**Efecto del gen *GPC-B1* sobre las concentraciones de Fe, Zn y Se en el grano de trigo**

**Tabbita Facundo1,2**

1Instituto de Recursos Biológicos, Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias, INTA. Hurligham, Bs. As..

2Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Cátedra de Genética, CABA, Bs. As.

E-mail: tabbita.facundo@inta.gob.ar

El trigo es un alimento base de la nutrición humana, principalmente en los países en desarrollo, aportando un quinto de las calorías que se consumen diariamente a nivel mundial. Este cereal, también aporta el 25% de proteínas consumidas diariamente, siendo también una fuente de micronutrientes tales como Fe y Zn (Tabbita et al. 2017). Según la Wheat Initiative (http://www.wheatinitiative.org/), hacia el 2050 la demanda de este cultivo se incrementará en un 60% debido a un incremento en la población mundial que alcanzará los 9 mil millones de habitantes. En consecuencia, un mejoramiento de la calidad nutricional puede tener un impacto directo en la calidad de la dieta y seguridad alimentaria a nivel local y global. En este sentido, es importante destacar esfuerzos internacionales iniciados con la finalidad de obtener germoplasma biofortificado, como por ejemplo, la iniciativa Harvest Plus (www.harvestplus.org). Sin embargo, a pesar de su importancia, el mejoramiento genético de la calidad en trigo es dificultoso debido al gran tamaño del genoma y su naturaleza poliploide (16.000 Mb en trigo hexaploide) que obstaculizan los estudios genómicos convencionales, la baja variabilidad genética para contenido de proteínas en grano (CPG) y micronutrientes en los trigos modernos, la existencia de una correlación negativa entre proteína y rendimiento y el impacto del ambiente en este carácter que dificulta la selección (Barneix 2007).

La utilización de especies silvestres emparentadas al trigo actualmente se utiliza como estrategia para la identificación de fuentes de variación en el CPG, micro y macro nutrientes. El gen *GPC-B1* (Grain Protein Content-B1), proveniente del trigo silvestre, *Triticum turgidum* var. *dicoccoides* es el ejemplo más concreto. La introgresión de este gen, perdido durante la domesticación, en cultivares tetraploides y hexaploides modernos determinó incrementos significativos en la CPG, Fe y Zn (Tabbita et al. 2017). El clonado posicional de *GPC-B1* reveló que dicho gen codifica para un factor de transcripción denominado NAC y que pertenece a una familia con numerosos miembros en todas las especies de plantas. Los genes NAC juegan importantes roles en el proceso de senescencia de la hoja (Uauy et al.2006a). Específicamente en trigo, el gen *GPC-B1* es parte de una familia multigénica denominada GPC; mientras que el trigo tetraploide presenta una copia ortóloga y dos copias parálogas, el trigo hexaploide presenta dos copias ortólogas y tres parálogas (Uauy et al. 2006b). A diferencia de *GPC-B1*, las restantes copias se encuentran funcionales en los trigos modernos. En la tabla 1 puede observarse la distribución de los alelos *GPC-B1* en diversas accesiones, cultivares comerciales y especies emparentadas al trigo. Los resultados indicaron que en la mayoría de los cultivares modernos el gen *GPC-B1* se encuentra mutado (no funcional) o delecionado.

**Tabla 1.**Distribución de los alelos del gen *GPC-B1*.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | ***Alelo GPC-B1*** | | |  |
| **Referencia** | **Especie** | | **Funcional** | **No-funcional\*** | **Comentarios** |
| Uauy et al., 2006b | *T. tu.* var*. dicoccoides* | | 42 | 0 | Accesiones salvajes |
|  | *T. tu.* ssp. *dicoccum* | | 17 | 2 | Emmer domesticado |
|  | *T. tu.* ssp. *durum* | | 0 | 57 | Variedades cultivadas |
|  | *T. ae.* ssp. *aestivum* | | 0 | 34 | Accesiones y variedades |
| Distelfeld et al., 2006 | *T. tu.* ssp. *durum* | | 0 | 39 | Variedades cultivadas |
|  | *T. ae.* ssp. *aestivum* | | 0 | 78 |
| Asplund et al., 2010 | *T. ae.* ssp. *aestivum* | | 2 | 47 | Variedades históricas exhibidas en Londres 1862 |
|  | *T. ae.* ssp. *spelta* | | 2 | 5 |
|  | *T. ae.* ssp. *compactum* | | 0 | 1 |
|  | *T. tu.* ssp. *durum* | | 0 | 2 |
|  | *T. tu.* ssp. *turgidum* | | 0 | 2 |
|  | *T. tu.* ssp. *dicoccum* | | 0 | 1 |
| Hagenblad et al., 2012 | *T. ae.* ssp. *aestivum* | | 5 | 362 | Panel mundial |
|  | *T. ae.* ssp. *aestivum* | | 46 | 92 | Variedades siglo XIX y XX (Rusia, Canadá, Mongolia, Japón y Escandinavia) |
|  | *T. ae.* ssp. *spelta* | | 5 | 17 |  |

\* No funcionales por mutación o deleciones completas del gen.

Numerosos estudios han caracterizado y cuantificado el efecto de la introgresión del gen *GPC-B1* en el contenido de proteínas, micro y macro nutrientes en el grano en cultivares modernos. El objetivo de la presentación tiene como fin resumir los trabajos que mencionan al gen *GPC-B1* y sus efectos sobre la calidad nutricional y parámetros de rendimiento.

Un total de 25 estudios han informado acerca del gen *GPC-B1*; 11 en trigo candeal y 14 en trigo pan incluyendo numerosos fondos genéticos a través de 40 localidades distintas distribuidas en 7 países. En la figura 1 se detallan las distintas localidades en donde se evaluaron los efectos del gen *GPC-B1*.

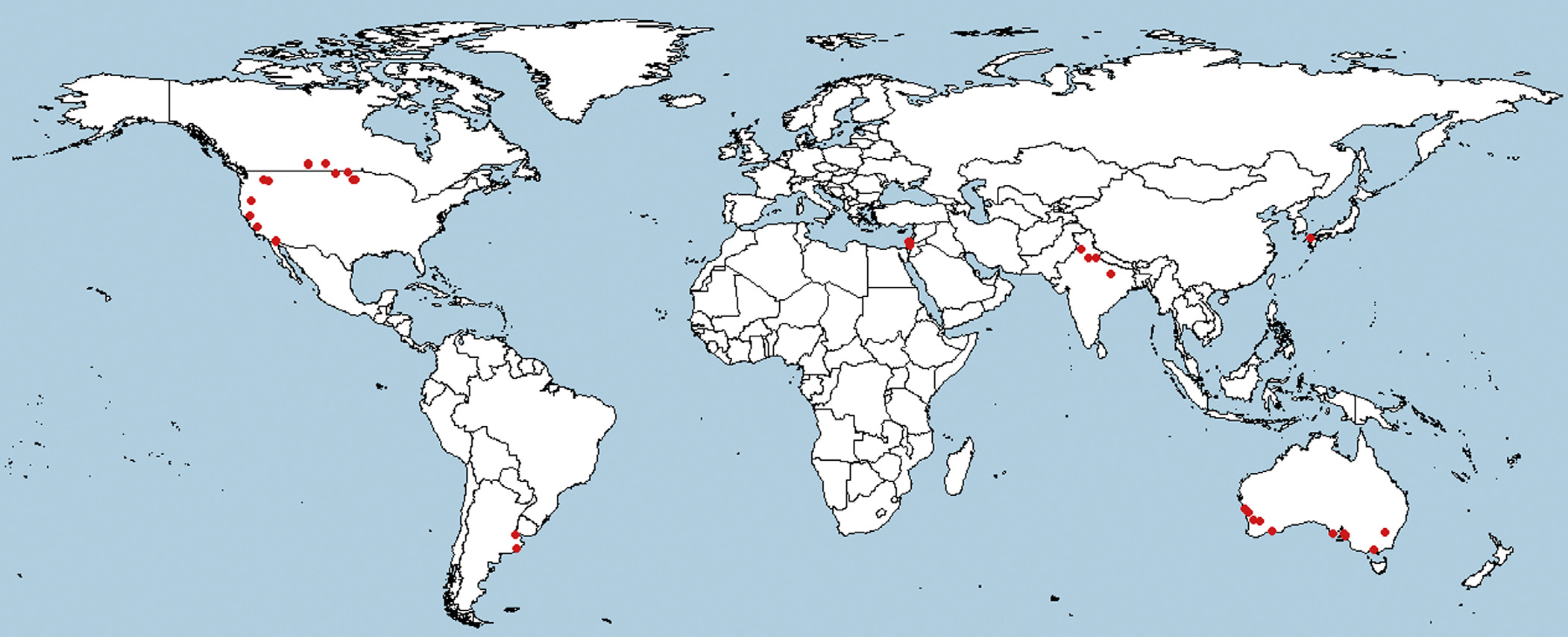


Fig. 1. Localización de los ensayos a campo que analizan los efectos del gen *GPC-B1*. Los ensayos se realizaron en los siguientes países: Argentina, Australia, Canadá, EEUU, India, Israel y Japón.

En la tabla 2 se observan los principales resultados de los efectos del gen *GPC-B1* en parámetros relacionados con la calidad nutricional y parámetros agronómicos relacionados con el rendimiento para tirgo pan y trigo candeal respectivamente. Es importante mencionar que el estudio de los componentes de rendimiento es de gran importancia ya que los actuales programas de mejoramiento priorizan aquellas líneas que no sufren mermas asociadas a la incorporación de nuevas fuentes de variabilidad. Resumidamente y en términos generales, la introgresión del gen *GPC-B1* incrementa significativamente el contenido de proteínas, Fe y Zn en el grano sin afectar el rendimiento. Específicamente para Fe y Zn, cinco estudios cuantificaron la concentración de estos elementos y en el 95% de las líneas portadoras del gen *GPC-B1* se observaron incrementos significativos en el contenido de Fe (en promedio 12,5 mg kg-1), mientras que el 93% de las líneas *GPC-B1* mostró incrementos significativos en el contenido de Zn (en promedio 11,6 mg kg-1). Se observó también una correlación positiva entre el CPG y los contenidos de Fe y Zn. A su vez, la correlación entre los contenidos de Fe y Zn también fue positiva, indicando que los mecanismos de translocación de estos elementos se comparten o superponen.

Se informó también que el alelo *GPC-B1* estuvo asociado con incrementos significativos de otros elementos en el grano tales como Mn, Ca, Mg, P y S.

Respecto al Se, si bien hay estudios que cuantifican su contenido en diversos cultivares bajo distintos tratamientos, no hay informes disponibles que lo relacionen con la introgresión del gen *GPC-B1*. Actualmente, nuestro grupo de trabajo tiene como objetivo cuantificar el contenido de elementos, entre ellos el Se, en cultivares comerciales y pre-comerciales.

**Tabla 2.** Cantidad de estudios, medias (x), rangos, tamaño de la muestra (n) y respectivos porcentajes (significancia 5%) para incrementos (↑), reducciones (↓) o efectos no significativos (NS) del gen *GPC-B1* en 10 parámetros agronómicos. Cada unidad “n” representa una comparación entre línea *GPC-B1* y respectivo control.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | ***T. aestivum*** | | | | | | | | | |  | ***T. turgidum*** | | | | | | | | | |
| **Parámetros calidad** | Nº estudios |  | **↑** | |  | **↓** | |  | **NS** | |  | Nº estudios |  | **↑** | |  | **↓** | |  | **NS** | |
| CPG (g kg-1) | 14 | x (rango) | **22.9** | **(2.1-72)** |  |  |  |  |  |  |  | 11 | x (rango) | **15.5** | **(6-40)** |  |  |  |  |  |  |
|  |  | *n* (%) | 97 | (90%) |  |  |  |  | 11 | (10%) |  |  | *n* (%) | 18 | (95%) |  |  |  |  | 1 | (5%) |
| Rto. Prot. (kg ha-1) | 5 | x (rango) | **49.7** | **(22.9-83)** | | **-0.4** | |  |  |  |  | 2 | x (rango) | **144** |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  | *n* (%) | 8 | (27%) |  | 1 | (3%) |  | 21 | (70%) |  |  | *n* (%) | 3 | (43%) |  |  |  |  | 4 | (57%) |
| Fe (mg kg-1) | 3 | x (rango) | **13.1** | **(2.3-24.2)** | | **-0.2** | **(-0.2)** |  |  |  |  | 2 | x (rango) | **6.6** | **(5-8.2)** |  |  |  |  |  |  |
|  |  | *n* (%) | 38 | (95%) |  | 1 | (3%) |  | 1 | (3%) |  |  | *n* (%) | 2 | (100%) |  |  |  |  |  |  |
| Zn (mg kg-1) | 3 | x (rango) | **11.8** | **(2.4-27.7)** | |  |  |  |  |  |  | 2 | x (rango) | **6.4** | **(5.5-7.4)** |  |  |  |  |  |  |
|  |  | *n* (%) | 37 | (93%) |  |  |  |  | 3 | (8%) |  |  | *n* (%) | 2 | (100%) |  |  |  |  |  |  |
| **Parámetros Rto.** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Rendimiento (kg ha-1) | 10 | x (rango) | **399** | **(164-634)** |  | **-221** | **(-363 - -166)** | |  |  |  | 5 | x (rango) |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  | *n* (%) | 17 | (19%) |  | 4 | (4%) |  | 70 | (77%) |  |  | *n* (%) | 0 | (0%) |  |  |  |  | 7 | (100%) |
| Peso mil granos (g) | 11 | x (rango) | **4.4** | **(0.8-7.3)** |  | **-2.2** | **(-5.7 - -0.7)** | |  |  |  | 7 | x (rango) | **3.3** | **(3.3)** |  | **-2.3** | **(-3 - -1.2)** | |  |  |
|  |  | *n* (%) | 44 | (45%) |  | 23 | (23%) |  | 31 | (32%) |  |  | *n* (%) | 1 | (8%) |  | 3 | (23%) |  | 9 | (69%) |
| Senescencia (días) | 6 | x (rango) | **4.5** | **(2-8)** |  | **-3.1** | **(-9 - -1.4)** | |  |  |  | 4 | x (rango) |  |  |  | **-3.9** | **(-4.5 - -3)** | |  |  |
|  |  | *n* (%) | 13 | (25%) |  | 12 | (23%) |  | 28 | (53%) |  |  | *n* (%) |  |  |  | 7 | (100%) |  |  |  |
| Espigas (m-2) | 5 | x (rango) | **53.1** | **(53.1)** |  |  |  |  |  |  |  | 1 | x (rango) |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  | *n* (%) | 20 | (40%) |  |  |  |  | 30 | (60%) |  |  | *n* (%) |  |  |  |  |  |  | 3 | (100%) |
| Espiguillas espiga-1 | 3 | x (rango) | **2.6** | **(1.5-4.5)** |  | **-2.1** | **(-5.5 - -1)** | |  |  |  | 1 | x (rango) |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  | *n* (%) | 8 | (18%) |  | 17 | (39%) |  | 19 | (43%) |  |  | *n* (%) |  |  |  |  |  |  | 3 | (100%) |
| Granos espiga-1 | 4 | x (rango) | **5.7** | **(3.2-8.5)** |  |  |  |  |  |  |  | 1 | x (rango) |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  | *n* (%) | 9 | (31%) |  |  |  |  | 20 | (69%) |  |  | *n* (%) |  |  |  |  |  |  | 3 | (100%) |

CPG: Contenido de Proteína en Grano. Para mayor detalle ver Tabbita et al. 2017.

**Conclusiones**

La recopilación de la información relacionada al gen *GPC-B1* de los últimos 10 años confirma que está asociado con incrementos significativos en el contenido de Fe, Zn, CPG y otros nutrientes en una amplia variedad de cultivares, fondos genéticos y ambientes diversos. Estos incrementos no solo se asocian a una mayor calidad nutricional sino que también a una mayor calidad industrial. En lo que respecta a rendimiento, no se han observado efectos negativos de gran magnitud. Debido a que la copia funcional del alelo *GPC-B1* se encuentra mutada o delecionada en la mayoría de los cultivares modernos su introgresión en los programas de mejoramiento tiene gran potencial de incrementar la calidad nutricional e industrial en un amplio rango de variedades.

**Referencias**

Asplund, L., Hagenblad, J., Leino, M.W., 2010. Re-evaluating the history of the wheat domestication gene NAM-B1 using historical plant material. J. Archaeol. Sci. 37, 2303e2307.

Barneix, A.J., 2007. Physiology and biochemistry of source-regulated protein accumulation in the wheat grain. J. Plant Physiol. 164, 581e590.

Distelfeld, A., Uauy, C., Fahima, T., Dubcovsky, J., 2006. Physical map of the wheat high-grain protein content gene *Gpc-B1* and development of a high-throughput molecular marker. New Phytol. 169, 753e763.

Hagenblad, J., Asplund, L., Balfourier, F., Ravel, C., Leino, M.W., 2012. Strong presence of the high grain protein content allele of NAM-B1 in Fennoscandian wheat. Theor. Appl. Genet. 125, 1677e1686.

Tabbita F, Pearce S, Barneix A. Breeding for increased grain protein and micronutrient content in wheat: Ten years of the *GPC-B1* gene. Journal of Cereal Science 73 (2017) 183e191

Uauy, C., Brevis, J.C., Dubcovsky, J., 2006a. The high grain protein content gene *Gpc-B1* accelerates senescence and has pleiotropic effects on protein content in wheat. J. Exp. Bot. 57, 2785e2794.

Uauy, C., Distelfeld, A., Fahima, T., Blechl, A., Dubcovsky, J., 2006b. A NAC gene regulating senescence improves grain protein, zinc, and iron content in wheat. Science 314, 1298e1301.

**Facundo Tabbita**

**Figura 5.1.** Genes GPC presentes en cultivares tetraploides y hexaploides modernos. Los círculos en amarillo indican copias funcionales; la cruz roja indica mutación por inserción de una base mientras que el círculo negro indica o deleción completa del gen o misma mutación por inserción. Según corresponda, debajo de cada cromosoma se indica la denominación génica correspondiente. Un total de 57 cultivares tetraploides evaluados presentaron la mutación por inserción respecto al alelo funcional *GPC-B1* proveniente de *Triticum turgidum* var. *dicoccoides*, mientras que en 34 cultivares hexaploides el 85% presentó la deleción completa y el 15% restante la mutación por inserción (tomado y adaptado de Brevis y Dubcovsky 2010; Uauy et al. 2006b). Previamente se pensó que GPC-A2 estaba delecionado (Distelfield et al. 2012) pero recientemente se encontró una copia funcional en la variedades tetraploides y hexaploides (Pearce et al., en revisión).

Ingeniero Agrónomo (UBA) y Doctor en Ciencias Agropecuarias (UBA). Post doctorado CONICET. Actualmente se desempeña como Investigador del Instituto de Recursos Biológicos del Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias-INTA y como docente de la Facultad de Agronomía de la UBA. Sus aéreas de interés abarcan la caracterización, evaluación y desarrollo de germoplasma de trigo orientado a la biofortificación y calidad nutricional del grano.