

אבולוציה בבקבוק

César Aguilar*

המחלקה הלאומית לגנומיקה של מגוון ביולוגי, היחידה לגנומיקה מתקדמת, מרכז למחקר ולימוד מתקדם של המכון הפוליטכני הלאומי, גוונחואטו, מקסיקו

אבולוציה היא התהליך שמקורו בשינויים ביצורים חיים במהלך הזמן, מה שמאפשר להם להיות מותאמים לסביבות שונות. אבולוציה יצרה את המגוון הגדול של יצורים חיים על פני כדור הארץ. באמצעות חיידקים, מדענים חוקרים כיצד אבולוציה פועלת, על-ידי חקירת דנ"א חיידקי ומוטציות בו, שהן הגורם העיקרי לשינויים בדנ"א אשר גורמים לאבולוציה. מדוע בחרנו לחקור חיידקים? טוב, מאחר שהם ככל הנראה האורגניזמים בעל יכולת ההסתגלות הגדולה ביותר על פני כדור הארץ. הם יכולים לשרוד בסביבות מגוונות ובתנאים קיצוניים, החל מהרי געש תת-ימיים וכלה באדמה הקפואה של אלסקה. כדי לערוך את הניסוי הזה בחרנו חיידק שנקרא אי קולי כנבדק של הניסויים המרתקים שנתאר במאמר הזה.

מהי אבולוציה?

בכדור הארץ שלנו ישנם אורגניזמים מיקרוסקופיים שמאכלסים כמעט כל פינה: חיידקים. ישנם בסביבות מליארד סוגי חיידקים על פני כדור הארץ. מה הסיבה למגוון העצום הזה של חיידקים שמאכלסים את כדור הארץ שלנו? **אבולוציה** היא המפתח. המילה אבולוציה משמשת לתיאור שינויים באורגניזמים שמתרחשים במהלך דורות רבים. בשנת 1831 הנטורליסט האנגלי צ'ארלס דרווין יצא למסע של 5 שנים על אוניית המחקר הבריטית H.M.S. Beagle. במהלך

סוקרים צעירים

CARLOS
גיל: 16



DANIEL
גיל: 14



MARÍA JOSÉ
גיל: 14

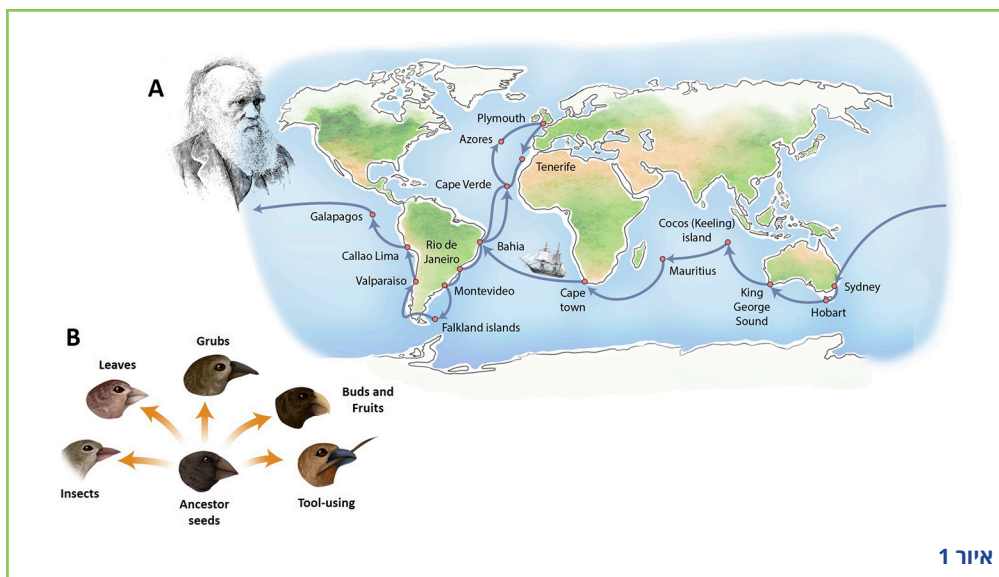


אבולוציה (Evolution)

בביולוגיה, זהו שינוי של מאפיין כלשהו של האורגניזם. השינויים האלה מגיעים ממוטציות שמתפתחות במהלך הדורות.

איור 1

מסעה של אונית ה-H.M.S. Beagle. בשנת 1831 הנטורליסט האנגלי צ'ארלס דרווין יצא למסע של 5 שנים על אונית המחקר הבריטית H.M.S. Beagle. אונית ה-Beagle סקרה כמה מקומות, שמוציגים כנקודות אדומות על המפה. התצפיות של דרווין על אורגניזמים באזורים האלה חשפו תבניות מעניינות בהתפלגות של אורגניזמים רבים ובמאפיינים שלהם כמו למשל צבים, פרושים, מולים, חולדות כיס וברזנים, אשר גרמו לדרוין לחשוב על התאמה. B. הדוגמה המפורסמת ביותר להתאמה נצפתה על-ידי דרווין במגוון הגדול של מקורים אצל ציפורי פרוש. המקורים של פרושים שונים נראו כמעוצבים עבור אכילת מזון מסוים שנוכח באזורים שבהם הן חיו. באמצעות התצפיות שלו דרווין הגה את תיאוריית האבולוציה על-ידי ברירה טבעית.



איור 1

הטיול דרווין הבחין בתבנית מעניינת בהתפלגות של הרבה יצורים חיים ובמאפיינים שלהם. הוא הבין שהמאפיינים האלה היו שינויים שסייעו לאורגניזמים להתאים לסביבות שבהן הם חיו (איור 1). הטיול הזה סייע לדרוין להגות תיאוריה של אבולוציה שבה הוא הסביר כיצד אורגניזמים חיים משתנים בכל דור ומותאמים לתנאי הסביבה שלהם כדי לשרוד [1].

כיצד אבולוציה מתרחשת?

שאלה גדולה שעלתה מהתיאוריה של דרווין הייתה כיצד התרחשו השינויים שהוא צפה בהם. כיום, אנו יודעים שהשינויים האלה נגרמים בסופו של דבר על-ידי **מוטציות**. מוטציות הן שינויים בגנים של אורגניזם. הגנים הם הוראות שיש לכל היצורים החיים. כל **גן** מורכב משילוב מיוחד של ארבע מולקולות שנקראות **נוקלאוטידים**: אדנין, ציטוסין, גואנין ותימין. הסדר של הנוקלאוטידים האלה, שנקרא ריצוף גנטי, קובע את התפקוד של כל גן. אוסף כל הגנים של אורגניזם נקרא **גנום**. הגנום מכיל את המידע לקידוד כל המאפיינים של אורגניזם, כך ששינוי באחד או יותר מהנוקלאוטידים של גן (שנקרא שינוי גנטי) יכול לשנות מאפיין של האורגניזם כמו צבע העיניים שלו, הגובה שלו והאופן שבו הוא מעבד מזון. המידע הגנטי הזה הוא מוֹרֵש, כלומר הוא מועבר מדור אחד לאחר.

מוטציות בגנים יכולות להתרחש באופן ספונטני או בתגובה לגורמי סטרס בסביבה, אולם ללא תלות בגורם, כל המוטציות הן אקראיות [2]. משמעות הדבר היא ששינויים גנטיים יכולים להתרחש בכל מקום בגנום של האורגניזם. הצטברות המוטציות לאורך דורות יכולה להיות מועילה, מזיקה או חסרת השפעה על ההישרדות. דרווין סיכם את כל העובדות האלה בעיקרון פשוט: **ברירה טבעית** [1]. ברירה טבעית היא תהליך של צבירה איטית של מוטציות מועילות במהלך הדורות, אשר גורמת לאורגניזמים להפוך למותאמים יותר לסביבה שלהם. אורגניזמים שהתאמתם לסביבה שלהם פחות טובה יחוו קשיים גדולים יותר בהישרדות מאורגניזמים שהמוטציות שיש להם סייעו להם להיות מותאמים יותר. כאשר מוטציות מייצרות שינויים משמעותיים באורגניזם, הם יכולים להוביל להתפתחות של מינים חדשים.

מוטציה (Mutation)

שינויים ברצף הנוקלאוטיד של הגנים.

גן (Gene)

קבוצה מוגדרת של נוקלאוטידים. הסדר והצורה של הנוקלאוטידים האלה קובעים את תפקוד הגן.

נוקלאוטיד (Nucleotide)

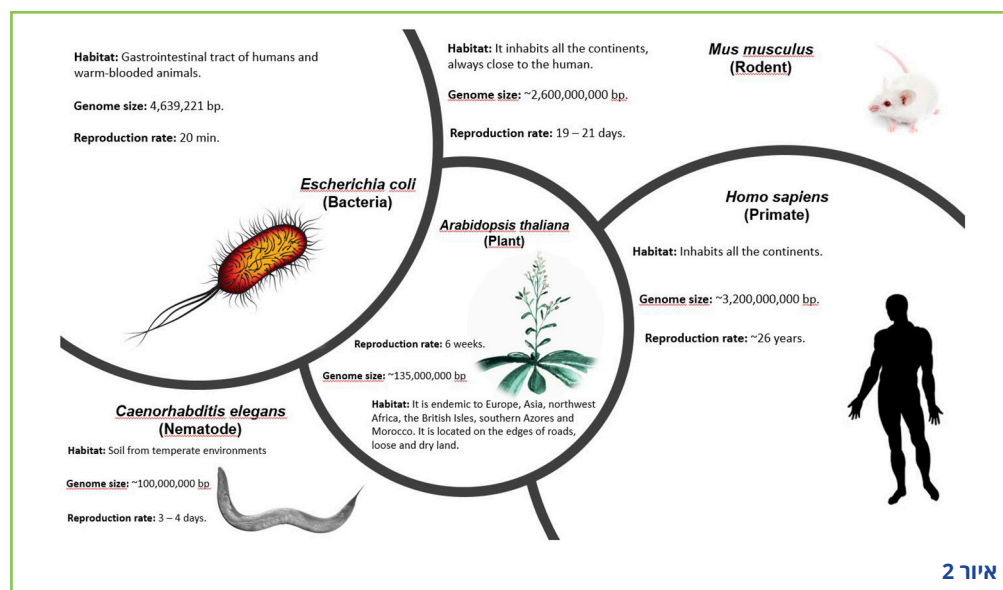
ישנן ארבע מולקולות אורגניות שנקראות אדנין, ציטוסין, גואנין ותימין אשר משמשות כאבני בניין של חומצה דאוקסיריבונוקלאית (דנ"א), המולקולה הביולוגית היסודית ביותר של כל צורות החיים על פני כדור הארץ.

גנום (Genome)

כל הגנים שיש לאורגניזם.

איור 2

אי קולי הוא אורגניזם יעיל עבור ניסויי אבולוציה. ישנם כמה אורגניזמים שמשמשים מדענים באופן שכיח לבצע ניסויים מכל הסוגים. בין האורגניזמים הפופולריים ביותר ישנו ה-*Arabidopsis thaliana*, המכרסם *Mus musculus*, והתולעת הפשוטה *Caenorhabditis elegans*. כדי לערוך ניסויים באבולוציה, לעומת זאת, מדענים צריכים אורגניזם עם זמן התרבות קצר וגנום קטן. לחיידק האי קולי יש זמן התרבות של 20 דקות בלבד! קצב החלוקה המהיר הזה והגנום הקטן שלו גורמים לו להיות מושלם עבור הניסויים האלה, במעבדות בכל רחבי העולם. באיור הזה אתם יכולים לראות את קצב ההתרבות ואת גודל הגנום (ביחידות של bp כלומר של זוגות בסיסים – base pairs) של בני אדם ושל אורגניזמים שכיחים אחרים בניסויים מדעיים.



חיידקים הם מצוינים לחקר אבולוציה

הדרך הקלאסית להדגים כי מינים משתנים עם הזמן היא דרך תיעוד מאובנים. מאובנים מראים כיצד נוצרו חיים פרימיטיביים, ואם אנו מוצאים מספיק מאובנים אפשר לצפות כיצד האורגניזם התפתח במהלך הזמן. אולם אם תיעוד המאובנים לא היה שלם, אין זה אפשרי לראות את כל השינויים האלה או להבין כיצד האורגניזם התפתח. כדי לפתור את הבעיה הזו, קל יותר לחקור את האבולוציה ישירות באמצעות בחינת כל השינויים הגנטיים שמתרחשים בכל דור. כדי לעשות זאת, חוקרים צריכים ראשית למצוא אורגניזם אידיאלי לחקירה. חיידקים הם הבחירה המתבקשת, מאחר שקל לגדל אותם במעבדה והם מתרבים מהר. אי קולי (*Escherichia coli*) וביצור (*E. coli*) הוא חיידק שכיח במחקר שמערכת העיכול שלו דומה לזו של בני אדם וחיות אחרות בעלות דם חם (איור 2). לשם השוואה, אם רצינו לבצע ניסוי אבולוציה עם בני אדם היינו צריכים לחכות בממוצע 26 שנים עד שיהיה לנו דור חדש, בעוד שאי קולי יוצר דור חדש כל 20 דקות – פחות זמן ממה שלוקח להזמין פיצה!

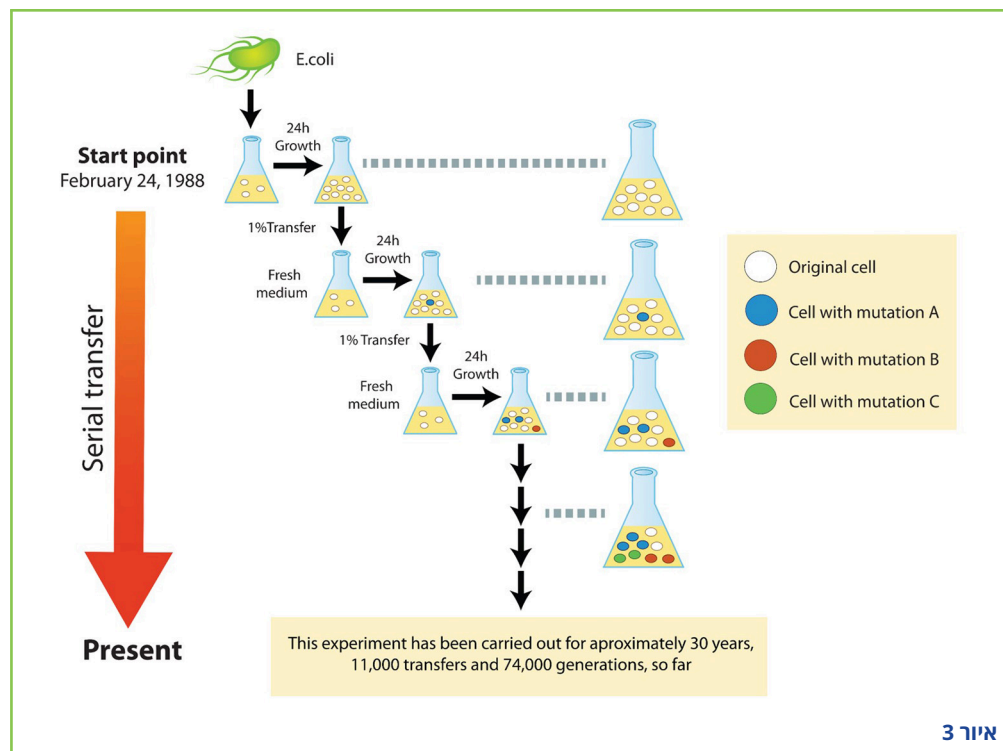
נוסף על כך לאי קולי יש גנום קטן, מה שגורם לחקירת השינויים שמתרחשים בנוקלאוטידים שלו בכל דור להיות קלה וזולה (איור 2). בחלקים הבאים במאמר נתאר חלק מהניסויים שמדענים ביצעו באמצעות אי קולי במטרה לחקור את תהליך האבולוציה במעבדה.

כיצד חיידקים מתפתחים בתגובה לקור קיצוני?

באמצעות חקירת אי קולי במעבדה, קבוצת מדענים אחת קיוותה להבין כיצד חיידקים עשויים להיות מותאמים לתנאי קור קיצוני. כדי לחקור זאת הם ערכו ניסוי שבו אי קולי היה חשוף לתנאי קור קיצוני לתקופות זמן ארוכות. הניסויים כללו 150 מחזורים של הקפאה ב-80°C במשך 22.5 שעות, ואז הפשרה בטמפרטורת החדר במשך 1.5 שעות. התוצאה? שרידות חיידקי האי קולי גדלה; הם התפתחו. כאשר מדענים חקרו את הגנום של החיידקים המפותחים האלה, הם מצאו מוטציות שנטרלו גן שמשחק תפקיד ביצור של קרדיוליפין, מולקולה שגורמת לכיסוי

איור 3

ניסוי האבולוציה ארוך הטווח (LTEE). התחיל בשנת 1988. בניסוי הזה מדענים השתמשו בשיטה שנקראת serial transfer שמשמעותה כי בכל יום מאז ה-24 בפברואר 1988, 1% מתרבית האי קולי בבקבוק הועברה לתווך גידול חדש. כשהזמן עובר נוצרות מוטציות מועילות ומזיקות. המוטציות המועילות גורמות להתאמה ומסייעות לחיידקים להתמודד עם תנאי הרעב שאוכלוסיית החיידקים מתמודדת איתם ביומיום. הפרויקט הזה עוד לא נגמר. כעת, אחרי יותר מ-74,000 דורות, הצטבר ידע רב.



החיצוני של תא חיידקי להיות מוצק וקשיח. חקירה נוספת הוכיחה שכיבוי ייצור הקרדיוליפין סייע לשמור על הכיסוי נוזלי וגמיש אחרי הקפאה, מה שהגדיל את השרידות [3].

מחקר האבולוציה האמביציוזי ביותר

מחקר האבולוציה האמביציוזי ביותר בוצע על-ידי מדען בשם ריצ'רד לנסקי. לנסקי שמר חיידקי אי קולי בבקבוק מיוחד עם נוזל, שנקרא תווך, שמכיל חומרי מזון מוגבלים (איור 3). בתווך הגידול הזה החיידקים גדלו במהרה אולם סיימו את חומרי המזון באותה המהירות. לאחר מכן החיידקים נכנסו למצב של "רעב" שנמשך 24 שעות, שאחריו חלק מהחיידקים הרעבים האלה הועברו לבקבוק אחר עם תווך חדש שמכיל את אותם חומרי המזון. לאורך תקופת זמן ארוכה, הסטרס שנחווה על-ידי החיידקים בתהליך הוביל לייצור של מוטציות, וכתוצאה מכך לאבולוציה של אוכלוסייה חיידקית. לנסקי ומשתפי הפעולה שלו התחילו את **ניסוי האבולוציה ארוך הטווח** הזה (LTEE) בשנת 1988 והוא עדיין נמשך היום [4]. כעת, לאחר יותר מ-74,000 דורות, הרבה דברים מעניינים קרו.

ממצאים מדהימים

אחת התצפיות המעניינות ביותר מניסוי ה-LTEE הייתה **הכשירות** במהלך 5,000 הדורות הראשונים (בערך שנתיים). מה זה אומר? טוב, אורגניזמים עם כשירות גבוהה יותר מותאמים טוב יותר לסביבה שלהם והם יטו ליצור יותר צאצאים בהשוואה למתחרים פחות מותאמים. לנסקי ראה שבמהלך השנתיים הראשונות לניסוי נוצרו שינויים גנטיים בחלק מהחיידקים, מה שאפשר לחיידקים האלה להיות יותר מותאמים לסביבה, עד שהם היו לאוכלוסייה השלטת [4].

ניסוי האבולוציה ארוך הטווח (LTEE)

ראשי תיבות של "Long-term evolution experiment", שמתייחס לניסויי אבולוציה אשר מבוצעים לאורך תקופות זמן ארוכות.

כשירות (Fitness)

עד כמה אורגניזם מתאים לסביבה שלו, מה שקובע כמה צאצאים יהיו לאותו האורגניזם.

חלק מהחידקים הותאמו לסביבה כל כך טוב שהם אפילו איבדו תפקודים מסוימים שכבר לא היו נדרשים תחת תנאי הניסוי. זה דומה למה שקרה לחיות מסוימות אחרי מאות או אלפי שנים של מחיה בחושך מוחלט, כמו במערות. החיות האלה פיתחו התאמה שבה העיניים בסופו של דבר נאבדו, מאחר שהן לא היו מועילות בתנאי המחיה החשוכים מאוד האלה.

ממצא מדהים אחר מה-LTEE היה שבניסוי אחד אוכלוסיית האי קולי בעלת התאמה הטובה הזו לא הייתה האוכלוסייה היחידה, אלא שאוכלוסייה שניונית נוספת התקיימה יחד איתם מאחר שהיא פיתחה את היכולת להשתמש באצטט, מוצר פסולת של האוכלוסייה הדומיננטית. זה דומה ליחסים שבין אריות ואולי-נבלות. האריות ניזונים מחיות שהם צדו, והשאריות שהם משאירים נהיות למזון עבור חיות אחרות כמו צבועים או נשרים.

כפי שצוין קודם, אורגניזמים שצוברים מספיק שינויים גנטיים ומבניים יכולים להפוך למינים חדשים. האם התהליך הזה יכול היה להתרחש ב-LTEE? אי קולי הם בעלי תכונות מסוימות שגורמים להם להיות אי קולי ולא מיני חידקים אחרים. בין המאפיינים האלה - חוסר היכולת להשתמש בחומר שנקרא ציטרט כמקור מזון בנוכחות של חמצן. באופן מפתיע, מדענים גילו שאחרי 31,500 דורות (יותר מ-12 שנים), אוכלוסייה אחת של אי קולי התחילה להשתמש בציטרט כמקור מזון [4]. האבולוציה של היכולת להשתמש בציטרט היא נדירה ביותר! טוב, לאי קולי יש את כל הגנים הנדרשים לצרוך ציטרט, אולם הגנים האלה מכובים ופועלים רק ללא נוכחות חמצן. כאשר המדענים האלה הבחינו בגנום של אורגניזמים שהתפתחו הם הבינו שכתוצאה ממוטציות מסוימות הגנים האלה הודלקו, מה שאפשר לאי קולי להשתמש בציטרט כמקור מזון. כעת, האם צורך הציטרט הזה הוא מין חדש של אי קולי? מה אתם חושבים?

מסקנות

כל מחקרי האבולוציה לימדו אותנו שחיים מוצאים דרך להתקיים. מהסיבה הזו, גנומים של חידקים יכולים להסתגל בדרכים מפתיעות כשחידקים ניצבים בפני אתגרים סביבתיים. התהליך הזה מאפשר לחידקים לאכלס מקומות חדשים. אי קולי היה לאורגניזם מודל של המחקרים האבולוציוניים האלה מאחר שהוא קל לגידול, יש לו גנום קטן ואנו יודעים עליו הרבה דברים. הנתונים שיוצרו מהניסויים האלה תורמים לחקר החשיבות של שאלות אבולוציוניות ויאפשרו לנו לא רק להבין אלא אולי אפילו גם לכוון את האבולוציה בעתיד. האם אתם יכולים לדמיין עתיד שבו אפשרי להכיר את כל הגנים ששולטים במאפיינים הפיזיים וגורמי המחלות של אורגניזם? אולי איננו רחוקים מדי מזה, וכשזה קורה אנו יכולים לסייע לאורגניזמים להילחם כנגד מחלות ואולי למצוא דרכים אחרות לסייע לאורגניזמים, כולל בני אדם, להפוך מתאימים יותר לסביבה שלהם.

תודות

אני מודה ל- Daniel E. Bustos Díaz ול- Diana E. García Hernández על עזרתם המוקפדת בסקירת המאמר וקריאת הגהה באנגלית ששיפרה את איכות כתב היד. אני גם רוצה להודות ל- Erika Viridiana Cruz Bonilla על תמיכתה בגיבוש האיוורים במאמר הזה.

מקורות

1. Darwin, C. R. 1859. On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life. London: John Murray.
2. Foster, P. L. 2007. Stress-induced mutagenesis in bacteria. Crit. Rev. Biochem. Mol. Biol. 42:373–97. doi: 10.1080/10409230701648494
3. Sleight, S. C., Orlic, C., Schneider, D., and Lenski, R. E. 2008. Genetic basis of evolutionary adaptation by Escherichia coli to stressful cycles of freezing, thawing and growth. Genetics 180:431–43. doi: 10.1534/genetics.108.091330
4. Barrick, J. E., Yu, D. S., Yoon, S. H., Jeong, H., Oh, T. K., Schneider, D., et al. 2009. Genome evolution and adaptation in a long-term experiment with Escherichia coli. Nature 461:1243–7. doi: 10.1038/nature08480

פורסם אונליין: 27 באוגוסט 2020

נערך על ידי: Angelica Cibrian-Jaramillo, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV), Mexico

ציטוט: Aguilar C (2020) אבולוציה בבקבוק. Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2019.00075-he

תורגם והותאם:

Aguilar C (2019) Evolution in a Bottle. Front. Young Minds 7:75. doi: 10.3389/frym.2019.00075

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

COPYRIGHT © 2019 © Aguilar 2020. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון Creative Commons Attribution License (CC BY). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים (המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה). השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקרים צעירים

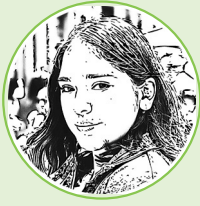
CARLOS, גיל: 16

העיר שלי מחוקמת במרכז מקסיקו, שהיא מדינה מגניבה לגור בה מאחר שיש לה תרבות כל כך נפלאה והאנשים שלה נדיבים מאוד זה לזה ולאנשים אחרים שמבקרים במדינה הנפלאה שלנו.

DANIEL, גיל: 14

אני אוהב ספורט, במיוחד כדורגל וסיף. הארוחה האהובה עליי היא טאקו, ואני גם אוהב ללכת לצפות במכוניות וללמוד עליהן.





MARÍA JOSÉ, גיל: 14

קוראים לי María José, אני בת 14 ואני אוהבת בלט. אני רוקדת מאז שהייתי בת 3 ואני גם אוהבת מדע, והייתי רוצה ללמוד רפואה.

הכותב

CÉSAR AGUILAR

אני חוקר במעבדה הלאומית לגנום למגוון ביולוגי. יש לי דוקטורט בביוכימיה ורקע במחקר באבולוציה של חיידיקים. אני אוהב את כל צורות החיים, במיוחד מיקרואורגניזמים. אני חוקר אותם במשך יותר מ-10 שנים: כיצד הם שורדים, כיצד פועל חילוף החומרים שלהם, כיצד הם התפתחו והכי חשוב - כיצד הם יכולים לסייע לנו להפוך את כדור הארץ למקום טוב יותר. בזמני הפנוי אני אוהב להתאמן, לשחק כדורגל ולקרוא. אני אוהב את המשפחה שלי, קפה, סרטים וקומיקס. גיבור-העל האהוב עליי הוא קפטן אמריקה.

*cesar.aguilar@cinvestav.mx

Hebrew version
provided by

מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים (ע"ר)
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem

