunto de variables etiquetadas. Los que etiquetaron una sola variable, eligieron el pivote *p*, mientras que los que etiquetaron dos variables, eligieron los índices *i* y *j*. No obstante, la mayoría de los alumnos etiquetaron las tres variables locales (65'9%). Por último, un 8'5% de alumnos consideraron que debía etiquetarse el vector *v* junto a las tres variables.

Otro aspecto representado por muchos alumnos (69'5%) ha sido el cambio de valores de las variables (véase Tabla VI). A veces se representaba el intercambio del contenido de dos celdas

y otras, el incremento o decremento del valor de un índice. Para el primer objetivo, usaban preferiblemente una flecha doble (61%) o dos flechas entre dos celdas pero en sentido contrario. El segundo objetivo se representaba mediante una flecha sencilla en el sentido de la variación del índice (de la celda señalada inicialmente a la siguiente). Seis alumnos (7'3%) representaron ambas clases de flechas.

TABLA V. USO DE ETIQUETAS (N=82)

| Nº variables etiquetadas | # | % |
|--------------------------|----|-------|
| 0 | 11 | 13,4% |
| 1 | 8 | 9,8% |
| 2 | 2 | 2,4% |
| 3 | 54 | 65,9% |
| 4 | 7 | 8,5% |

TABLA VI. REPRESENTACIÓN DEL CAMBIO DE VALOR DE VARIABLES (N=82)

| Representación | # | % |
|---------------------------------|----|-------|
| Ninguna | 25 | 30,5% |
| Flecha doble | 50 | 61% |
| Dos flechas con sentido inverso | 4 | 4,9% |
| Flecha sencilla | 9 | 11% |

Encontramos dos intenciones distintas al resaltar elementos gráficos. Lo más frecuente (42'7% del total) es resaltar partes del vector, normalmente el pivote, el subvector izquierdo o el derecho. Hay varias formas de resaltado no excluyentes (véase la Tabla VII). Lo más frecuente es el uso de un delimitador de los distintos subarrays, seguido del enmarcado en trazo grueso, el sombreado y las llaves. Menos frecuente es el coloreado y la separación de los subarrays mediante espacio en blanco.

TABLA VIII. ELEMENTOS DE RESALTADO DE PARTES DEL VECTOR (N=35)

| Representación | # | % |
|-------------------|----|-------|
| Delimitador | 19 | 54,3% |
| Enmarcado | 12 | 34,3% |
| Sombreado | 12 | 34,3% |
| Llaves | 6 | 17,1% |
| Coloreado | 2 | 5,7% |
| Separar subarrays | 2 | 5,7% |

Por otro lado, es menos frecuente resaltar celdas con un papel destacado en un momento dado, como el pivote o dos celdas a intercambiar. Así han operado 13 alumnos (15'85%). Principalmente rodean el contenido de las celdas con círculos, enmarcan las celdas, y en tres casos sueltos usan colores, las marcan con asteriscos o las redibujan debajo del vector.

V. DEBATE

En esta sección analizamos los resultados obtenidos.

A. Resultados

Si analizamos los resultados estadísticos, comprobamos que el factor más apreciado por los alumnos fueron las flechas. Hemos incluido bajo el término "flechas" la representación visual de dos elementos distintos: el valor de un índice y la operación de intercambio del valor contenido en dos celdas. Dan menos importancia al sombreado y el etiquetado.

Sin embargo, al analizar los dibujos, el elemento gráfico más usado fueron las etiquetas, a poca distancia de las flechas (86'6% vs. 78'1%). El elemento más etiquetado fue el pivote, aunque su

valor no variaba durante la ejecución del algoritmo. Esta persistencia probablemente se deba a su papel clave en el algoritmo. Las siguientes variables más etiquetadas fueron los índices de control del recorrido del vector. La variable menos etiquetada fue el vector, la estructura de datos a manipular.

Otro efecto buscado por los alumnos fue hacer explícito el intercambio de valores entre celdas (69'5%). A continuación, encontramos el resaltado de partes del vector (42'7%), para lo cual utilizaron un variado repertorio de recursos gráficos (delimitadores, sombreado, coloreado, enmarcado, etc.). Los efectos menos dibujados fueron resaltar algunas celdas en pasos clave del algoritmo (15'85%) y mostrar los cambios de valor de los índices (11%).

B. Coherencia de los Resultados

Los resultados obtenidos con ambas preguntas no son completamente coherentes. Han considerado más útiles las flechas pero han utilizado más las etiquetas. No son recursos excluyentes, sino que suelen ir combinados. Los alumnos dan prioridad a etiquetar las variables más importantes para el algoritmo y los índices (frente a la estructura de datos).

Hay algunos recursos gráficos que se han usado poco, probablemente por la dificultad de dibujarlos en papel. Es el caso del sombreado o el coloreado como forma de resaltar, el resaltado de celdas clave en instantes dados o la variación del valor de índices. Obsérvese que, si se hicieran por ordenador, los dos últimos efectos estarían ligados a una animación.

C. Generalización de los Resultados

El estudio se refiere al algoritmo de partición utilizado por la ordenación rápida. Se trata de un algoritmo iterativo, definido sobre un vector, donde juegan papeles importantes los índices de recorrido del vector, su partición y el intercambio de contenidos entre celdas. Por tanto, es difícil generalizar los resultados obtenidos a algoritmos con otras características.

De todas formas, algunos resultados quizá podrían generalizarse. El más destacado es la importancia de etiquetar variables, sobre todo las más importantes para el problema a resolver. También es importante resaltar los cambios de estado mediante animación o mediante cambios en las propiedades gráficas de los elementos (p.ej. enmarcado o sombreado). Es necesario hacer otros estudios para confirmar estas tendencias.

Algunos resultados son coherentes con los obtenidos por otros autores. Se comparte con Lawrence [14] la importancia de las etiquetas, con la salvedad de que Lawrence se refiere a valores numéricos de elementos y nosotros a identificadores de variables. También se coincide con Brown y Hershberger [8] en la importancia de codificar los cambios de estado de las estructuras de datos y de resaltar la actividad.

VI. CONCLUSIONES

Se ha presentado un estudio realizado con alumnos sobre la conveniencia de incluir algunos elementos gráficos en la visualización de un algoritmo iterativo. El estudio contenía una parte de opinión subjetiva y otra de análisis de dibujos realizados por los alumnos. Los resultados muestran una preferencia

subjetiva por las flechas frente a las etiquetas o el sombreado. Sin embargo, el análisis de los dibujos muestra un mayor uso de las etiquetas y una mayor intención de mostrar cambios en los valores de las variables que de resaltar (como sombreado). Algunos resultados pueden ser generalizables, como el uso de etiquetas de identificadores. Sin embargo, es necesario realizar estudios adicionales para confirmarlo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración de Natalia Esteban Sánchez y Belén Sáenz Rubio en la sesión de evaluación.

REFERENCIAS

- [1] R. Baecker, y B. Price, "The early history of software visualization," en *Software Visualization*, J. Stasko et al., Eds. Cambridge, MA: MIT Press, 1998, pp. 29-34.
- [2] C.D. Hundhausen, S.A. Douglas, y J.T. Stasko, "A metastudy of algorithm visualization effectiveness," *Journal of Visual Languages and Computing*, vol. 13, no. 3, pp. 259-290, 2002.
- [3] T. Naps, G. Roessling, V. Almström, W. Dann, R. Fleischer, C. Hundhausen, A. Korhonen, L. Malmi, M. McNally, S. Rodger, y J.Á. Velázquez-Iturbide, "Exploring the role of visualization and engagement in computer science education," *SIGCSE Bulletin*, vol. 35, no. 2, pp. 131-152, junio 2003.
- [4] J.Á. Velázquez-Iturbide, D. Redondo-Martín, C. Pareja-Flores y J. Urquiza-Fuentes, "An instructor's guide to design web-based algorithm animations," en *Advances in Web-Based Learning - ICWL 2007*, H. Leung, F. Li, R. Lau y Q. Li, Eds. Springer-Verlag, LNCS 4823, 2008, pp. 440-451.
- [5] J. Stasko, J. Domingue, M.H. Brown, y B.A. Price, *Software Visualization*, Eds. Cambridge, MA: MIT Press, 1998.
- [6] B. Price, R. Baecker, e I. Small, "An introduction to software visualization," en *Software Visualization*, J. Stasko et al., Eds. Cambridge, MA: MIT Press, 1998, pp. 3-27.
- [7] J. Bertin, *Semiology of Graphics*, Madison, WI: University of Wisconsin Press, 1983.
- [8] M.H. Brown, y J. Hershberger, "Fundamental techniques for algorithm animation displays," en *Software Visualization*, J. Stasko et al., Eds. Cambridge, MA: MIT Press, 1998, pp. 81-101.
- [9] J.Á. Velázquez-Iturbide, O. Dehdi, N. Esteban-Sánchez, y C. Pizarro, "GreedEX: A visualization tool for experimentation and discovery learning of greedy algorithms," *IEEE Transactions on Learning Technologies*, vol. 6, no. 2, pp. 130-143, abril-junio 2013.
- [10] S.A. Douglas, D. McKeown, C.D. Hundhausen, "Exploring human visualization of computer algorithms," en *Proc. 1996 Graphics Interface Conference*, Toronto, Canadá, 1996, pp. 9-16.
- [11] L. Ford, "How programmers visualize programs," en *Empirical Studies of Programmers: Fifth Workshop*, Englewood: Lawrence Erlbaum, 1993, pp. 224.
- [12] J. Sajaniemi, M. Kuittinen, y T. Tikansalo, "A study of the development of students' visualizations of program state during an elementary object-oriented programming course," *ACM Journal on Educational Resources in Computing*, vol. 7, no. 4, artículo 3, enero 2008.
- [13] T. Hübscher-Younger, y N.H. Narayanan, "Dancing hamsters and marble statues: Characterizing student visualizations of algorithms," en *Proc. 2003 ACM Symposium on Software Visualization*, pp. 95-104.
- [14] A.W. Lawrence, *Empirical Studies of the Value of Algorithm Animation in Algorithm Understanding*, tesis doctoral, Georgia Institute of Technology, 1993.
- [15] J.Á. Velázquez-Iturbide, "Using textbook illustrations to extract design principles for algorithm visualizations," en *Handbook of Human Centric Visualization*, W. Huang, Ed. New York: Springer Science+Business Media, 2013, pp. 227-249.