



Análisis de la morfología de semillas de distintas especies de trigos ancestrales



Eugenia Sabrina Mendoza

**Docente tutor: Dr. Pandolfo, Claudio Ezequiel
Docentes consejeros: Dr. Presotto, Alejandro y
Dra. Ureta, María Soledad**

**Departamento de Agronomía
Marzo 2023**

Agradecimientos

Me gustaría agradecer en primer lugar a mi familia, ellos saben que son mi pilar. Siempre están para mí en las buenas y en las malas, siempre confiaron en mí.

Gracias a mi mamá y a mi papá por darme la posibilidad de estudiar en Bahía Blanca, lejos de mi casa, yo sé el esfuerzo que hacen día a día para que nunca me falte nada. Son lo más importante de mi vida y saben que los amo con todo mi corazón. Sé que esto los va a llenar de alegría y también es gracias a ustedes y a su incondicionalidad.

Quiero agradecerles a mis amigas y amigos, por ayudarme y compartir tantos momentos juntos. Sin ustedes esto no sería igual de hermoso. Gracias por los consejos, llamadas, juntadas, tardes de estudio y más. Gracias por estar siempre. Los amo.

También a todos mis profesores y profesoras. Que en este camino me ayudaron y enseñaron muchísimo. En especial a Claudio, Alejandro y Soledad. Son excelentes profesores y personas, un ejemplo a seguir.

Por último, quiero agradecer a la Universidad Nacional del Sur y al Departamento de Agronomía, a todas las personas que son parte, porque me llevo los mejores recuerdos, una educación de calidad y una de las mejores experiencias de mi vida con el intercambio a México.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	3
ÍNDICE DE TABLAS	4
RESUMEN:.....	5
INTRODUCCIÓN:	6
OBJETIVOS:.....	15
HIPÓTESIS:.....	15
MATERIALES Y MÉTODOS:	16
Análisis estadístico	18
RESULTADOS Y DISCUSIÓN:.....	19
Caracterización morfológica de las accesiones	23
Área	23
Perímetro	24
Circularidad.....	25
Cobertura del grano	26
Color del grano	27
Análisis multivariado.....	28
Einkorn	30
Emmer	32
CONCLUSIONES:	34
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	35
MATERIAL COMPLEMENTARIO:	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa del Cercano Oriente que incluye el Creciente Fértil.....	8
Figura 2: Relaciones evolutivas y genómicas entre los trigos harineros y duro cultivado y las gramíneas silvestres relacionadas, mostrando ejemplos de espigas y granos.....	9
Figura 3: Orígenes de algunas de las accesiones de semilla de trigo analizadas.	17
Figura 4: Fotografías de las semillas.....	18
Figura 5: Determinación del peso de cada accesión.	18
Figura 6: Diferencias estadísticas entre el área de las semillas según la subespecie de trigo.....	23
Figura 7: Diferencias estadísticas entre el perímetro de las semillas según la subespecie de trigo.....	24
Figura 8: Diferencias estadísticas entre la circularidad de las semillas según la subespecie de trigo.....	25
Figura 9: Análisis de componentes principales. Cada punto representa una subespecie de trigo.....	28
Figura 10: Análisis de conglomerados.....	29
Figura 11: Análisis de componentes principales.....	30
Figura 12: Análisis de conglomerados.....	31
Figura 13: Análisis de componentes principales.....	33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Especies y subespecies de trigo.....	7
Tabla 2: Germoplasma utilizado, N° de accesiones, orígenes y estado de mejora.	16
Tabla 3: Fotografías de las semillas de cada Subespecie	19
Tabla 4: Diferencias estadísticas entre grano desnudo o vestido de cada subespecie	26
Tabla 5: Diferencias estadísticas entre el color del grano de cada subespecie.....	27

RESUMEN:

En este trabajo se analizaron semillas de una colección de trigo traída del USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos), la cual cuenta con 100 ejemplares.

Con el fin de caracterizar un panel de semillas de trigos ancestrales pertenecientes a 4 especies y 16 subespecies, mediante el uso de un software de imágenes específico, para detectar diferencias que permitan su distinción y clasificación para futuros experimentos. Muchas de estas subespecies pertenecen a poblaciones de trigo silvestre, de las cuales se busca rasgos agronómicos favorables para mantener y conservar la variabilidad genética del trigo.

Observando únicamente características de las semillas se pueden diferenciar las subespecies silvestres de las cultivadas. Dentro de las cultivadas se diferencian las subespecies con grano desnudo y vestido.

Las subespecies silvestres *Dicoccoides* y *Aegilopoides* se diferenciaron estadísticamente del resto en la variable perímetro y también en el análisis de componentes principales y conglomerados.

Las subespecies *Dicoccon* y *Dicoccoides* se analizaron de forma separada para destacar las diferencias entre emmer silvestre y cultivado. Separándose de forma correcta.

En el análisis multivariado y de conglomerados se observó una clara diferenciación entre la subespecie *Monococcum* (domesticada) y *Aegilopoides* (Silvestre), einkor cultivado y silvestre.

INTRODUCCIÓN:

Trigo es el término que designa al conjunto de cereales que pertenecen al género *Triticum*, que se trata de plantas anuales de la familia de las gramíneas, ampliamente cultivadas en todo el mundo. La palabra trigo designa tanto a la planta como a sus semillas comestibles, tal como ocurre con los nombres de otros cereales. Proviene del vocablo latino *triticum*, que significa quebrado, triturado o trillado, haciendo referencia a la actividad que se debe realizar para separar el grano de trigo de la “cáscara” que lo recubre (SISA, 2021).

El trigo es uno de los tres granos más ampliamente producidos en el mundo, junto al maíz y el arroz. Este trío de cereales es la verdadera base de nuestra alimentación (entre los 3 aportan aproximadamente el 42,5% del suministro de calorías alimentarias del mundo) (SISA, 2021). La producción anual de trigo es de más de 700 millones de toneladas. Por ejemplo, en 2022, la cosecha mundial total fue de alrededor de 781 millones de toneladas en comparación con 512 millones de toneladas de arroz y 1200 millones de toneladas de maíz (FAO, 2022).

El grano del trigo es utilizado para hacer harina, harina integral, sémola, cerveza y una gran variedad de productos alimenticios. Más del 90% del trigo producido es el denominado trigo harinero o trigo pan, perteneciente a la especie *Triticum aestivum*, aunque también se utiliza la especie *Triticum turgidum* L. var. *durum* denominada trigo candeal o trigo para fideos, mayormente para la producción de pastas (SISA, 2021).

El trigo tiene un amplio rango de cultivo, desde los 67° N en Escandinavia y Rusia hasta los 45° S en Argentina, incluidas las regiones elevadas de los trópicos y subtrópicos (Feldman, 1995). No tiene rival en su rango de diversidad debido a que se ha integrado en la cultura e incluso en la religión de diversas sociedades. Actualmente, alrededor del 95% del trigo que se cultiva en todo el mundo es trigo harinero hexaploide, y la mayor parte del 5% restante es trigo duro tetraploide (Shewry, 2009).

En Argentina en la campaña 2020/21 se sembraron 6.066.123 ha de trigo declaradas, con 362 variedades. El trigo pan representó más del 97% del total sembrado en el país (SISA, 2021). En la campaña 2021/2022 se cosecharon 21,8 millones de toneladas de trigo, un récord de producción (Bolsa de Cereales, 2022).

El género *Triticum* consta de seis especies: *Triticum monococcum* L. (genoma AA); *Triticum urartu* Tumanian ex Gandilyan (genoma AA); *Triticum turgidum* L. (genoma AABB); *Triticum*

timopheevii (Zhuk.) Zhuk. (genoma AAGG); *Triticum aestivum* L. (genoma AABBDD); y *Triticum zhukovskyi* Menabde & Ericz. (genoma AAAAGG) (Tabla 1).

Estas especies se agrupan en tres secciones: Secc. Monococcon (compuesto por especies diploides); Secc Dicoccoidea (que consta de especies tetraploides); y Secc. Triticum (compuesto por especies hexaploides). De estas especies, *T. urartu* existe solo en su forma silvestre, mientras que *T. aestivum* y *T. zhukovskyi* existen sólo como formas cultivadas. Las otras especies, *T. monococcum*, *T. turgidum* y *T. timopheevii*, tienen tanto una forma silvestre como una domesticada (Matsuoka, 2011).

Tabla 1: Especies y subespecies de trigo (Adaptado de Van Slageren, 1994 y Dorofeev et al, 1978).

Sección	Especie y subespecie ¹	Clasif tradicional ²	Genoma	Nombre
Monococcon	<i>Triticum monococcum</i> L.		AA	Eikorn silvestre
	ssp. <i>aegilopoides</i> ssp. monococcum <i>Triticum urartu</i> Tumanian ex Gandilyan	<i>T. boeoticum</i> <i>T. monococcum</i> <i>T. urartu</i>	AA	Eikorn domesticado
Dicoccoidea	<i>Triticum turgidum</i> L.		AABB	Emmer silvestre
	ssp. <i>dicoccoides</i> ssp. dicoccum ssp. durum ssp. <i>polonicum</i> ssp. <i>turanicum</i> ssp. <i>turgidum</i> ssp. <i>carthlicum</i> ssp. <i>paleocolchicum</i> <i>Triticum timopheevii</i> (Zhuk.) Zhuk.	<i>T. dicoccoides</i> <i>T. dicoccum</i> <i>T. durum</i> <i>T. polonicum</i> <i>T. turanicum</i> <i>T. turgidum</i> <i>T. carthlicum</i> <i>T. karamyshevii</i>		Emmer domesticado Trigo candeal Trigo polaco Trigo Khorassan Trigo Rivet Trigo persa Trigo de Georgia
	ssp. <i>armeniacum</i> ssp. <i>timopheevii</i>	<i>T. araraticum</i> <i>T. timopheevii</i>	AAGG	Timopheevii silvestre Timopheevii domesticado
Triticum	<i>Triticum aestivum</i> L.		AABBDD	Trigo común
	ssp. aestivum ssp. compactum ssp. <i>sphaerococcum</i> ssp. <i>macha</i> ssp. spelta <i>Triticum zhukovskyi</i> Menabde & Ericz	<i>T. aestivum</i> <i>T. compactum</i> <i>T. sphaerococcum</i> <i>T. macha</i> <i>T. spelta</i> <i>T. zhukovskyi</i>		Trigo pan Trigo Club Trigo enano indio Espelta
			AAAAGG	

¹Van Slageren 1994 ²Dorofeev et al. 197

La domesticación del trigo fue fundamental en la transición del comportamiento humano de cazadores-recolectores a agricultores. Fue un evento clave en la revolución agrícola que ocurrió hace unos 10.000 años. Todas las especies de *Triticum* son nativas del 'Creciente Fértil' del Cercano Oriente, que abarca el este del Mediterráneo, el sureste de Turquía, el norte de Irak y el oeste de Irán, y sus regiones vecinas de Transcaucaso y el norte de Irán (Matsuoka, 2011) (Figura 1).

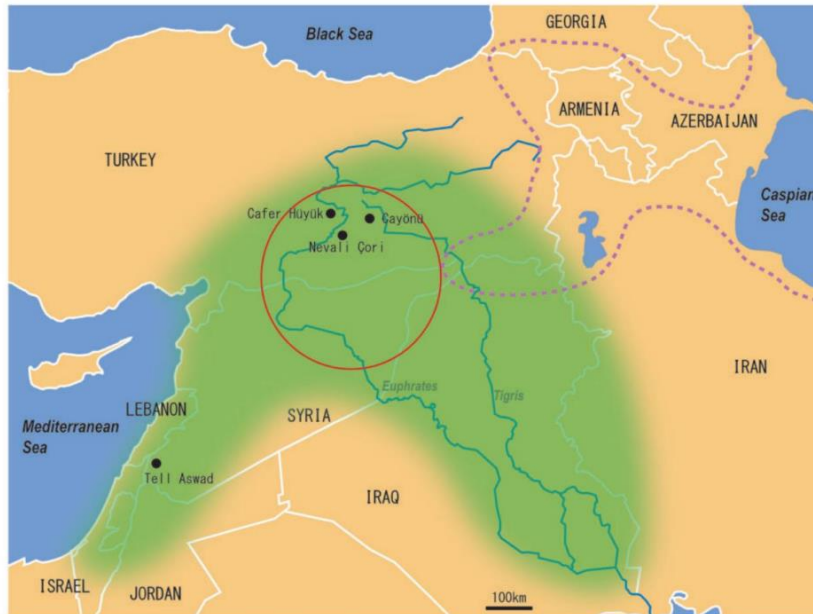


Figura 1: Mapa del Cercano Oriente que incluye el Creciente Fértil (sombreado en verde). El círculo rojo y la línea púrpura discontinua indican el área central donde se cree que surgió la agricultura (Lev-Yadun et al., 2000).

La alopoliploidización a través de la hibridación con una especie del género *Aegilops* fue la principal fuerza que condujo a la diversificación durante la evolución de las especies de *Triticum* (Tsunewaki, 2009).

Las especies diploides del genoma AA, *T. monococcum* y *T. urartu*, divergieron hace menos de un millón de años (Huang et al. 2002). Los estudios sugieren que, después de la divergencia de *T. monococcum* y *T. urartu*, las especies de genoma tetraploide AABB y AAGG evolucionaron hace menos de 0,5 millones de años a través de la hibridación entre *T. urartu* y una especie que pertenecía al linaje de las especies actuales de trigo silvestre, *Aegilops speltoides* Tausch (genoma SS). En este proceso, se cree que ocurrieron al menos dos eventos de hibridación independientes: uno asociado con el origen de *T. turgidum* (genoma AABB) y el otro con el origen de *T. timopheevii* (genoma AAGG) (Sarkar y Stebbins, 1956).

Durante el desarrollo de la agricultura en el Creciente Fértil hace 10.000 años, *T. turgidum* y *T. timopheevii* fueron domesticados y aparecieron sus formas cultivadas (Feldman 2001, Salamini et al. 2002). Después de este período, los trigos hexaploides surgieron a través de la hibridación natural entre los cultivares tetraploides y las especies diploides *Aegilops* y *Triticum*. Se cree que *T. aestivum* (genoma AABBDD) surgió a través de la hibridación de *T. turgidum* con la especie de trigo silvestre *Aegilops tauschii* Coss. (genoma DD) (Kihara 1944, McFadden y Sears, 1944) (Figura 2).

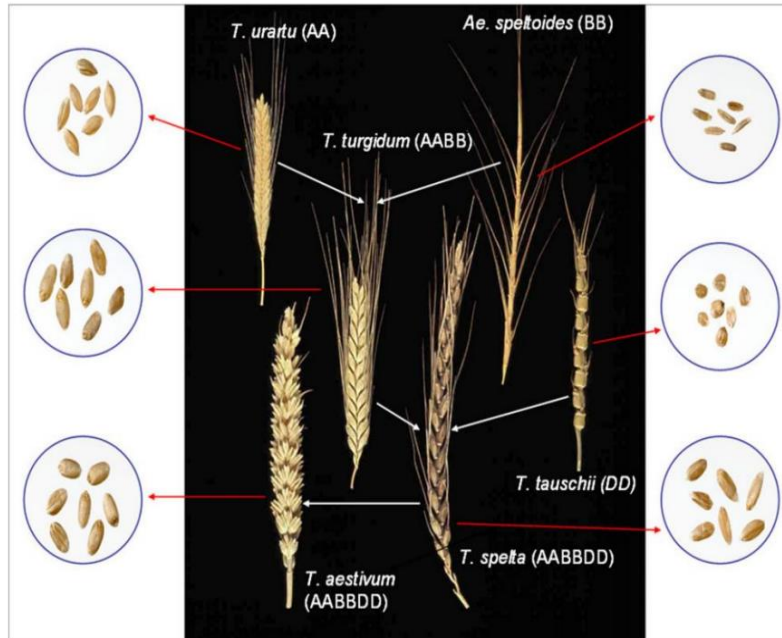


Figura 2: Relaciones evolutivas y genómicas entre los trigos harineros y duro cultivado y las gramíneas silvestres relacionadas, mostrando ejemplos de espigas y granos. Modificado de Snape y Pankva (2006).

En el trigo y otros cultivos de cereales, la primera y más crítica modificación fue la adquisición de un raquis no quebradizo, que limitaba los mecanismos naturales de dispersión de semillas de las formas silvestres y permitía a los primeros agricultores cosechar el grano de manera mucho más eficiente sin que las espiguillas cayeran al suelo prematuramente y perdiéndose. Otras modificaciones incluyeron semillas más grandes, pérdida de la latencia de las semillas, el carácter de trilla libre, mejor calidad del grano, floración sincronizada y otras (Harlan et al., 1973).

Estos rasgos y los genes que son responsables de su expresión se denominan rasgos de domesticación y genes de domesticación. Resultando formas domesticadas que dependían de los agricultores para su propagación y que permitieron el cultivo mecanizado a gran escala.

Las prácticas modernas de mejora han reducido la variabilidad genética de los trigos cultivados. La esperanza de futuras mejoras de esta planta se funda en la explotación del abundante acervo genético de las especies silvestres próximas (Feldman, 1981).

Debido a la tasa de crecimiento de la población mundial, se espera que la demanda de trigo aumente en un 40 % para 2030 (Dixon et al. 2009). Para satisfacer esta demanda, se necesita un aumento anual del rendimiento del 2 % y se debe estabilizar la cantidad de tierra agrícola.

Estas ganancias deberán venir a través de mejoras genéticas y una mayor comprensión de la biología de las plantas.

Se necesita, con urgencia, desarrollar nuevas variedades de trigo de superior rendimiento o con mejor aptitud para su cultivo en áreas donde no se cosecha aún este cereal. El esfuerzo se ve limitado por dos factores. El primero es el hecho de que el material genético de los trigos cultivados se ha explotado ya con fines de mejora casi hasta su capacidad límite. El segundo consiste en que la amplitud de variación genética de los trigos cultivados ha disminuido drásticamente en los últimos años. La rápida y continuada erosión del acervo genético del trigo no sólo reduce la posibilidad de nuevos progresos en la productividad, sino que también hace que la cosecha triguera mundial sea cada vez más vulnerable a nuevas enfermedades y a cambios climáticos adversos (Feldman, 1981).

Durante varias décadas se han seleccionado variedades nuevas y mejoradas de trigo a expensas de la variabilidad genética mundial de esta planta. Las nuevas variedades, formadas cada una por un solo genotipo, han ido reemplazando de modo continuo a las "variedades locales" tradicionales que estaban constituidas por muchos genotipos diferentes. La existencia de una amplia reserva de genes útiles en las especies silvestres próximas al trigo se hace evidente por la adaptación a ambientes muy diferentes que muestran las diversas formas silvestres. Pueden encontrarse en un amplio intervalo de regiones climáticas, desde montañas frías y húmedas hasta valles calurosos y secos, desde áreas con una precipitación anual de 1000 o más milímetros hasta regiones áridas con sólo 100 milímetros (Feldman, 1981).

En este trabajo se analizarán semillas de una colección de trigo traída del USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos), la cual cuenta con 100 ejemplares. Las especies que se encuentran son:

- *Triticum monococcum* L. subsp. *aegilopoides* (Link) Thell.
- *Triticum monococcum* L. subsp. *monococcum*
- *Triticum turgidum* L. subsp. *carthlicum* (Nevski) Á. Löve & D. Löve
- *Triticum turgidum* L. subsp. *dicoccoides* (Körn. ex Asch. & Graebn.) Thell.
- *Triticum turgidum* L. subsp. *dicoccon* (Schrank) Thell
- *Triticum turgidum* L. subsp. *durum* (Desf.) van Slageren
- *Triticum turgidum* L. subsp. *palaeocolchicum* Á. Löve & D. Löve,
- *Triticum turgidum* L. subsp. *polonicum* (L.) Thell.
- *Triticum turgidum* L. subsp. *turanicum* (Jakubz.) Á. Löve & D. Löve
- *Triticum turgidum* L. subsp. *turgidum*
- *Triticum aestivum* L. subsp. *aestivum*
- *Triticum aestivum* L. subsp. *compactum* (Host) Mac Key
- *Triticum aestivum* L. subsp. *macha* (Dekapr. & Menabde) Mac Key
- *Triticum aestivum* L. subsp. *spelta* (L.) Thell.
- *Triticum aestivum* L. subsp. *sphaerococcum* (Percival) Mac Key
- *Triticum zhukovskyi* Menabde & Eritzjan

Dentro de la especie *T. monococcum*, se ubican dos subespecies:

La subespecie ***aegilopoides*** es diploide, tiene granos vestidos y se lo conoce vulgarmente como einkorn. Es una especie silvestre que crece en las regiones norte y oeste de la Media Luna Fértil (Hopf & Zohary 2000, Heun et al. 1997). Suele crecer en zonas marginales y posee rasgos deseables tales como resistencia enfermedades y plagas, así como una buena calidad nutricional (Heun et al. 1997, Konvalina et al. 2010). Es muy similar a la subespecie *monococcum*, excepto que *aegilopoides* posee raquis frágil y sus semillas se caen a la madurez. El ser humano colectó granos de einkorn silvestre por algún tiempo antes de cultivarlo, y restos arqueológicos han sido hallados en asentamientos humanos de 10.000 años AP (Faris, 2014).

La subespecie ***monococcum*** también es diploide. Posee granos vestidos. Fue el primer trigo cultivado. Jugó un papel importante en el desarrollo de la agricultura y se cultivó durante varios siglos antes de ser reemplazado por trigos de trilla libre. Hoy en día, el einkorn cultivado solo está presente en áreas montañosas aisladas de unos pocos países. Sin embargo, existe

un renovado interés por este cultivo debido a las cualidades nutricionales de su grano, su adaptación a la agricultura de bajos insumos y alto nivel de resistencia a plagas y enfermedades que representan ventajas para la agricultura orgánica (Zaharieva, M., 2014).

Por otra parte, dentro de la especie *T. turgidum* se describen 7 subespecies, todas tetraploides:

La subespecie ***dicoccoides*** posee granos vestidos y se la conoce como emmer. Es la única subespecie de trigo poliplode verdaderamente silvestre, y es el progenitor de todas las modernas variedades de trigo pan y candeal. A diferencia del einkorn silvestre, el emmer silvestre no crece como maleza sino como silvestre, mayormente confinado a ambientes poco disturbados. Por lo que no se ha dispersado mucho más allá del Creciente Fértil, desde el Levante sur, a través de Israel y el Líbano hasta el sudeste de Turquía, norte de Iraq y noroeste de Irán (Faris, 2014).

La subespecie ***dicoccon*** corresponde al emmer cultivado, también de granos vestidos. Los registros arqueológicos indican que esta subespecie apareció hace más de 9000 años en el Levante. Durante unos 7000 años fue largamente cultivada en Europa, Medio Oriente y gran parte de Asia. Hoy en día su cultivo es minoritario, no ocupa más del 1% de la superficie cultivada de trigo a nivel mundial. Se utilizaba para hacer panes, sémola y se sigue utilizando como grano integral (*farricello*), para hacer sopas tradicionales. En algunas áreas también se utiliza para hacer *focaccia* y pasta (Faris, 2014).

La subespecie ***durum***, es tetraploide, de grano desnudo y evolucionó del emmer domesticado. Apareció por primera vez hace 7500 años, pero no se estableció como cultivo hasta 2300 años AP, principalmente en la zona este del Mediterráneo. Comprende entre el 5 y el 7% de la producción mundial de trigo. Denominado trigo duro o candeal, este en el mundo se cultiva en un área mucho menos extensa que el trigo común y con un uso frecuente para la preparación de pasta, después de una molienda especial que conduce a la producción de sémola en lugar de harina (Matsuoka, 2014).

La subespecie ***turgidum*** también es de granos desnudo, se la conoce como trigo Rivet o moruno. Estudios genéticos recientes confirman que el trigo candeal y el Rivet comparten un *pool* genético común y son indistinguibles y no existen evidencias que permitan una clasificación taxonómica diferencial entre estas dos subespecies (Oliveira et al., 2012).

La subespecie ***palaeocolchicum*** es conocida como trigo Georgiano, por ser endémico del país asiático de Georgia, localizado en la costa este del mar Negro. Es una subespecie de grano vestido, de espigas grandes y compactas (que lo diferencia del emmer). Sería un segregante de la hibridación entre trigo emmer y *T. aestivum* ssp. *macha* (Matsuoka, 2014).

La subespecie ***polonicum*** es llamada trigo Polaco. Actualmente se siembra en pequeñas áreas de los países mediterráneos, Etiopía, Rusia y en otras regiones de Asia (Matsuoka, 2014).

La subespecie ***turanicum*** es originaria de Jorasán, Irán (Oliver, 2008). Se le considera un tipo de grano antiguo. Además de Jorasán, también se cultiva en otras partes de Asia Central, incluido Afganistán. Este grano es dos veces el tamaño del trigo moderno y es conocido por su rico sabor a nuez (Khlestkina, 2006).

La subespecie ***carthlicum*** se conoce como trigo Persa, posee granos desnudos, y se habría originado como una hibridación entre una variedad de trigo hexaploide de grano desnudo y emmer cultivado. Actualmente se cultiva en una zona muy restringida del Transcáucaso y es muy similar en su morfología a *T. aestivum* (Matsuoka, 2014).

De la especie *T. aestivum*, se describen 5 subespecies:

Como se mencionó anteriormente la subespecie ***aestivum*** es la más producida en todo el mundo ya que se utiliza para hacer harina, pan, etc. Es una especie hexaploide, con grano desnudo.

La subespecie ***compactum*** posee granos desnudos. Es una de las especies con menor valor nutritivo ya que tiene un bajo contenido de gluten y está conformado de un 7 a un 10% de proteína. Se caracteriza porque presenta una espiga especialmente corta, en épocas antiguas era utilizado para la elaboración de pan, pero actualmente se emplea principalmente para hacer galletitas.

La subespecie ***sphaerococcum*** es hexaploide, endémica del sur de Pakistán y el noroeste de la India. Fue uno de los principales cultivos de invierno de las antiguas culturas indias. Sin embargo, desapareció del registro a principios del siglo XX, especialmente después de que la Revolución Verde introdujera variedades modernas de trigo en India y Pakistán. No está claro si actualmente se cultiva este trigo o no (Mori, 2013).

La subespecie ***spelta*** posee granos vestidos y durante mucho tiempo fue considerada el ancestro del trigo pan, sin embargo, esto fue rebatido por diversos estudios. Actualmente se sabe que el trigo espelta se originó a partir del trigo pan, al hibridarse con emmer. Cultivado hace 7000 años antes del presente. Cultivo relicto, posee una distribución muy reducida en comparación con la que anteriormente poseía (Dvorak et al., 2012).

La subespecie ***macha*** posee granos vestidos y es endémica de Georgia. Posee raquis frágil y espigas compactas. Ha sido especulado que podría ser el ancestro de todas las subespecies de *T. aestivum*. Sin embargo, se habría originado a partir de emmer silvestre y no de emmer cultivado, y sería un segregante de la cruce de esa especie con *T. aestivum* (Dvorak and Luo, 2001).

Por su parte, la especie ***T. zhukovsky*** es una especie de *Triticum* hexaploide, de granos vestidos, que corresponde a un linaje distinto que el de *T. aestivum* y *T. turgidum*. Se habría originado como una cruce entre *T. timopheevii*, una especie tetraploide, y einkorn cultivado *T. monococcum*. Posee una limitada distribución y es endémica de la región del Transcáucaso (Matsuoka, 2014).

La búsqueda de características agronómicas útiles entre estos recursos genéticos silvestres sólo está en sus estados iniciales, y no se conoce completamente todavía la amplitud total de este tesoro genético. Está claro, con la información reunida hasta ahora, que las formas silvestres próximas al trigo cultivado mantienen ricos acervos de variación genética y son portadoras de muchos genes de gran potencial económico, como por ejemplo mejor calidad y mayor cantidad de proteína en el grano, mayor resistencia a micosis y virosis, a insectos, a la sequía y al encamado (tumbado de la mies por el viento o la lluvia), mayor resistencia al frío invernal, tolerancia al calor y a la salinidad y maduración más precoz. Las formas silvestres próximas al trigo pueden ser capaces también de conferirle directamente mayor rendimiento (Feldman, 1981).

Debido a esto, nos parece importante estudiar esta colección de semillas. Ya que muchas de ellas pertenecen a poblaciones de trigo silvestre, se puede buscar esos rasgos agronómicos favorables y mantener y conservar la variabilidad genética del trigo.

OBJETIVOS:

El objetivo de este trabajo fue caracterizar un panel de semillas de trigos ancestrales pertenecientes a 4 especies y 16 subespecies, mediante el uso de un software de imágenes específico, para detectar caracteres que permitan su diferenciación y clasificación para futuros experimentos.

HIPÓTESIS:

La caracterización morfológica de las semillas de trigo permitirá diferenciar alguna de las subespecies de trigo, en especial las silvestres de las cultivadas y aquellas de grano vestido por sobre las de grano desnudo.

MATERIALES Y MÉTODOS:

Se utilizaron semillas de trigo (Tabla 2) proporcionadas por la cátedra de Producción Vegetal Extensiva, procedentes del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Estas semillas provienen de diferentes partes del mundo (Figura 3; Tabla 2).

Tabla 2: Germoplasma utilizado, N° de accesiones, orígenes y estado de mejora.

Especie	N° accesiones	Orígenes	Estado de mejora
<i>Triticum aestivum</i> L. subsp. <i>aestivum</i>	2	Estados Unidos	Cultivo y línea experimental
<i>Triticum aestivum</i> L. subsp. <i>compactum</i> (Host) Mac Key	9	Italia, México, Chile, Turquía, Estados Unidos y Egipto	Cultivo, incierto, razas locales y línea experimental
<i>Triticum aestivum</i> L. subsp. <i>macha</i> (Dekapr. & Menabde) Mac Key	6	Irán, Italia, Estados Unidos y Georgia	Silvestre y razas locales
<i>Triticum aestivum</i> L. subsp. <i>spelta</i> (L.) Thell.	12	Italia, España, Bulgaria, Argentina, Suiza, Alemania, Bélgica, Afganistán y Checoslovaquia	Incierto, línea experimental y razas locales
<i>Triticum aestivum</i> L. subsp. <i>sphaerococcum</i> (Percival) Mac Key	3	Estados Unidos y Pakistán	Genética y razas locales
<i>Triticum monococcum</i> L. subsp. <i>aegilopoides</i> (Link) Thell.	7	Turquía e Irán	Silvestre
<i>Triticum monococcum</i> L. subsp. <i>monococcum</i>	5	España, Sudáfrica, Italia y Turquía	Razas locales, incierto y línea experimental
<i>Triticum turgidum</i> L. subsp. <i>carthlicum</i> (Nevski) Á. Löve & D. Löve	6	Portugal, Irán, Armenia, Turquía, Estados Unidos y Georgia	Incierto y razas locales
<i>Triticum turgidum</i> L. subsp. <i>dicoccoides</i> (Körn. ex Asch. & Graebn.) Thell.	7	Libano, Turquía, Siria e Israel	Silvestre
<i>Triticum turgidum</i> L. subsp. <i>dicoccon</i> (Schrank) Thell.	12	India, Irán, Etiopía, España, Alemania, Italia, Turquía, Etiopía y Ucrania	Cultivo, razas locales, incierto
<i>Triticum turgidum</i> L. subsp. <i>durum</i> (Desf.) van Slageren	9	Etiopía, Túnez, Italia, Kazajistán, España, Argelia, Italia, Turquía e Israel	Raza local, incierto, cultivo y línea experimental
<i>Triticum turgidum</i> L. subsp. <i>palaecolchicum</i> Á. Löve & D. Löve	2	Georgia	Silvestre
<i>Triticum turgidum</i> L. subsp. <i>polonicum</i> (L.) Thell.	4	Argentina, Portugal, Irak y Etiopía	Incierto y raza local
<i>Triticum turgidum</i> L. subsp. <i>turanicum</i> (Jakubz.) Á. Löve & D. Löve	5	Etiopía, Marruecos, España, Italia y Afganistán	Razas locales y cultivo
<i>Triticum turgidum</i> L. subsp. <i>turgidum</i>	10	Etiopía, Portugal, Italia, Irán, Francia, Grecia y Egipto	Cultivo y razas locales
<i>Triticum zhukovskyi</i> Menabde & Eritzjan	1	Georgia	Silvestre



Figura 3: Orígenes de algunas de las accesiones de semilla de trigo analizadas.

Como primer paso se tomaron fotos de cada accesión (Figura 4), en total 100 fotografías, con 10 semillas en cada una, que luego fueron analizadas mediante el programa ImageJ. Este es un programa de procesamiento digital de imagen de dominio público, en el cual se obtuvieron datos como: perímetro de las semillas, área, circunferencia y otras, detalladas a continuación:

- Área de selección en píxeles cuadrados. El área está en unidades calibradas, como milímetros cuadrados.
- Perímetro: la longitud del límite exterior de la selección.
- Circularidad: $4\pi \cdot \text{área} / \text{perímetro}^2$. Un valor de 1,0 indica un círculo perfecto. A medida que el valor se acerca a 0,0, indica una forma cada vez más alargada. Los valores pueden no ser válidos para partículas muy pequeñas.
- AR (relación de aspecto): eje mayor/eje menor.
- Solidez: $\text{área} / \text{área convexa}$.
- También se tuvo en cuenta el color de las semillas y si el grano era desnudo o vestido.



Figura 4: Fotografías de las semillas. A: *Triticum aestivum* L. subsp. *compactum* (Host) Mac Key. B: *Triticum turgidum* L. subsp. *dicoccoides* (Körn. ex Asch. & Graebn.) Thell. C: *Triticum aestivum* L. subsp. *sphaerococcum* (Percival) Mac Key.

Luego, se determinó el peso de semilla de cada especie. Se pesaron 10 semillas de cada accesión, con una balanza analítica perteneciente al Departamento de Agronomía (Figura 5).



Figura 5: Determinación del peso de cada accesión.





Análisis estadístico





Los datos fueron analizados estadísticamente con el programa INFOSTAT (Di Rienzo, 2023). El diseño fue completamente al azar, y se realizó un análisis de anova y comparación de medias mediante el test Tukey ($p < 0,05$). Para los datos no continuos se realizó un análisis de la varianza no paramétrico, mediante Kruskal-Wallis. También se realizaron análisis de componentes principales y de conglomerados.





RESULTADOS Y DISCUSIÓN:





Los primeros resultados obtenidos fueron a partir de fotografías, donde se pudo observar características de las semillas de cada Subespecie (Tabla 3).

Tabla 3: Fotografías de las semillas de cada Subespecie.

Especie	Genoma	Fotografía	
<i>Triticum monococcum</i> L. subsp. <i>Aegilopoides</i>	AA (Diploide)		
<i>Triticum monococcum</i> L. subsp. <i>Monococcum</i>	AA (Diploide)		
<i>Triticum turgidum</i> L. subsp. <i>Dicoccoides</i>	AABB (Tetraploide)		
<i>Triticum turgidum</i> L. subsp. <i>Dicoccon</i>	AABB (Tetraploide)		

<p><i>Triticum turgidum</i> L. subsp. <i>Turgidum</i></p>	<p>AABB (Tetraploide)</p>	
<p><i>Triticum turgidum</i> L. subsp. <i>Durum</i></p>	<p>AABB (Tetraploide)</p>	
<p><i>Triticum turgidum</i> L. subsp. <i>Palaeocolchicum</i></p>	<p>AABB (Tetraploide)</p>	
<p><i>Triticum turgidum</i> L. subsp. <i>Polonicum</i></p>	<p>AABB (Tetraploide)</p>	

<p><i>Triticum turgidum</i> L. subsp. <i>carthlicum</i></p>	<p>AABB (Tetraploide)</p>	
<p><i>Triticum turgidum</i> L. subsp. <i>Turanicum</i></p>	<p>AABB (Tetraploide)</p>	
<p><i>Triticum aestivum</i> L. subsp. <i>Aestivum</i></p>	<p>AABBDD (Hexaploide)</p>	
<p><i>Triticum aestivum</i> L. subsp. <i>Compactum</i></p>	<p>AABBDD (Hexaploide)</p>	

<p><i>Triticum aestivum</i> L. subsp. Macha</p>	<p>AABBDD (Hexaploide)</p>	 <p>This photograph shows two groups of wheat grains and spikes for the subsp. Macha. The left group shows individual grains, which are relatively smooth and oval-shaped. The right group shows several spikes, which appear to have a relatively smooth surface. A ruler is visible at the bottom of both images, with markings from 1 to 6 cm.</p>
<p><i>Triticum aestivum</i> L. subsp. Spelta</p>	<p>AABBDD (Hexaploide)</p>	 <p>This photograph shows two groups of wheat grains and spikes for the subsp. Spelta. The left group shows individual grains, which are more elongated and have a distinct longitudinal ribbing. The right group shows several spikes, which also exhibit prominent longitudinal ribbing. A ruler is visible at the bottom of both images, with markings from 1 to 6 cm.</p>
<p><i>Triticum aestivum</i> L. subsp. Sphaerococcum</p>	<p>AABBDD (Hexaploide)</p>	 <p>This photograph shows two groups of wheat grains and spikes for the subsp. Sphaerococcum. The left group shows individual grains, which are notably rounded and smooth. The right group shows several spikes, which also appear smooth and rounded. A ruler is visible at the bottom of both images, with markings from 1 to 3 cm.</p>
<p><i>Triticum zhukovskyi</i></p>	<p>AAAAGG (Hexaploide)</p>	 <p>This photograph shows a group of wheat grains and spikes for the subsp. Zhukovskyi. The grains are elongated and have a distinct longitudinal ribbing. The spikes also show prominent longitudinal ribbing. A ruler is visible at the bottom of the image, with markings from 1 to 6 cm.</p>

Caracterización morfológica de las accesiones

Área

La subespecie *Dicoccoides* (*Triticum turgidum* L. subsp. *dicoccoides*) se diferenció estadísticamente del resto teniendo mayor área (Figura 6). La subespecie *Aegilopoides* (*Triticum monococcum* L. subsp. *aegilopoides*) le sigue, pero no se diferenció de las subespecies *Zhukovskiyi* y *Palaeocolchicum*. Esto se debió a que las subespecies poseen granos cubiertos, por lo que al tener las glumas el área de la semilla fue mayor. Esta característica es muy común en especies silvestres, coincidiendo con las analizadas.

Las subespecies *Sphaerococcum* y *Carthlicum* no tienen diferencias significativas con las subespecies *Compactum*, *Aestivum*, *Durum* y *Turgidum*. Pero si tienen diferencias significativas con el resto de las subespecies. Esto se debió a que comparten la característica de grano desnudo y tamaño similar.

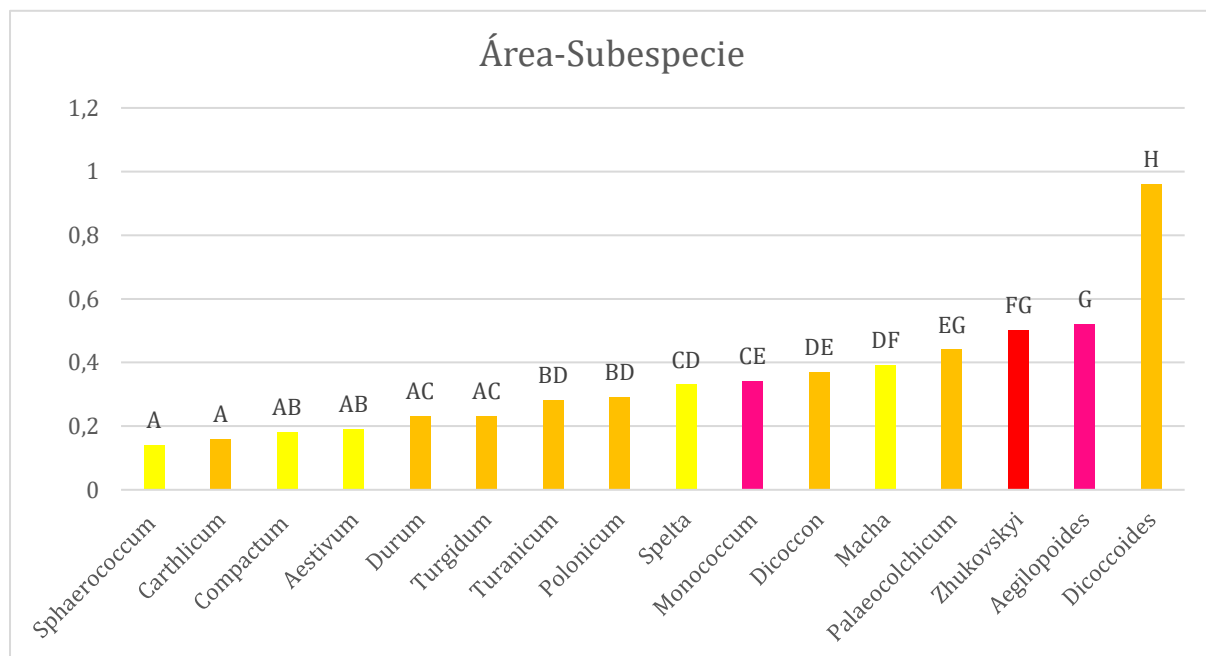


Figura 6: Diferencias estadísticas entre el área de las semillas según la subespecie de trigo.

Perímetro

Al igual que en el gráfico anterior, se observan diferencias marcadas en las subespecies *Aegilopoides* y *Dicoccoides* con el resto, debido a su perímetro superior (Figura 7). En este caso no hay diferencias significativas entre ellas.

El mayor perímetro también está relacionado con las semillas vestidas que tienen las subespecies antes mencionadas.

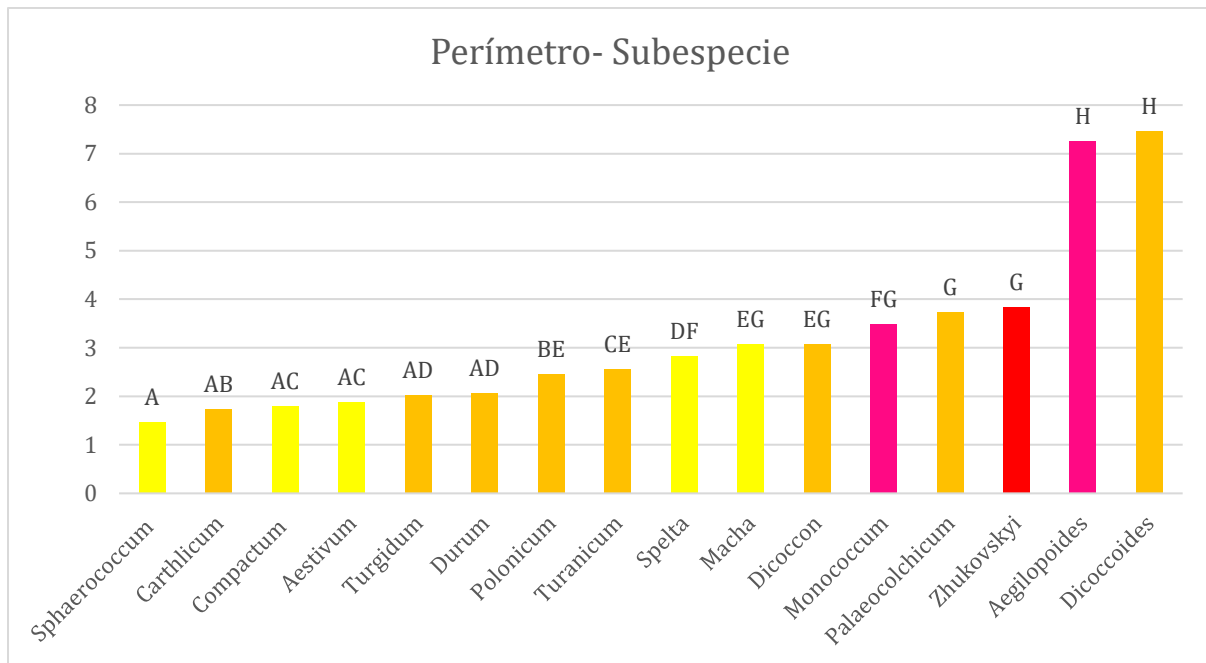


Figura 7: Diferencias estadísticas entre el perímetro de las semillas según la subespecie de trigo.

Circularidad

La subespecie más circular fue *Sphaerococcum* (*Triticum aestivum* L. subsp. *sphaerococcum*), con un valor de circularidad cercano a 0,8 (Figura 8).

Las subespecies con una forma más alargada fueron *Aegilopoides* y *Diccooides*.

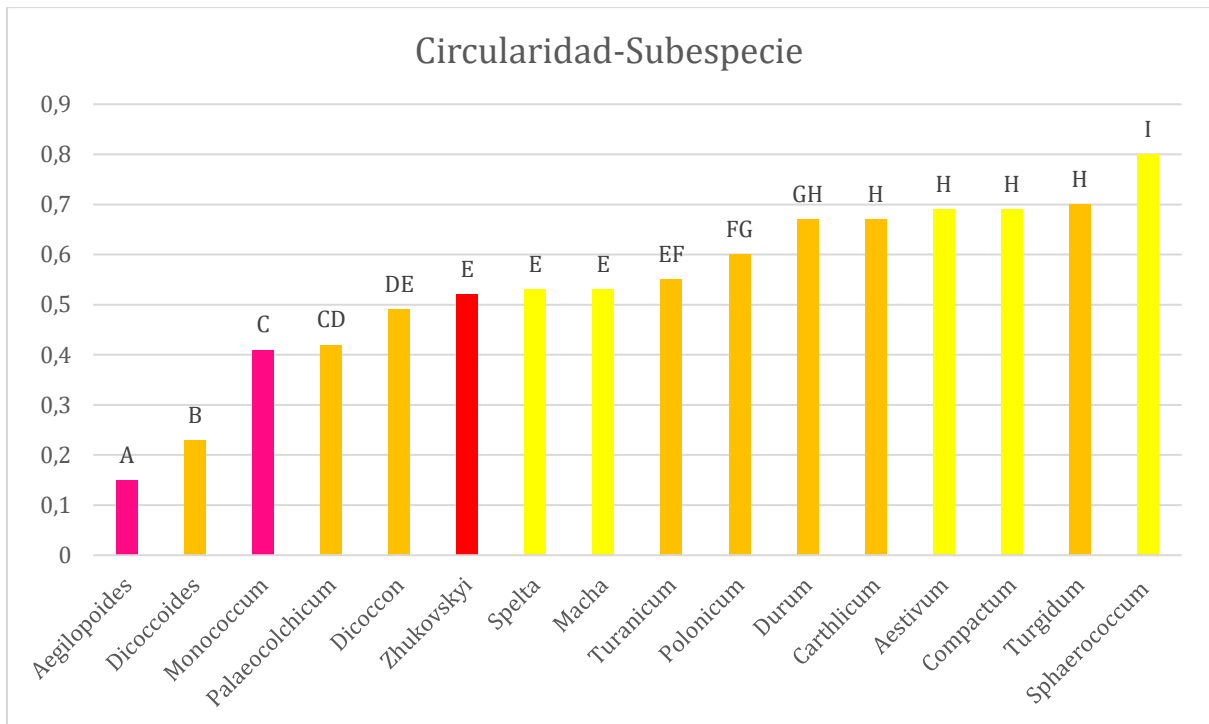


Figura 8: Diferencias estadísticas entre la circularidad de las semillas según la subespecie de trigo.

Cobertura del grano

Las subespecies *Turgidum*, *Durum*, *Turanicum*, *Sphaerococcum*, *Polonicum*, *Aestivum*, *Carthlicum* y *Compactum* presentaron el 100% de sus granos desnudos, mientras que *Aegilopoides*, *Dicoccoides* y *Palaeocolchicum* poseían la totalidad de sus granos vestidos. En el caso de *Spelta*, el 60% de los granos se encontraban desnudos, y no se diferenció de *Dicoccon* (63% desnudos) y *Zhukovsky* (50% desnudos). *Macha* y *Monococcum* presentaron mayor proporción de granos vestidos que desnudos (60% y 83%, respectivamente).

Tabla 4: Diferencias estadísticas entre grano desnudo o vestido de cada subespecie. 1: grano desnudo, 2: grano vestido.

Subespecie	Medias \pm E.E
Turgidum	1,00 \pm 0,00 a
Durum	1,00 \pm 0,00 a
Turanicum	1,00 \pm 0,00 a
Sphaerococcum	1,00 \pm 0,00 a
Polonicum	1,00 \pm 0,00 a
Aestivum	1,00 \pm 0,00 a
Carthlicum	1,00 \pm 0,00 a
Compactum	1,00 \pm 0,00 a
Spelta	1,41 \pm 0,05 b
Dicoccon	1,47 \pm 0,05 bc
Zhukovskyi	1,50 \pm 0,17 bd
Macha	1,60 \pm 0,06 cd
Monococcum	1,83 \pm 0,05 de
Aegilopoides	2,00 \pm 0,00 e
Dicoccoides	2,00 \pm 0,00 e
Palaeocolchicum	2,00 \pm 0,00 e

Color del grano

Las subespecies *Palaeocolchicum*, *Macha*, *Carthlicum* poseían en su totalidad granos de color rojo, sin diferenciarse de *Dicoccoides* (86% rojos). *Turgidum* también presentó mayoría de granos rojos (60%). *Dicoccon* y *Monococcum* poseían la misma proporción de granos rojos y ámbar. Las demás subespecies presentaron granos de color rojo, pero con mayor proporción de granos color ámbar (*Spelta* 75%, *Polonicum* 75%, *Turanicum* 80%, *Durum* 89% y *Zhukovskyi* 100%).

Tres subespecies presentaron algunos granos de color blanco: *Aestivum* (50%), *Compactum* (56%) y *Sphaerococcum* (33%). Finalmente, la subespecie silvestre *Aegilopoides* presentó algunos granos de color negro (9%) y mayormente ámbar (81%).

Tabla 5: Diferencias estadísticas entre el color del grano de cada subespecie. 1 significa color rojo/marrón, 2 color ámbar, 3 color blanco, 4 color negro.

Subespecie	Medias \pm E.E
Palaeocolchicum	1,00 \pm 0,00 a
Macha	1,00 \pm 0,00 a
Carthlicum	1,00 \pm 0,00 a
Dicoccoides	1,14 \pm 0,04 a
Turgidum	1,40 \pm 0,05 b
Monococcum	1,50 \pm 0,07 bc
Dicoccon	1,50 \pm 0,05 bc
Spelta	1,75 \pm 0,04 cd
Polonicum	1,75 \pm 0,07 cd
Aestivum	2,00 \pm 0,23 cd
Turanicum	1,80 \pm 0,06 d
Sphaerococcum	2,00 \pm 0,15 d
Compactum	2,11 \pm 0,11 d
Durum	1,89 \pm 0,03 d
Aegilopoides	2,07 \pm 0,08 d
Zhukovskyi	2,00 \pm 0,00 d

Análisis multivariado

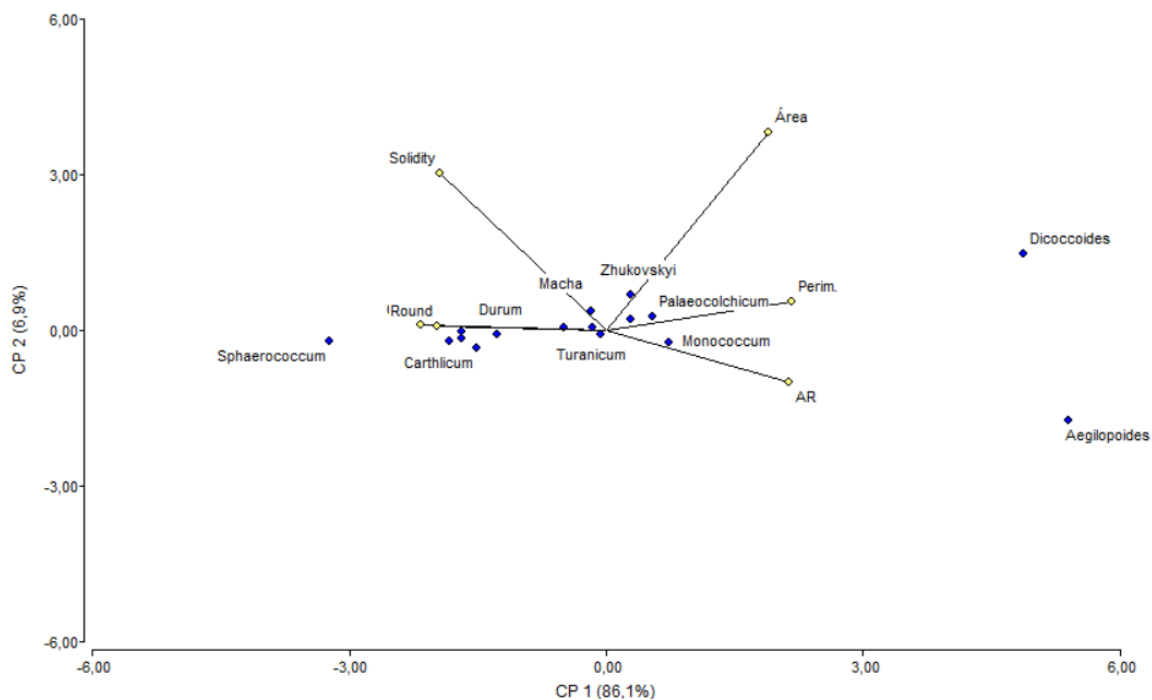


Figura 9: Análisis de componentes principales. Cada punto representa una subespecie de trigo.

El análisis de componentes principales es una técnica utilizada para describir un conjunto de datos en términos de nuevas variables (componentes) no correlacionadas. Los componentes se ordenan por la cantidad de varianza original que describen, por lo que la técnica es útil para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos.

En este análisis (Figura 9) se puede observar que las subespecies *Sphaerococcum* (*Triticum aestivum* L. subsp. *sphaerococcum*), *Dicoccoides* (*Triticum turgidum* L. subsp. *dicoccoides*) y la subespecie *Aegilopoides* (*Triticum monococcum* L. subsp. *aegilopoides*) fueron las más distantes en el gráfico, lo que significa que poseen mayores diferencias tomando en cuenta los componentes que se seleccionaron. Los cuales fueron perímetro de la semilla, área, circularidad, solidez, y relación de aspecto.

Poseen mayores diferencias ya que son trigos silvestres o pertenecientes a razas locales, lo que los diferencia de los trigos cultivados que se encuentran más cercanos en el gráfico.

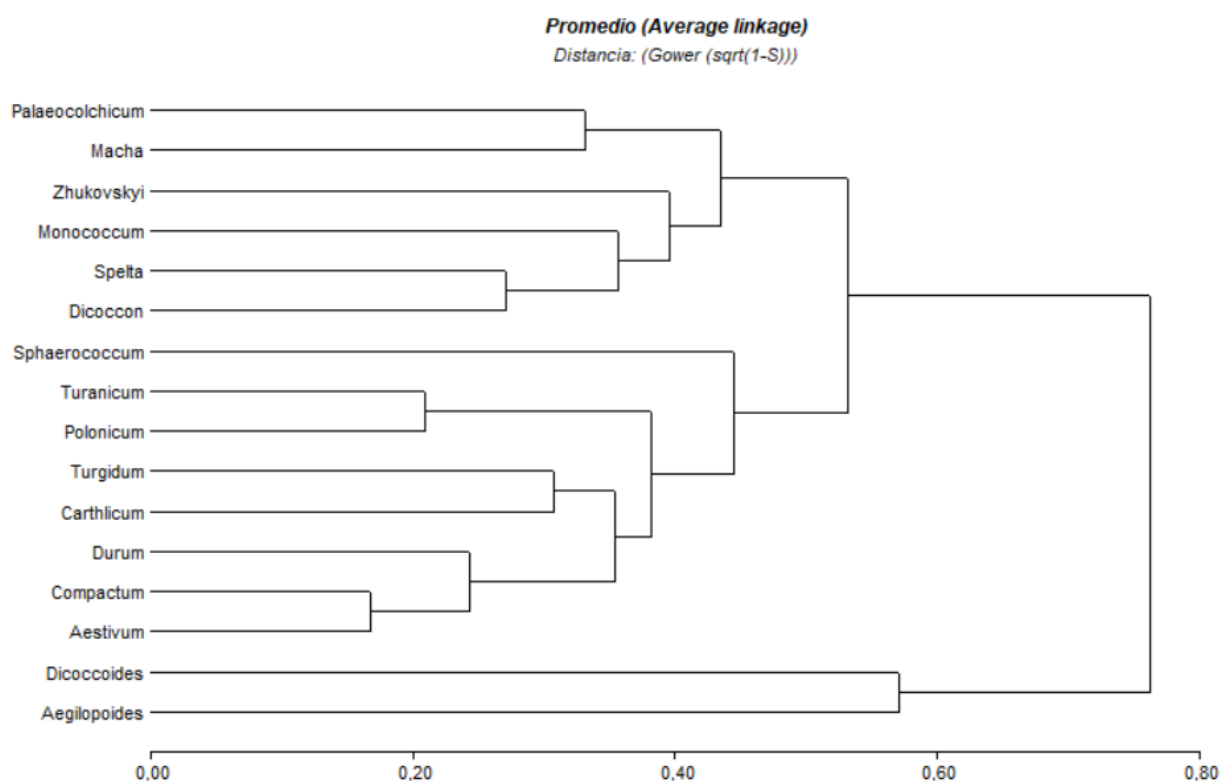


Figura 10: Análisis de conglomerados. Las subespecies que se encuentran juntas en las llaves tienen más similitudes en cuanto a la morfología de sus semillas.

La primera observación que podemos ver en esta figura es la división del mismo en dos clados. En el cual se separan las subespecies silvestres *Aegilopoides* y *Dicoccoides*, del resto de las subespecies cultivadas debido a la forma del grano, ya que las especies silvestres poseen grano vestido, forma más grande y alargada, y también poseen aristas en sus glumas. Las subespecies cultivadas comparten mayores características en común y por eso se agrupan en un mismo clado, debido a años de mejoramiento y selección de los mismos caracteres (Figura 10).

Luego, en el clado superior donde se encuentran las especies cultivadas, hay una nueva división. Esta es porque se dividen las subespecies con grano desnudo y vestido.

La subespecie *Sphaerococcum* se diferencia más del resto de las subespecies de grano desnudo por sus características en la semilla con una forma muy redondeada.

Einkorn

Las accesiones de *T. monococcum* se analizaron de forma separada para destacar las diferencias entre einkorn silvestre y cultivado (Figura 11).

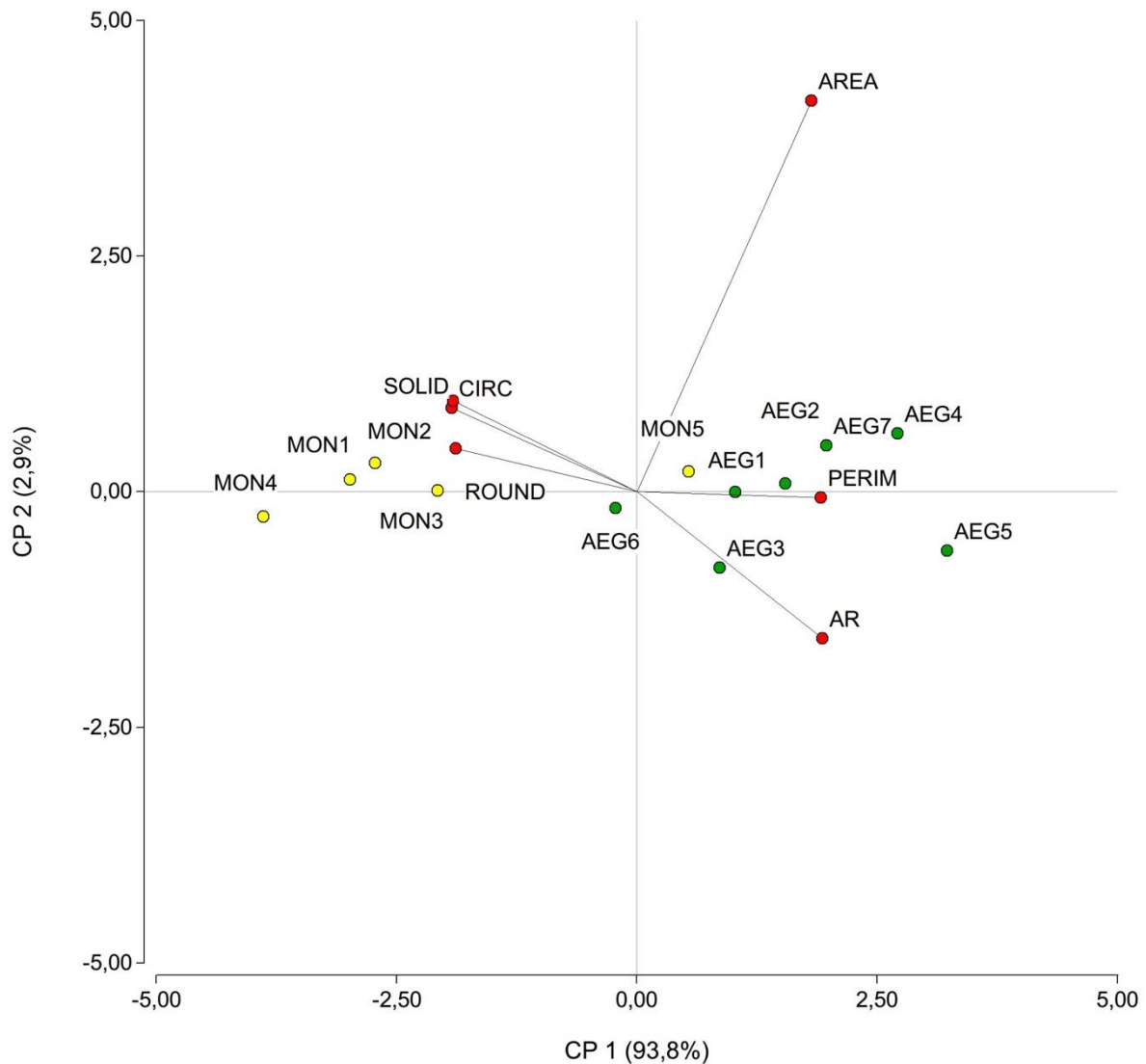


Figura 11: Análisis de componentes principales. Cada punto corresponde a una accesión. Amarillo de la subespecie *Monococcum* y verde de la subespecie *Aegilopoides*.

En el análisis multivariado se observó una clara diferenciación entre la subespecie *Monococcum* (domesticada) y *Aegilopoides* (Silvestre). Sólo una accesión de einkorn cultivado se agrupó junto con las accesiones de einkorn silvestre (MON5). Lo mismo se observó en el análisis de conglomerados, donde se asemejó a la accesión silvestre AEG6 (Figura 12). La accesión MON5 corresponde a la accesión PI 560720 del USDA, de nombre TU85-011-02, originaria de Muş, al este de Turquía. Fue colectada en los márgenes de un lote de trigo (*T. aestivum*), junto a una banquina de un camino de tierra, en una llanura de inundación de suelo

fino. Las plantas fueron clasificadas como un landrace, de germoplasma aleatorio, con individuos más altos que el trigo. Probablemente, esta accesión fue mal clasificada y corresponde a una población de *Aegilopoides*.

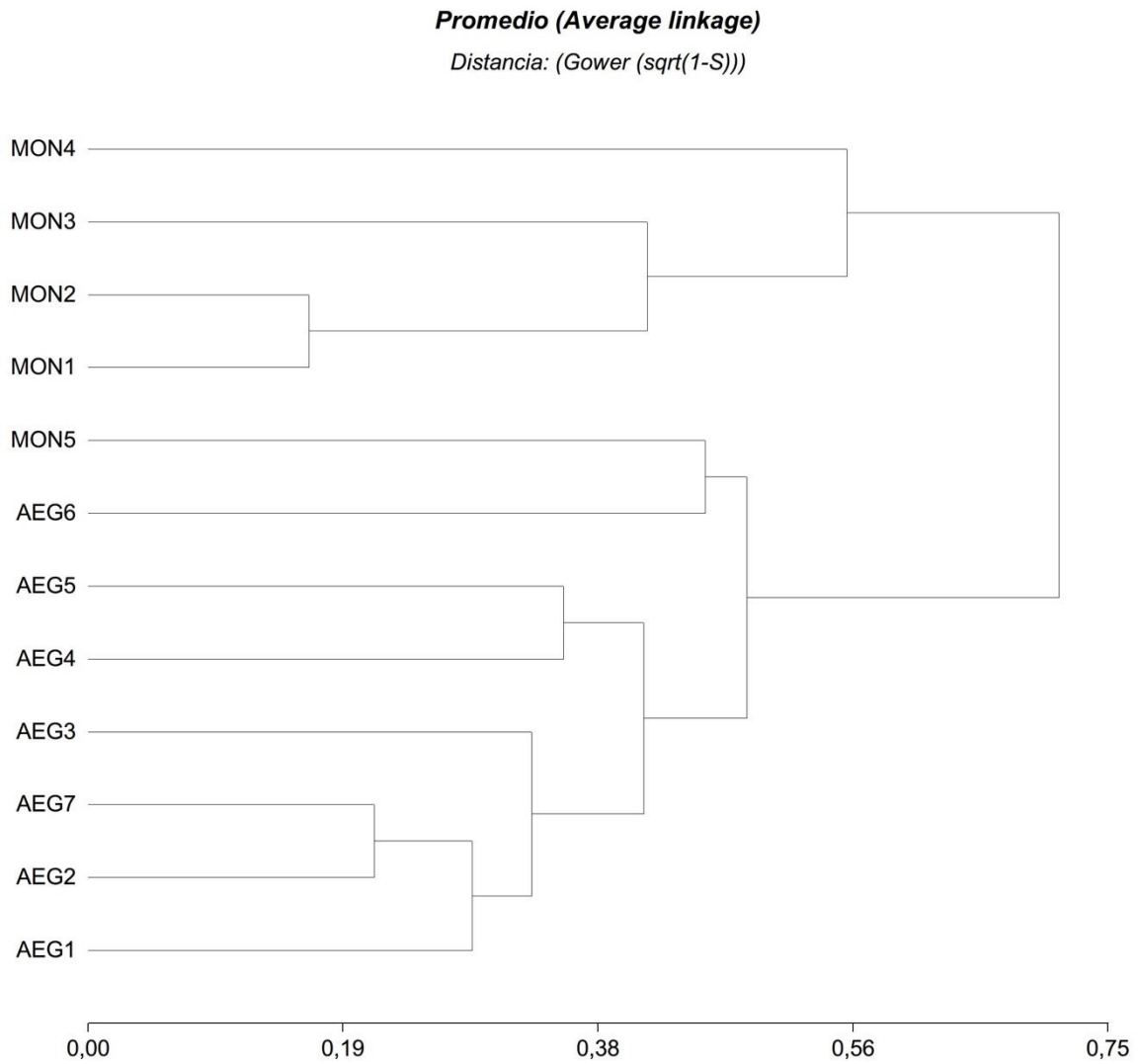


Figura 12: Análisis de conglomerados. Las accesiones que se encuentran juntas en la llave tienen mayores similitudes en cuanto a la morfología de sus semillas.

Emmer

De la misma forma, las accesiones de *T. turgidum* ssp. *dicoccon* y *T. turgidum* ssp. *dicoccoides* se analizaron de forma separada para destacar las diferencias entre emmer silvestre y cultivado (Figura 13).

Las formas silvestres y cultivadas difieren en la morfología del grano: en los cultivares, el grano es más ancho, más grueso y más redondo en sección transversal que en *Dicoccoides* (Nevo et al., 2002). En este caso, las accesiones silvestres y cultivadas se separaron de forma correcta. Incluso, se pudo observar cierta diferenciación entre las poblaciones silvestres. Las accesiones DIC5 y DIC6 se separaron del resto y coincidieron en origen geográfico, siendo ambas de Israel. El resto de las poblaciones de emmer silvestre pertenecen a la región del este de Turquía. Esto concuerda con los datos genéticos y ecológicos de diversos trabajos. *T. turgidum* ssp. *dicoccoides* tiene una distribución y ecología más restringida que el einkorn silvestre. Se encuentra en Israel y Siria, que son sus centros de origen basados en la diversidad genética, Jordania, Líbano, sureste de Turquía, norte de Irak y oeste de Irán (Nevo et al., 2002). Nuevos análisis genéticos permitieron distinguir claramente entre dos razas silvestres de emmer: la raza silvestre de emmer occidental comprende todas las accesiones muestreadas en Israel, Jordania, Líbano y Siria. Las poblaciones occidentales están conectadas y entremezcladas. No se puede detectar una estructura poblacional clara. La raza oriental consta de todas las plantas recolectadas en Turquía, Irak e Irán. Las poblaciones de la raza oriental están más aisladas entre sí y genéticamente más separadas, sin embargo, albergan una gran diversidad genética comparable a la presente en la raza silvestre occidental. La raza de emmer silvestre del este parece estar más relacionada con los trigos tetraploides domesticados (Özkan et al., 2011).

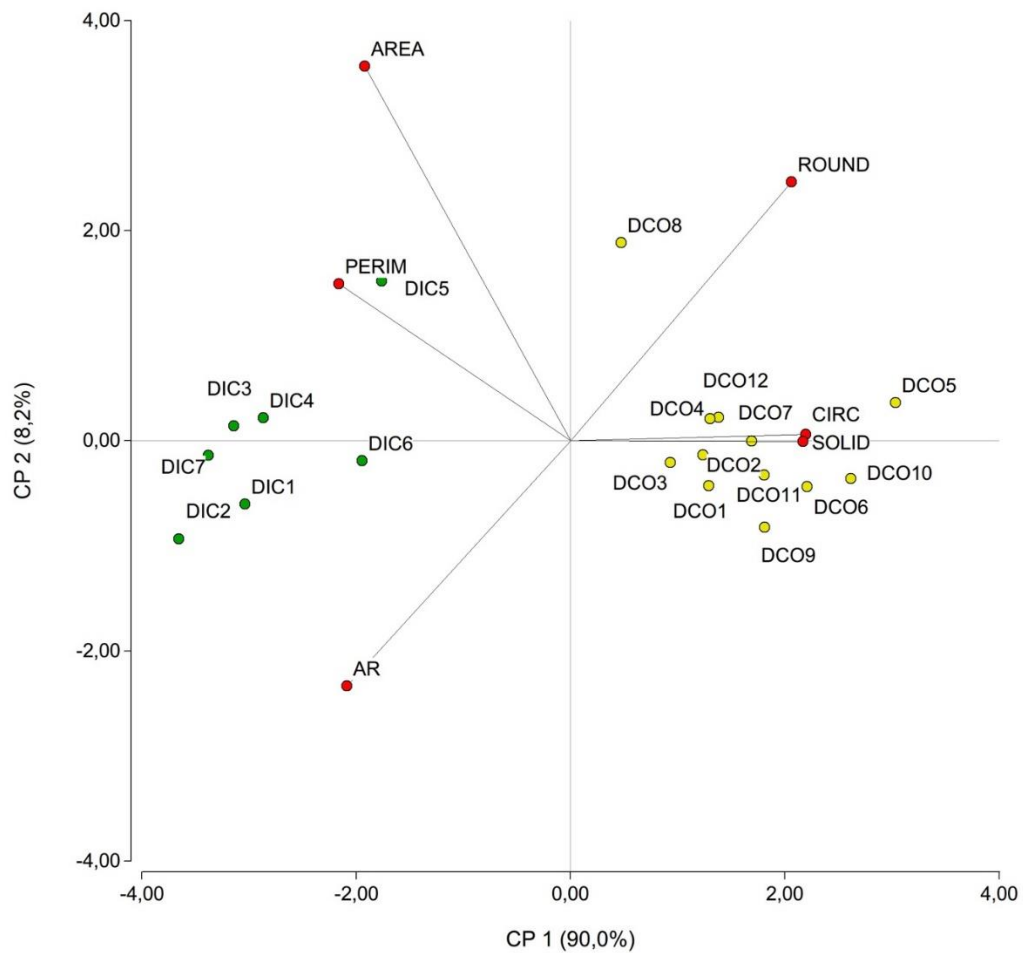


Figura 13: Análisis de componentes principales. Cada punto corresponde a una accesión. Color verde corresponde a la subespecie *Dicoccoides* y color amarillo corresponde a la subespecie *Dicoccon*.

CONCLUSIONES:

- Las subespecies silvestres Dicocoides (*Triticum turgidum* L. subsp. *dicocoides*) y la subespecie Aegilopoides (*Triticum monococcum* L. subsp. *aegilopoides*) se diferenciaron estadísticamente del resto en las variables perímetro y en el análisis de componentes principales y conglomerados.
- Observando únicamente características de las semillas se pueden diferenciar las subespecies silvestres de las cultivadas. Dentro de las cultivadas se diferencian las subespecies con grano desnudo y vestido.
- Se observó que las especies tetraploides tienen mayor proporción de granos color ámbar.
- Las especies hexaploides tienen granos color rojo y algunos blancos.
- En las especies silvestres se observan granos color negro.
- En el análisis multivariado y de conglomerados se observó una clara diferenciación entre la subespecie Monococcum (domesticada) y Aegilopoides (Silvestre), einkorn cultivado y silvestre.
- Sólo una accesión de einkorn cultivado se agrupó junto con las accesiones de einkorn silvestre (MON5). Probablemente, esta accesión fue mal clasificada y corresponde a una población de Aegilopoides.
- Las accesiones silvestres y cultivadas del trigo emmer se separaron de forma correcta.
- Se pudo observar cierta diferenciación entre las poblaciones silvestres del trigo emmer. Las accesiones DIC5 y DIC6 se separaron del resto y coincidieron en origen geográfico, siendo ambas de Israel. El resto de las poblaciones de emmer silvestre pertenecen a la región del este de Turquía.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

Bolsa de Cereales. Venturino, Daniela A. Cierre de campaña: récord de producción para el trigo 2021/22. Disponible en: <https://www.bolsadecereales.com/post-26>

Charmet, G. (2011). Wheat domestication: lessons for the future. *Comptes rendus biologies*, 334(3), 212-220.

Daniel Zohary, Maria Hopf (2000). *Domestication of plants in the Old World*.

de Oliveira, E. D., Bramley, H., Siddique, K. H., Henty, S., Berger, J., & Palta, J. A. (2012). Can elevated CO₂ combined with high temperature ameliorate the effect of terminal drought in wheat?. *Functional Plant Biology*, 40(2), 160-171.

Dixon, J., Braun, H. J., Kosina, P., & Crouch, J. H. (Eds.). (2009). Wheat facts and futures 2009. Cimmyt.

Dorofeev, V. F., & Migushova, E. F. (1978). Synthesis of a homolog of soft wheat. *Trudy po prikladnoi botanike, genetike i selektsii*.

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Nota informativa de la FAO sobre la oferta y la demanda de cereales. Disponible en: <https://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/es/>

Faris, J. D. (2014). Wheat domestication: Key to agricultural revolutions past and future. *Genomics of Plant Genetic Resources: Volume 1. Managing, sequencing and mining genetic resources*, 439-464.

Feldman, M., & Millet, E. (2001). The contribution of the discovery of wild emmer to an understanding of wheat evolution and domestication and to wheat improvement. *Israel Journal of Plant Sciences*, 49(sup1), 25-36.

Feldman, M., & Sears, E. R. (1981). Los recursos genéticos del trigo silvestre. *Investigación y Ciencia*, 54(5), 50-61.

Harlan, J. R., De Wet, J. M. J., & Price, E. G. (1973). Comparative evolution of cereals. *Evolution*, 27(2), 311-325.

Heun, M., Schafer-Pregl, R., Klawan, D., Castagna, R., Accerbi, M., Borghi, B. & Salamini, F. 1997. Site of einkorn wheat domestication identified by DNA fingerprinting. *Science* 278: 1312–1314.

Hopf, M. & Zohary, D. 2000. Domestication of plants in the old world: the origin and spread of cultivated plants in West Asia, Europe, and the Nile valley (3rd ed.). Oxford University Press. p. 38.

Huang, S., Sirikhachornkit, A., Su, X., Faris, J., Gill, B., Haselkorn, R., & Gornicki, P. (2002). Genes encoding plastid acetyl-CoA carboxylase and 3-phosphoglycerate kinase of the Triticum/Aegilops complex and the evolutionary history of polyploid wheat. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(12), 8133-8138.

Khlestkina, Elena K.; Röder, Marion S.; Grausgruber, Heinrich; Börner, Andreas (2006). «A DNA fingerprinting-based taxonomic allocation of Kamut wheat». *Plant Genetic Resources* 4 (3): 172-180.

Kihara, H. (1944). Discovery of the DD-analyser, one of the ancestors of Triticum vulgare. *Agric. Hort.*, 19, 13-14.

Konvalina, P., Capouchova, I., Stehno, Z. & Moudry, J. 2010. Agronomic characteristics of the spring forms of the wheat landraces (einkorn, emmer, spelt, intermediate bread wheat) grown in organic farming. *Journal of Agrobiology* 27: 9–17.

Lev-Yadun, S., Gopher, A., & Abbo, S. (2000). The cradle of agriculture. *Science*, 288(5471), 1602-1603.

Matsuoka, Y. (2011). Evolution of polyploid Triticum wheats under cultivation: the role of domestication, natural hybridization and allopolyploid speciation in their diversification. *Plant and cell physiology*, 52(5), 750-764.

McFadden, E. S., & Sears, E. R. (1947). The Genome Approach in Radical Wheat Breeding 1. *Agronomy Journal*, 39(11), 1011-1025.

Mori, N., Ohta, S., Chiba, H., Takagi, T., Niimi, Y., Shinde, V., ... & Osada, T. (2013). Rediscovery of Indian dwarf wheat (*Triticum aestivum* L. ssp. *sphaerococcum* (Perc.) MK.) an ancient crop of the Indian subcontinent. *Genetic resources and crop evolution*, 60, 1771-1775.

Nevo, E., Korol, A. B., Beiles, A., & Fahima, T. (2002). Evolution of wild emmer and wheat improvement: population genetics, genetic resources, and genome organization of wheat's progenitor, *Triticum dicoccoides*. Springer Science & Business Media.

Oliver R. E.; Cai X.; Friesen T. L.; Halley S.; Stack R. W.; Xu S. S. (2008). «Evaluation of Fusarium Head Blight Resistance in Tetraploid Wheat (*Triticum turgidum* L.)». *Crop Science* 48 (1): 213-222.

Özkan, H., Willcox, G., Graner, A., Salamini, F., & Kilian, B. (2011). Geographic distribution and domestication of wild emmer wheat (*Triticum dicoccoides*). *Genetic resources and crop evolution*, 58, 11-53.

Plana, R., Álvarez, M., & Varela, M. (2006). Evaluación de una colección del género *Triticum*: trigo harinero (*Triticum aestivum* ssp. *aestivum*), trigo duro (*Triticum turgidum* ssp. *durum*) y triticale (X *Triticum secale* Wittmack) en las condiciones del occidente de Cuba. *Cultivos Tropicales*, 27(4), 49-52.

Salamini, F., Özkan, H., Brandolini, A., Schäfer-Pregl, R., & Martin, W. (2002). Genetics and geography of wild cereal domestication in the near east. *Nature Reviews Genetics*, 3(6), 429-441.

Sarkar, P., & Stebbins, G. L. (1956). Morphological evidence concerning the origin of the B genome in wheat. *American Journal of Botany*, 297-304.

Shewry, P. R. (2009). Wheat. *Journal of experimental botany*, 60(6), 1537-1553.

Sini, F. G., & Arzani, A. (2015). Karyological studies in *Triticum monococcum* subsp. *aegilopoides* and *Aegilops cylindrica* species grown wild pairwise in west Iran. *Rostaniha*, 16(2), 164-173.

SISA, Sistema de información simplificado agrícola. Trigo 2020/2021. Disponible en: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/sisa_if_trigo2021.pdf

Tsunewaki, K. (2009). Plasmon analysis in the Triticum-Aegilops complex. *Breeding Science*, 59(5), 455-470.

Van Slageren, M. W. (1994). *Wild wheats: a monograph of Aegilops L. and Amblyopyrum (Jaub. & Spach) Eig (Poaceae)*. Wageningen: Agricultural University.

Zaharieva, M., & Monneveux, P. (2014). Cultivated einkorn wheat (*Triticum monococcum* L. subsp. *monococcum*): the long life of a founder crop of agriculture. *Genetic resources and crop evolution*, 61, 677-706.

MATERIAL COMPLEMENTARIO:

Tabla 1: Análisis de la varianza Infostat, variable área y subespecie.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Área	1002	0,62	0,61	44,13

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	35,71	15	2,38	105,63	<0,0001
Subespecie	35,71	15	2,38	105,63	<0,0001
Error	22,22	986	0,02		
Total	57,93	1001			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,11638

Error: 0,0225 gl: 986

Subespecie	Medias	n	E.E.	
Sphaerococcum	0,14	30	0,03	A
Carthicum	0,16	60	0,02	A
Compactum	0,18	90	0,02	A B
Aestivum	0,19	20	0,03	A B
Durum	0,23	90	0,02	A B C
Turgidum	0,23	100	0,02	A B C
Turanicum	0,28	50	0,02	B C D
Polonicum	0,29	40	0,02	B C D
Spelta	0,33	120	0,01	C D
Monococcum	0,34	60	0,02	C D E
Dicoccon	0,37	119	0,01	D E
Macha	0,39	60	0,02	D E F G
Palaeocolchicum	0,44	20	0,03	E F G
Zhukovskiyi	0,50	10	0,05	F G
Aegilopoides	0,52	70	0,02	G
Dicoccoides	0,96	63	0,02	H

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Tabla 2: Análisis de la varianza Infostat, variable perímetro y subespecie.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Perim.	1002	0,74	0,73	33,55

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3052,44	15	203,50	182,89	<0,0001
Subespecie	3052,44	15	203,50	182,89	<0,0001
Error	1097,07	986	1,11		
Total	4149,51	1001			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,81768

Error: 1,1127 gl: 986

Subespecie	Medias	n	E.E.	
Sphaerococcum	1,47	30	0,19	A
Carthicum	1,74	60	0,14	A B
Compactum	1,80	90	0,11	A B C
Aestivum	1,87	20	0,24	A B C
Turgidum	2,02	100	0,11	A B C D
Durum	2,07	90	0,11	A B C D
Polonicum	2,46	40	0,17	B C D E
Turanicum	2,55	50	0,15	C D E
Spelta	2,82	120	0,10	D E F
Macha	3,07	60	0,14	E F G
Dicoccon	3,08	119	0,10	E F G
Monococcum	3,48	60	0,14	F G
Palaeocolchicum	3,73	20	0,24	G
Zhukovskiyi	3,84	10	0,33	G
Aegilopoides	7,26	70	0,13	H
Dicoccoides	7,46	63	0,13	H

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Tabla 3: Análisis de la varianza Infostat, variables circularidad y subespecies.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Circ.	1002	0,79	0,79	16,13

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	28,29	15	1,89	250,98	<0,0001
Subespecie	28,29	15	1,89	250,98	<0,0001
Error	7,41	986	0,01		
Total	35,70	1001			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,06720

Error: 0,0075 gl: 986

Subespecie	Medias	n	E.E.	
Aegilopoides	0,15	70	0,01	A
Dicoccoides	0,23	63	0,01	B
Monococcum	0,41	60	0,01	C
Palaeocolchicum	0,42	20	0,02	C D
Dicoccon	0,49	119	0,01	D E
Zhukovskiy	0,52	10	0,03	E
Spelta	0,53	120	0,01	E
Macha	0,53	60	0,01	E
Turanicum	0,55	50	0,01	E F
Polonicum	0,60	40	0,01	F G
Durum	0,67	90	0,01	G H
Carthlicum	0,67	60	0,01	H
Aestivum	0,69	20	0,02	H
Compactum	0,69	90	0,01	H
Turgidum	0,70	100	0,01	H
Sphaerococcum	0,80	30	0,02	I

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Tabla 4: Análisis de la varianza no paramétrica. Variable grano: desnudo o vestido, según la subespecie de trigo.

Prueba de Kruskal Wallis

Variable	Subespecie	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
grano	Aegilopoides	70	2,00	0,00	2,00	430,28	<0,0001
grano	Aestivum	20	1,00	0,00	1,00		
grano	Carthlicum	60	1,00	0,00	1,00		
grano	Compactum	90	1,00	0,00	1,00		
grano	Dicoccoides	63	2,00	0,00	2,00		
grano	Dicoccon	119	1,47	0,50	1,00		
grano	Durum	90	1,00	0,00	1,00		
grano	Macha	60	1,60	0,49	2,00		
grano	Monococcum	60	1,83	0,38	2,00		
grano	Palaeocolchicum	20	2,00	0,00	2,00		
grano	Polonicum	40	1,00	0,00	1,00		
grano	Spelta	120	1,41	0,49	1,00		
grano	Sphaerococcum	30	1,00	0,00	1,00		
grano	Turanicum	50	1,00	0,00	1,00		
grano	Turgidum	100	1,00	0,00	1,00		
grano	Zhukovskiy	10	1,50	0,53	1,50		

Trat.	Ranks
Turgidum	327,00 A
Durum	327,00 A
Turanicum	327,00 A
Sphaerococcum	327,00 A
Polonicum	327,00 A
Aestivum	327,00 A
Carthlicum	327,00 A
Compactum	327,00 A
Spelta	531,58 B
Dicoccon	562,76 B C
Zhukovskiy	577,50 B C D
Macha	627,60 C D
Monococcum	744,50 D E
Aegilopoides	828,00 E
Dicoccoides	828,00 E
Palaeocolchicum	828,00 E

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Tabla 5: Análisis de la varianza no paramétrica Infostat. Variable color del grano: rojo, ámbar o blanco, según la subespecie de trigo.

Prueba de Kruskal Wallis

Variable	Subespecie	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
color	Aegilopoides	70	2,07	0,67	2,00	259,64	<0,0001
color	Aestivum	20	2,00	1,03	2,00		
color	Carthlicum	60	1,00	0,00	1,00		
color	Compactum	90	2,11	1,00	3,00		
color	Dicoccoides	63	1,14	0,35	1,00		
color	Dicoccon	119	1,50	0,50	2,00		
color	Durum	90	1,89	0,32	2,00		
color	Macha	60	1,00	0,00	1,00		
color	Monococcum	60	1,50	0,50	1,50		
color	Palaeocolchicum	20	1,00	0,00	1,00		
color	Polonicum	40	1,75	0,44	2,00		
color	Spelta	120	1,75	0,43	2,00		
color	Sphaerococcum	30	2,00	0,83	2,00		
color	Turanicum	50	1,80	0,40	2,00		
color	Turgidum	100	1,40	0,49	1,00		
color	Zhukovskyi	10	2,00	0,00	2,00		

Trat.	Ranks	
Palaeocolchicum	235,50	A
Macha	235,50	A
Carthlicum	235,50	A
Dicoccoides	301,64	A
Turgidum	420,70	B
Monococcum	467,00	B C
Dicoccon	468,95	B C
Spelta	582,75	C D
Polonicum	582,75	C D
Aestivum	598,50	C D
Turanicum	605,90	D
Sphaerococcum	631,83	D
Compactum	638,83	D
Durum	647,06	D
Aegilopoides	678,00	D
Zhukovskyi	698,50	D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)