



## ***Tras las huellas de la computación cuántica Sur les traces du informatique quantique***

*Por Alejandro Díaz-Caro\**

Soy de Paraná, bueno, nací en Corrientes, pero me crié y realicé mis estudios primarios y secundarios en Paraná, Entre Ríos. La primaria la hice mitad en una escuela del estado, la Escuela Normal de Paraná y mitad en una privada, la Escuela Don Bosco. La secundaria la hice en una escuela técnica del estado: E.E.T. N° 1. Mi interés por la matemática comenzó en la escuela secundaria. Había una profesora, Graciela Mattiacci, en primer año, que insistía a los alumnos para que se anotaran a las olimpiadas matemáticas. La verdad que la mayoría nos anotamos sin tener idea de que se trataba. Como me fue bien en la primera instancia, continué, y ahí descubrí que realmente me gustaba resolver problemas, los cuales eran más de ingenio o pensamiento lateral que de saber teoría. Otro gran incentivo vino de parte de una profesora de historia, Elda Peralta, que por motu proprio coordinaba e incentivaba la participación en las ferias de ciencias. Creo que ese tipo de actividades orientadas a jóvenes desde la escuela, o mejor dicho, desde algunos docentes, ayudan mucho a que uno descubra su interés por la investigación. Yo participé junto a algunos amigos en las ferias de ciencias, con trabajos de electrónica, lo cual era mi especialidad en la escuela, y guiados por una profesora de historia! Ella nos enseñó cómo hacer un informe del proyecto que habíamos realizado, como escribir el “paper”, podríamos decir. La escuela, a pesar de no contar con demasiados medios, apostó por nosotros, dándonos un aula y permitiéndonos quedarnos fuera de hora, e incluso pasar noches allí trabajando. Quizá la falta misma de un especialista que nos guiara era parte de lo que nos entusiasmaba: teníamos total libertad para desarrollar lo que quisiéramos, y teníamos a la profesora con quien sabíamos que podíamos contar. He conocido en diferentes escuelas, profesores con ese tipo de empuje y entusiasmo, que desinteresadamente dedican su tiempo personal a la promoción de la ciencia. Hacen un trabajo extremadamente valioso, pero a veces no tienen el crédito y reconocimiento que se merecen.

Hice mi carrera de grado en la Universidad Nacional de Rosario. La verdad es que cuando estaba buscando una carrera a seguir, no sabía que había diferentes carreras en informática. Me inscribí en Licenciatura en Ciencias de la Computación (LCC), porque era la carrera de informática que se dictaba allí. Desde el comienzo la carrera resultó extremadamente estimulante, muy orientada a la investigación, con docentes a la vez comprometidos y pedagógicos. La carrera, a diferencia de otras carreras de LCC en el país, contaba en aquella época con muy pocos doctores e investigadores propios (realidad que ha cambiado mucho en los últimos años, ya que numerosos egresados se han doctorado y vuelto, o incluso algunos se han doctorado allí mismo). En ese entonces era aún una carrera en formación que tomaba la mayor parte de su cuerpo docente de la Licenciatura en Matemática. Eso creo que le dio a Rosario un plus. Por un lado, el tener tantos docentes de matemática hace que los límites entre las ciencias de la computación y la matemática a veces se diluyan completamente. Por otro lado, el ser una carrera con un cuerpo docente propio reducido, le daba un toque de familiaridad y solidaridad, que no creo que sea tan común de encontrar. Las clases siempre comenzaban en el bar de la facultad, continuaban formalmente en el aula, y seguían en el bar. Esa cercanía única con los



docentes, hasta el grado de compartir incluso asados y salidas, era una experiencia extremadamente rica, que, por ejemplo, nunca he visto durante mi estadía en Francia. Tal cercanía hacía que sea muy fácil animarse a preguntar lo que no se entendía, o exigir saber más sobre un tema. A modo de ejemplo, me fascinó la manera en que Análisis Matemático IV, que de por sí es extraño que exista tanto análisis matemático en LCC, se fue transformando en álgebra, cubriendo temas que no estaban contemplados en otras materias, como teoría de categorías, un concepto fundamental en las ciencias de la computación teórica, que hasta ese entonces no se dictaba. Fue una profesora de matemática, Gabriela Argiroffo, quien oyendo las necesidades reales de LCC, fue mutando esa materia hasta convertirla en álgebra. Con el tiempo se aprobó un nuevo plan de estudio que ‘sinceró’ los nombres de las materias con sus contenidos.

En mi caso particular, ya tenía claro que quería ser investigador. La experiencia de las ferias de ciencia fue un detonante, y en mi familia ya había investigadores: mi abuelo fue investigador del CONICET, tengo dos tíos haciendo investigación en EE.UU., y mi madre fue becaria del CONICET. Sin embargo en mi casa nunca me empujaron hacia la investigación (y personalmente no recomiendo a nadie que empuje a otro a nada, las cosas deben venir por interés propio). Lo que no tenía idea, era qué investigar. A mediados de la carrera, empecé a preocuparme seriamente por eso, y buscar por internet noticias de cosas que me resultaran interesantes. Así me topé con la computación cuántica, tema que ya algún profesor había mencionado al pasar.

La computación cuántica es un nuevo paradigma de computación, basado fuertemente en la física cuántica. Un algoritmo cuántico, se puede pensar como la descripción formal de un experimento físico, por lo cual sirve de modelo para la física cuántica, y a la vez, provee una aceleración en la resolución de problemas netamente computacionales. Comencé a estudiar esta área por mi cuenta, y seis meses después de haber comenzado, cuando ya tenía una idea (muy básica) sobre de qué se trataba, tuve la fortuna de que Manuel Gadella, un investigador de la Universidad de Valladolid, vino a Rosario invitado por Mario Castagnino, un físico de la UNR. Manolo dio un curso introductorio a la computación cuántica de unas cinco o seis clases. Durante ese curso, surgió una pregunta para la cual no tuvo respuesta, y como buen docente, la misma fue: “si querés lo investigamos juntos”. Así realizamos una pequeña investigación que terminó en un reporte técnico publicado por la universidad, y luego en un poster en un workshop realizado en Córdoba. Por supuesto mi tesis de grado la hice dirigido por Manolo, y conté con la co-dirección de Pablo ‘Fidel’ Martínez-López, un cientista de la computación de La Plata (actualmente en la universidad de Quilmes), que venía a dar clases a Rosario bastante seguido. El tema: pues una mezcla entre la especialidad de Manolo, física cuántica, y la de Fidel, cálculo lambda.

Al terminar la licenciatura, comencé a buscar dónde hacer un doctorado en computación cuántica. En Argentina, en aquel entonces, sólo sabía de Juan Pablo Paz, un físico de la UBA respetado y reconocido mundialmente en computación cuántica, quien estaba comenzando a armar un grupo de investigación en el tema. Sin embargo, al ser físico, la problemática en la que se interesaba y los métodos que utilizaba eran muy alejados de lo que yo podría hacer como cientista de la computación. Por lo tanto, para seguir con esta área que tanto me había fascinado, debía pensar en emigrar. Debo haber enviado más de 100 emails a diferentes



grupos en el mundo entero, desde Canadá hasta Australia. Finalmente uno me recomendó a otro que me recomendó a otro, y así di con Pablo Arrighi, quien había desarrollado una extensión al cálculo lambda, pensada para la computación cuántica. Vine a Francia invitado por el grupo de computación cuántica de Orsay, y el grupo de Grenoble donde estaba Pablo. Luego de esa visita, obtuve una Allocation Ministérielle de Recherche del gobierno francés para realizar mi doctorado en la Université de Grenoble, bajo la dirección de Pablo Arrighi.

El objetivo de mi doctorado era sentar las bases formales para desarrollar una lógica cuántica fuertemente fundamentada por la computación cuántica. La computación cuántica tiene su origen en la física, y más precisamente en el físico estadounidense Richard Feynman, quien en 1981 dedicó una charla en el Massachusetts Institute of Technology (MIT) al problema de la simulación de la física cuántica con computadoras clásicas. Sus ya célebres palabras finales resumen su frustración de ese entonces:

*“Y no estoy contento con todos los análisis que toman sólo la teoría clásica, porque la naturaleza no es clásica, maldita sea, y si quieren hacer una simulación de la naturaleza, deberían hacerla cuánticamente, y por dios que es un problema grandioso, porque no parece tan fácil. Gracias”<sup>1</sup>*

Esta provocación, lejos de plantear soluciones, abrió las puertas a interrogantes nunca antes concebidos. ¿Qué ganancia se lograría si las computadoras fuesen regidas por las leyes de la mecánica cuántica? Fueron los algoritmos de Lov Grover y Peter Shor, a mediados de los 90s, los cuales despertaron el gran interés desde las ciencias de la computación en este nuevo paradigma. El primero es un algoritmo que provee una ganancia cuadrática en la ‘velocidad’ que resuelve un problema en particular, en comparación con cualquier algoritmo clásico. El segundo, incluso más impresionante, tiene una ganancia exponencial respecto a su contrapartida clásica.

Comprender realmente de dónde viene esta ganancia, es aún un problema abierto. Como lo escribiera John Preskill:

*“Siento que aún falta una comprensión profunda de por qué los algoritmos cuánticos funcionan. Sin duda el poder de las computadoras cuánticas tiene algo que ver con el enredo, el paralelismo cuántico y la inmensidad de los espacios de Hilbert, pero creo que debería ser posible determinar con precisión la verdadera esencia del asunto”<sup>2</sup>*

En particular, mi línea de investigación se interesa por los fundamentos lógicos detrás de la computación cuántica. En ciencias de la computación existe una correspondencia entre los lenguajes de programación y la lógica formal. Si bien ya existe una lógica cuántica, desarrollada de manera ad-hoc en los años 30s siguiendo las ‘reglas’ dadas por la física, esta fue propuesta muchos años antes de la computación cuántica, por lo que

---

1 And I'm not happy with all the analyses that go with just the classical theory, because nature isn't classical, dammit, and if you want to make a simulation of nature, you'd better make it quantum mechanical, and by golly it's a wonderful problem, because it doesn't look so easy. Thank you.

2 I feel that a deep understanding of why quantum algorithms work is still lacking. Surely the power of quantum computers has something to do with entanglement, quantum parallelism, and the vastness of Hilbert space, but I think that it should be possible to pinpoint more precisely the true essence of the matter.



encontrar dicha correspondencia no es trivial. El objetivo final de mi investigación es poder relacionar la computación cuántica, a través de esa correspondencia entre lógica y programas, con una lógica cuántica, quizá definiendo una nueva lógica en el camino, pero fundamentada por el formalismo de la computación cuántica. Mi tesis introduce una clase de lenguajes de programación llamados ‘vectoriales’, más precisamente, un ‘sistema de tipos’ para un lenguaje creado por Pablo Arrighi y Gilles Dowek, en los cuales se pueden expresar los algoritmos cuánticos. Es un primer paso necesario hacia esa formalización que estamos buscando.

Durante el doctorado, encontramos muchas conexiones con lógica lineal, una lógica definida por Jean-Yves Girard a fines de los años 80, y de la cual han surgido varios grupos de investigación en todo Francia y otros países para investigar sus consecuencias. Para mi primer postdoc (en el cual estoy actualmente), escribimos un proyecto para explorar más a fondo esas conexiones, junto con Michele Pagani, un experto en lógica lineal, y Gilles Dowek, un experto en computación cuántica y lógica en general. Este postdoc lo estoy realizando en la Université Paris 13, dentro del grupo “Logique, Calcul et Raisonnement”, casi netamente constituido por especialistas en lógica lineal. La financiación nos la otorgó la región Île-de-France, a través de un consorcio de universidades llamado DIGITEO. Uno de los primeros resultados fue un trabajo que realicé con Barbara Petit (de la Università di Bologna) el cual fue aceptado en WoLLIC, un workshop internacional que este año se realiza en Buenos Aires, organizado por la UBA. Esta será una gran oportunidad para conocer a los investigadores en lógica de Argentina.

Tengo intenciones de volver a Argentina, a continuar haciendo investigación desde allí. De hecho, hace muy poquito envié mi postulación para ingresar a la carrera del CONICET. La idea es radicarme en Buenos Aires, integrando el grupo de Lógica y Lenguajes de la UBA, con la dirección de Eduardo Bonelli, quien además fue uno de los jurados de mi tesis. Como es de esperarse, pienso continuar con mi tema de investigación hacia una lógica cuántica.

Con respecto a las posibles interacciones, en Argentina hay expertos en lógica (y más precisamente en teoría de tipos). Conozco grupos en Buenos Aires y en Córdoba especialmente, aunque también hay investigadores en otros puntos del país a quienes aún no conozco y espero hacerlo durante mi visita a Buenos Aires. En computación cuántica, en cambio, sólo tengo conocimiento del grupo de Juan Pablo Paz, en el departamento de física de la UBA, y un grupo en Córdoba, también de físicos. Sin embargo, en Brasil existen varios grupos interesados en computación cuántica y lenguajes de programación, y también en Uruguay hay algunos investigadores en el área, por lo tanto, se podría pensar en crear algún tipo de red. De todas maneras, si bien el fin último y la motivación de esta línea de investigación se encuadran dentro de la computación cuántica, los métodos utilizados pertenecen más a la comunidad de lógica, la cual sí tiene más desarrollo en el país.

Por otra parte, la mayor parte de los investigadores en lógica de Argentina tienen contacto con Francia, ya que Francia tiene una larga tradición en este campo. En particular, hace muy poco se creó un Laboratorio



Internacional Asociado, INFINIS<sup>3</sup>, el cual es un convenio entre la UBA/CONICET y la Université Paris Diderot/CNRS, que está dedicado a las ciencias de la computación teórica, con un fuerte énfasis en lógica.

Asimismo, hay una creciente comunidad interesada en lógica y computación cuántica, liderada por la universidad de Oxford, y con investigadores de diversos lugares del mundo, como Dalhousie University en Canadá, la Universidad de Pensylvania de EE.UU., Telecom Paris-Tech y unos cuantos grupos pertenecientes al equipo QuPA (Quantum in Paris), la Université de Grenoble, etc. El contacto con esta comunidad es indispensable para continuar con mi investigación.

Para finalizar, quiero dejar una reflexión acerca de la investigación básica o fundamental. Mi línea de investigación es puramente teórica. Las aplicaciones de la investigación fundamental son muchas veces muy difíciles de concebir tempranamente. Se puede argumentar que una computadora cuántica puede resolver rápidamente problemas que a una computadora clásica le tomaría años, o que la criptografía cuántica podrá mejorar la seguridad en las transacciones virtuales en un futuro, o incluso la teleportación cuántica, que siendo muy futuristas (y optimistas) podríamos hacer alguna exagerada referencia al Capitán Spock. Sin embargo, yo me intereso principalmente en la lógica cuántica, que si bien tiene muchas aplicaciones hacia las ciencias de la computación (como la verificación de correctitud de programas, o la demostración automática de teoremas), al no existir una computadora cuántica aún, lo convierte en investigación fundamental. Conocer los fundamentos de la computación cuántica nos puede brindar una herramienta para entender mejor los fundamentos mismos de la mecánica cuántica. Y ahí debo detenerme, porque tratar de determinar qué ventajas nos podría dar ese conocimiento, sería entrar en el campo de la especulación.

Por un lado, podemos simplemente decir que esta área no tiene una aplicación a la vista, tangible, rápida, y compararla con otros campos de investigación básica, dentro de la física teórica, la filosofía, o la matemática, donde lo importante es avanzar en el conocimiento, para luego ver qué ventajas nos pueden brindar. Pero por otro lado, en particular la computación cuántica tiene una promesa de aplicación a futuro, y es precisamente en computación, un área declarada de interés por el Ministerio de Ciencia y Tecnología argentino. De todas maneras, yo prefiero el primer enfoque, ya que aún si la construcción de una computadora cuántica se demostrara inviable en un futuro, la investigación en computación cuántica se puede considerar como una nueva manera de “entender” la física, con métodos propios de la ciencia de la computación.

---

*\* Alejandro Díaz Caro es Licenciado en Ciencias de la Computación de la Universidad Nacional de Rosario y Doctor en Informática de la Université de Grenoble. Realizó una investigación postdoctoral sobre lógica y no determinismo en la Université Paris 13, y actualmente es docente e investigador en la Université Paris Ouest Nanterre.*

*Alejandro Díaz Caro est Licencié en Sciences Informatiques de l'Université Nationale de Rosario et Docteur en Informatique de l'Université de Grenoble. Il a mené une recherche postdoctorale sur la logique et le non-déterminisme à l'Université Paris 13, et est actuellement chargé de cours et chercheur à l'Université Paris Ouest Nanterre.*